

Научно-информационный журнал «Архитектура, строительство, транспорт» посвящен рассмотрению широкого круга вопросов теоретического и практического характера, направленных на решение проблем в области архитектуры, строительства и транспорта. Цель журнала – создать доступное информационно-коммуникационное пространство для обсуждения новых знаний, подходов в данных сферах и внедрения научных и технических достижений в практику.

Журнал выходит 4 раза в год

Наименование и содержание рубрик журнала соответствуют отраслям науки и группам специальностей научных работников Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

- 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)
- 2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.4 Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки)
- 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)
- 2.1.9 Строительная механика (технические науки)
- 2.1.11 Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура, технические науки, искусствоведение)
- 2.1.12 Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура, технические науки)
- 2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6 Технология машиностроения (технические науки)
- 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
- 2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
- 2.6.17 Материаловедение (по отраслям)
- 2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки)

The scientific and information journal "Architecture, Construction, Transport" ("Arkhitektura, stroitel'stvo, transport") addresses a wide range of theoretical and practical issues aimed at solving problems of architecture, construction, and transport. The purpose of the journal is to create an accessible information and communication space for discussing new knowledge and approaches in these areas and introducing scientific and technical achievements into practice.

The journal is published 4 times a year

The name and content of the journal sections correspond to the branches of science and groups of specialties of scientific workers according to the Nomenclature of Scientific Workers' Specialties for which academic degrees are awarded.

- 2.1.1 Construction structures, buildings and facilities (engineering sciences)
- 2.1.2 Bases and foundations, underground structures (engineering sciences)
- 2.1.3 Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and illumination (engineering sciences)
- 2.1.4 Water supply sewerage, construction systems for water resources protection (engineering sciences)
- 2.1.5 Construction materials and products (engineering sciences)
- 2.1.8 Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels (engineering sciences)
- 2.1.9 Structural mechanics (engineering sciences)
- 2.1.11 Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture, engineering sciences, art history)
- 2.1.12 Architecture of buildings and structures. Creative conceptions of architectural activity (architecture, engineering sciences)
- 2.2.5 Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing (engineering sciences)
- 2.5.6 Machine-building technology (engineering sciences)
- 2.5.11 Ground transport and technological means and complexes (engineering sciences)
- 2.5.21 Machines, aggregates and technological processes (engineering sciences)
- 2.6.17 Materials science (by industry)
- 2.9.5 Operation of motor transport (engineering sciences)

Учредители журнала

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (издатель)

Главное управление строительства Тюменской области

Редакционная коллегия

Мальцева Татьяна Владимировна, д. ф.-м. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень – **главный редактор**

Абдикаримов Рустамхан Алимханович, д. ф.-м. н., профессор, Ташкентский архитектурно-строительный университет, Ташкент (Республика Узбекистан)

Абдураманов Абдуманап Абдукаримович, д. т. н., профессор, Таразский региональный университет им. М. Х. Дулати, Тараз (Республика Казахстан)

Амирзода Ориф Хамид, д. т. н., доцент, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе (Республика Таджикистан)

Арынов Калдыбай Канаевич, доктор архитектуры, профессор, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана (Республика Казахстан)

Асенов Асен Цветанов, PhD, доцент, Русенский университет имени Ангела Кынчева, Русе (Болгария)

Барсуков Владимир Георгиевич, д. т. н., доцент, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно (Республика Беларусь)

Бартоломей Леонид Адольфович, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Бородинец Анатолий Викторович, д. т. н., профессор, Рижский технический университет, Рига (Латвия)

Ватин Николай Иванович, д. т. н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Грдич Зоран, д. т. н., профессор, Нишский университет, Ниш (Сербия)

Захаров Николай Степанович, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Ковенский Илья Моисеевич, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Кудрявцев Сергей Анатольевич, д. т. н., профессор, член-корреспондент РААСН, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

Мамян Заруи Генриховна, кандидат архитектуры, профессор, Национальный университет архитектуры и строительства Армении, Ереван (Республика Армения)

Миронов Виктор Владимирович, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Менендес Пидаль Игнасио, PhD, профессор, Политехнический университет Мадрида, Мадрид (Испания)

Мерданов Шахбуба Магомедкеримович, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Мурали Гунасекаран, PhD, доцент, Университет SASTRA, Танджавур (Индия)

Овчинников Евгений Витальевич, д. т. н., профессор, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно (Республика Беларусь)

Овчинников Игорь Георгиевич, д. т. н., профессор, действительный член Академии транспорта РФ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Панфилов Александр Владимирович, кандидат архитектуры, доцент, Департамент строительства, архитектуры и земельных отношений Администрации города Салехарда, Салехард

Попок Николай Николаевич, д. т. н., профессор, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк (Республика Беларусь)

Райчик Марлена, д. т. н., профессор, Ченстоховский технологический университет, Ченстохова (Польша)

Саксена Абхишек, PhD, профессор, Уттаракхандский университет Дев Бхуми, Дехрадун (Индия)

Сепехри Мехран, PhD, доцент, Технологический университет имени Шарифа, Тегеран (Иран)

Сладковски Александр Валентинович, д. т. н., профессор, Силезский технический университет, Катовице (Польша)

Соколов Владимир Григорьевич, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Султанова Дилшоода Намазовна, доктор архитектуры, профессор, Самаркандский архитектурно-строительный институт, Самарканд (Республика Узбекистан)

Тарасенко Александр Алексеевич, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Уляшева Вера Михайловна, д. т. н., профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

Федюк Роман Сергеевич, д. т. н., доцент, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Ци Чэнчжи, д. ф.-м. н., профессор, Пекинский университет гражданской архитектуры и архитектуры, Пекин (Китай)

Чекардовский Михаил Николаевич, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Чжао Вэнь, PhD, профессор, Северо-Восточный университет, Шэньян (Китай)

Редакционный совет

Набоков Александр Валерьевич, к. т. н., доцент, директор Строительного института, Тюменский индустриальный университет – **председатель**

Перевалов Павел Анатольевич, начальник Главного управления строительства Тюменской области

Арбузова Зоя Геннадьевна, заместитель генерального директора СРО Союз «Организация изыскателей Западносибирского региона»

Катаева Елена Сергеевна, директор Союза «Саморегулируемая организация строителей Тюменской области»

Никитин Андрей Юрьевич, президент Союза строителей (работодателей) Тюменской области

Скоробогатова Юлия Леонидовна, генеральный директор Союза «Саморегулируемая организация проектировщиков «Западная Сибирь»

Табанакоев Андрей Владимирович, председатель Тюменского отделения Союза архитекторов России

Фролов Александр Витальевич, директор ГАУ ТО «Управление государственной экспертизы проектной документации»

Редакция

Маслова Евгения Анатольевна – редактор
Вахрушева Наталья Викторовна – редактор
Николюк Светлана Анатольевна – дизайнер

Адрес редакции

625001, Тюмень, ул. Луначарского, 2, к. 117
Тюменский индустриальный университет
Телефон (3452) 28-37-50, e-mail: ast@tyuiu.ru

Адрес издателя

625000, Тюмень, ул. Володарского, 38
Тюменский индустриальный университет
Телефон (3452) 28-35-91

Дата выхода: 25.12.2023
Цена свободная

Отпечатано в ООО «Типография ВиК»
625056, Тюмень, ул. Счастливая, 21, телефон: (3452) 38-86-88

Journal Founders

FSBEI HE "Industrial University of Tyumen" (publisher)
General Administration of Construction of the Tyumen region

Editorial Board

Tatyana V. Maltseva, D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen – **editor-in-chief**

Rustamkhan A. Abdikarimov, D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent (Republic of Uzbekistan)

Abdumanap A. Abduramanov, D. Sc. in Engineering, Professor, M. Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz (Republic of Kazakhstan)

Orif Kh. Amirzoda, D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe (Republic of Tajikistan)

Kaldybay K. Arynov, D. Sc. in Architecture, Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana (Republic of Kazakhstan)

Asen Ts. Asenov, PhD, Associate Professor, "Angel Kanchev" University of Ruse, Ruse (Bulgaria)

Vladimir G. Barsukov, D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno (Republic of Belarus)

Leonid A. Bartolomey, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

Anatoliy V. Borodinecs, D. Sc. in Engineering, Professor, Riga Technical University, Riga (Latvia)

Nikolay I. Vatin, D. Sc. in Engineering, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

Zoran Grdić, D. Sc. in Engineering, Professor, University of Niš, Niš (Serbia)

Nikolay S. Zakharov, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

Ilya M. Kovenskiy, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

Sergey A. Kudryavtsev, D. Sc. in Engineering, Professor, Corresponding Member of RAACS, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

Zaruhi G. Mamyán, C. Sc. in Architecture, Professor, National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan (Republic of Armenia)

Viktor V. Mironov, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

Ignacio Menendez Pidal, PhD, Professor, Madrid Polytechnic University, Madrid (Spain)

Shakhbuba M. Merdanov, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

Gunasekaran Murali, PhD, SASTRA Deemed to be University, Thanjavur (India)

Evgeniy V. Ovchinnikov, D. Sc. in Engineering, Professor, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno (Republic of Belarus)

Igor G. Ovchinnikov, D. Sc. in Engineering, Professor, Full Member of the Academy of Transport of Russian Federation, Perm National Research Polytechnic University, Perm

Alexander V. Panfilov, C. Sc. in Architecture, Associate Professor, Department of Construction, Architecture and Land Relations of the Administration of Salekhard, Salekhard

Nikolay N. Popok, D. Sc. in Engineering, Professor, Euphrosyne Polotskaya State University of Novopolotsk, Polotsk (Republic of Belarus)

Marlena Rajchik, D. Sc. in Engineering, Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa (Poland)

Abhishek Saxena, PhD, Professor, Dev Bhoomi Uttarakhand University, Dehradun (India)

Mehran Sepehri, PhD, Associate Professor, Sharif University of Technology, Tehran (Iran)

Alexander V. Sladkovski, D. Sc. in Engineering, Professor, Silesian University of Technology, Katowice (Poland)

Vladimir G. Sokolov, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

Dilshoda N. Sultanova, D. Sc. in Architecture, Professor, Samarkand State Architectural and Civil Engineering Institute, Samarkand (Republic of Uzbekistan)

Alexander A. Tarasenko, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

Vera M. Ulyasheva, D. Sc. in Engineering, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg

Roman S. Fediuk, D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok

Chengzhi Qi, D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing (China)

Mikhail N. Chekardovskiy, D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen

Zhao Wen, PhD, Professor, Northeastern University, Shenyang (China)

Editorial Council

Alexander V. Nabokov, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Director of the Construction Institute, Industrial University of Tyumen – **Chairman**

Pavel A. Perevalov, Head of the General Administration of Construction of the Tyumen region

Zoya G. Arbuzova, Deputy General Director of SRO Soyuz «Organizatsiya izyskateley Zapadnosibirskogo regiona»

Elena S. Kataeva, Director of the Union «Samoreguliruemaya organizatsiya stroiteley Tyumenskoy oblasti»

Andrey Yu. Nikitin, President of the Soyuz stroiteley (rabotodateley) Tyumenskoy oblasti

Yulia L. Skorobogatova, General Director of the Union «Samoreguliruemaya organizatsiya proektirovshchikov «Zapadnaya Sibir'»

Andrey V. Tabanakov, Chairman of the Tyumen Branch of the Union of Architects of Russia

Alexander V. Frolov, Director of the state autonomous institution of the Tyumen region "Upravlenie gosudarstvennoy ekspertizy proektnoy dokumentatsii"

Edition

Evgenia A. Maslova – editor
Natalia V. Vakhrusheva – editor
Svetlana A. Nikol'yuk – designer

Editorial office

625001, Tyumen, 2 Lunacharskogo St., office 117
Industrial University of Tyumen
Phone (3452) 28-37-50, e-mail: ast@tyuiu.ru

Publisher address

625000, Tyumen, 38 Volodarskogo St.
Industrial University of Tyumen
Phone (3452) 28-35-91

Содержание

Строительство

А. П. Малышкин, А. В. Есипов, А. И. Бараняк, М. А. Есипов

Температурные деформации покрытия здания из алюминиевого сплава, эксплуатируемого на открытом воздухе 6

В. С. Сафарян

Отдельностоящий фундамент со ступенчатой подошвой: результаты натурного эксперимента 17

А. Е. Гладков, Т. В. Мальцева, Н. П. Исакова

Методика определения механических характеристик вязкоупругих грунтов 26

А. А. Тестешев, В. Д. Тимоховец, Т. Г. Бабич

Дифференциация применения методов дистанционного исследования дорожного движения 34

П. С. Хужаев

Эффективность маломощных твердотопливных водогрейных котлов.....48

С. Ю. Андреев, Л. В. Белова

Особенности расчета величины фактора обновления поверхности пузырьков воздуха..... 55

О. А. Продоус, Д. И. Шлычков, А. А. Шестаков, А. Г. Челоненко

Об актуальности разработки справочных пособий по гидравлическому расчету изношенных инженерных сетей городской инфраструктуры 64

Транспорт

Д. А. Захаров, А. А. Фадюшин

Управление мобильностью при развитии в городах сервисов краткосрочной аренды электросамокатов 71

А. Асенов, В. Пенчева, И. Георгиев

Распределение еженедельного рабочего времени водителей грузовых автомобилей в городской логистике 80

Машиностроение

В. А. Николаев

Определение затрат энергии на перемещение лезвия ножа бульдозера в начале прохода 90

Информация для авторов

Правила подготовки рукописи (на русском языке) 104

Правила подготовки рукописи (на английском языке) 106

Contents

Construction

A. P. Malyshkin, A. V. Esipov, A. I. Baranyak, M. A. Esipov

Thermal deformations of the building's covering made from the aluminum alloy operated outdoors 6

V. S. Safaryan

Freestanding foundation with stepped base.
Results of a full-scale experiment..... 17

A. E. Gladkov, T. V. Maltseva, N. P. Isakova

Method for determining the mechanical characteristics of viscoelastic soils..... 26

A. A. Testeshev, V. D. Timohovets, T. G. Babich

Differentiation of the use of remote traffic research methods 34

P. S. Khujaev

The efficiency of low-power solid-fuel water boilers..... 48

S. Yu. Andreev, L. V. Belova

Peculiarities of calculating the value of the air bubble surface renewal coefficient 55

O. A. Prodous, D. I. Schlychkov, A. A. Shestakov, A. G. Chelonenko

On the need to develop reference manuals on the hydraulic calculation of won-out engineering networks of urban infrastructure..... 64

Transport

D. A. Zakharov, A. A. Fadyushin

Mobility management in the development of short-term electric scooter rental services in cities 71

A. Asenov, V. Pencheva, I. Georgiev

Distribution of weekly working hours of truck drivers in urban logistics..... 80

Mechanical engineering

V. A. Nikolayev

Determination of energy consumption for moving the bulldozer knife at the beginning of the passage..... 90

Instructions for authors

Manuscript preparation guidelines (In Russian) 104

Manuscript preparation guidelines (In English) 106

УДК 624.014.7

2.1.1 Строительные конструкции,
здания и сооружения (технические науки)

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО НА ОТКРЫТОМ ВОЗДУХЕ

А. П. Малышкин, А. В. Есипов, А. И. Бараняк, М. А. Есипов
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

THERMAL DEFORMATIONS OF THE BUILDING COVERING MADE FROM THE ALUMINUM ALLOY OPERATED OUTDOORS

Aleksandr P. Malyshkin, Andrei V. Esipov, Andrej I. Baranyak, Mixail A. Esipov
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Целью проведенных численно-аналитических исследований являлся анализ годовых температурных деформаций большепролетного покрытия здания ледового Дворца спорта в г. Тюмени. Конструкция покрытия выполнена из алюминиевого сплава марки 1915 и эксплуатируется на открытом воздухе. Перепады температур наружного воздуха в течение года привели к значительным температурным деформациям покрытия в поперечном направлении. Сопоставление полученных расчетных значений температурных деформаций ферм покрытия с нормативными предельными величинами позволило сделать вывод о неудачной с точки зрения восприятия климатических воздействий несущей структуре покрытия. Применение классических подходов к проектированию покрытий здания внутри теплового контура позволяет значительно снизить риски возникновения дефектов и повреждений конструкций при их длительной эксплуатации.

Ключевые слова: обследование металлических конструкций, температурные воздействия, температурные деформации, расчет температурных деформаций

Abstract. The purpose of the numerical and analytical studies was to analyze the annual temperature deformations of the long-span coating of the Sports Arena building in Tyumen. The structure of covering is made of 1915 grade aluminum alloy and is operated outdoors. Annual differences in outdoor air temperatures led to significant temperature deformations of the building covering in the transverse direction. Comparison of the obtained calculated values of thermal deformations of the roof trusses with the normative limit values made it possible to conclude that the bearing structure of the covering is poor from the point of view of perception of climatic influences. The use of classic approaches to the design of building coverings inside the thermal circuit makes it possible to significantly reduce the risks of defects and damage to structures during their long-term operation.

Key words: inspection of metal structures, temperature effects, thermal deformations, calculation of thermal deformations

Для цитирования: Температурные деформации покрытия здания из алюминиевого сплава, эксплуатируемого на открытом воздухе / А. П. Малышкин, А. В. Есипов, А. И. Бараняк, М. А. Есипов. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-6-16. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 6–16.

For citation: Malyshkin, A. P., Esipov, A. V., Baranyak, A. I., & Esipov, M. A. (2023). Thermal deformations of the building covering made from the aluminum alloy operated outdoors. *Architecture, Construction, Transport*, (4(106)), pp. 6-16. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-6-16.

Введение

Применение большепролетных конструкций из алюминия в мировой практике обусловлено рядом факторов, а именно – малым собственным весом, совмещением функций несущей и ограждающей конструкции, быстрым монтажом пространственных блоков покрытия при малом объеме работ на высоте, а также антикоррозионной стойкостью элементов покрытия и снижением эксплуатационных затрат за счет уменьшения отапливаемого объема здания и применения герметичной кровельной алюминиевой мембраны.

Первое большепролетное покрытие из алюминиевых пространственных блоков с предварительно напряженной обшивкой было разработано и смонтировано в Москве в 1971 г. при поддержке академика А. Ф. Белова для Малого выставочного павильона Всесоюзного института легких сплавов (ВИЛС) [1, 2]. В последующие годы в СССР было успешно осуществлено строительство ряда уникальных объектов с использованием алюминиевых блоков покрытия (таблица 1).

Важным моментом при изготовлении пространственных блоков покрытия было освоение технологии соединения несущих стержневых элементов при помощи сварных стыковых швов под защитой инертного газа [3, 4], хотя и была возможность применять болтовые соединения не только в качестве второстепенных элементов [5, 6].

Одновременно с этим, техническое решение с утеплением покрытия здания в уровне нижних поясов стропильных ферм покрытия, обусловленное идеей экономии энергоресурсов при уменьшении отапливаемого объема здания,

Таблица 1

Table 1

*Здания, построенные с применением
алюминиевых блоков покрытия
Buildings constructed using aluminum roof blocks*

Объект	Про-лет, м	Расход Al, кг/м ²	Вес, кг/м ²
Выставочный павильон (Москва, ЦНИИЭП Жилища)	30	13	20
Дом мебели, (Рига, Латвгжданпроект)	36	15	22
Легкоатлетический манеж (Кишинев, Кишинев-гражданпроект)	48	18	25
УДС «Крылья Советов» (Москва, ЦНИИЭП Жилища)	60	20	30
Выставочный павильон (Москва, ЦНИИЭП Жилища)	84	20	32
Ледовый Дворец спорта (Тюмень, Тюменьгражданпроект)	60	23	35
Киноконцертный зал, (Ялта, Ленгипроттеатр)	36	20	28

привело к вынужденной эксплуатации части несущих конструкций в условиях открытого воздуха с температурными перепадами как в течение года, так и в течение суток.

В настоящее время в Российской Федерации, основываясь на результатах научных исследований, большой пласт которых посвящен изучению физико-механических свойств алюминиевых сплавов [7–12], реологическим свойствам алюминиевых сплавов [13, 14], их свариваемости [15–17] и т. д., а также принимая во внимание

опыт возведения зданий с использованием большепролетных алюминиевых конструкций, предложены различные проекты реконструкций покрытий стадионов и спортивных комплексов с использованием алюминиевых и сталеалюминиевых блоков покрытия.

Однако теоретические возможности и достоинства алюминиевых сплавов в качестве материала для несущих конструкций зданий и сооружений до сих пор были недостаточно изучены с точки зрения эксплуатации большепролетных покрытий в условиях знакопеременных температур.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является Дворец спорта в г. Тюмени (рис. 1). Строительство здания осуществлялось с 1980 по 1985 г. по проекту малой спортивной арены «Спартак». Проектировщиком выступил институт «Тюменьгражданпроект».

Покрытие спортивной арены разработано ВИЛС. Кроме того, в разработке алюминиевых

конструкций приняли участие ЦНИИПСК, ЦНИИСК, ВИЛС и другие научно-исследовательские институты СССР. Был разработан новый алюминиевый сплав марки 1915 с заданными свойствами (ВИАМ), разработана и освоена технология производства прессованных профилей из этого сплава (ВИЛС) [1].

Покрытие арены имеет размер 96 × 60 м и состоит из 16 отдельных, не взаимосвязанных между собой, предварительно напряженных пространственных блоков. Блоки покрытия размером 60 × 6 м каждый представляют собой пространственные фермы, которые состоят из двух стропильных ферм, отстоящих друг от друга на расстоянии 5.5 м и соединенных между собой поперечными вертикальными связями и решетчатыми диафрагмами с подвесами к нижнему поясу блока.

Стропильные фермы пространственных блоков – трапецеидальной формы со шпренгельной решеткой. Высота ферм в коньке и на опоре – 4.5 и 1.5 м соответственно (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид здания Дворца спорта в г. Тюмени
Fig. 1. General view of the Sports Arena building in Tyumen

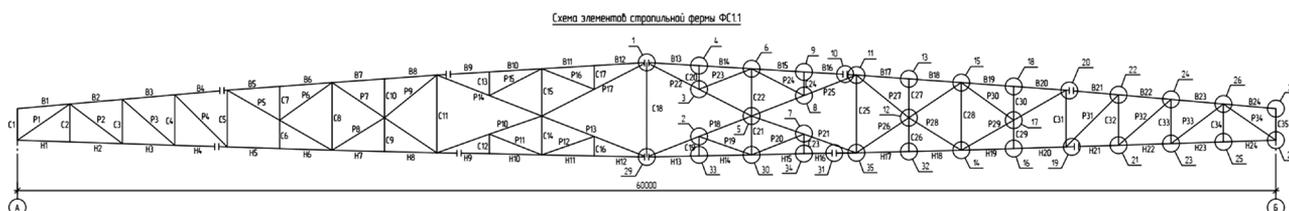


Рис. 2. Конструкция покрытия Дворца спорта
Fig. 2. Covering structure of the Sports Arena

Верхние пояса ферм выполнены из несимметричных алюминиевых двутавров с бульбами по краям верхней полки двутавра, нижние – из алюминиевых тавров (рис. 3). Решетка ферм, горизонтальные и вертикальные связи – также из алюминиевых профилей в виде парных уголков и труб.

Нижняя обшивка пространственных блоков покрытия (потолок помещения ледовой арены) выполнена из алюминиевого листа толщиной 1 мм с предварительной вытяжкой расчетным усилием. Обшивка приклепана к фермам пространственных блоков и участвует в совместной работе блока под нагрузкой.

Верхняя обшивка пространственных блоков выполнена из гладкого алюминиевого листа толщиной 1 мм, играет роль ограждающей конструкции покрытия и является кровлей. Обшивка вытянута до выбора «хлопунов» и приклепана к фермам.

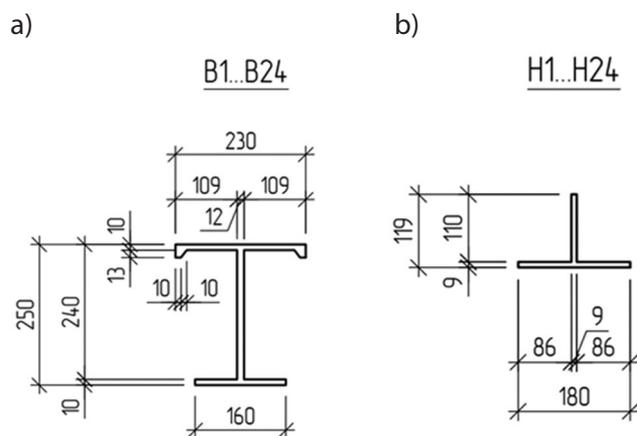


Рис. 3. Сечение верхних (а) и нижних (б) поясов ферм
Fig. 3. Section of the upper (a) and lower (b) chords of the trusses

По нижним листам пространственных блоков в качестве утеплителя были проложены два мата из минеральной ваты размерами 1 500 × 600 × 40 мм каждый (рис. 4). Общая толщина слоя утеплителя составила 80 мм.

Пространственные блоки собирали на земле, укладывали утеплитель и пароизоляцию. Готовые крупноразмерные элементы покрытия



Рис. 4. Утепление в уровне нижних поясов ферм
Fig. 4. Insulation at the level of the lower chords of the trusses

выполняли как несущие, так и ограждающие функции [2].

В ходе проведения обследования технического состояния здания был измерен вес матов в разных частях блока БП-16 и блока БП-12. Вес утеплителя блока по краям здания составил 4.5 кг/м², в центральных частях чердачного пространства – 2.4–3.6 кг/м². Влажность и увеличение веса утеплителя обусловлены недостаточной продуваемостью чердачного пространства, что приводит к образованию наледи и «куржака» на внутренней поверхности верхней обшивки покрытия, последующему выпадению конденсата и накоплению влаги в утеплителе. При этом вес утеплителя увеличен неравномерно: по краям блоков и ближе к центру здания наблюдается большее замачивание утеплителя, в торцах в центральной части утеплитель легче, т. к. эти области являются продуваемыми (работают вытяжные вентиляторы).

Для оценки температурных воздействий и их влияния на покрытие здания от перепадов годовых и суточных температур был выполнен температурный расчет покрытия и сопоставлены деформации покрытия с предельно допустимыми значениями (п. Д.2.4.1 СП 20.13330.2016¹).

Результаты

Согласно проведенному в рамках обследования здания количественному химическому анализу, материал ферм и обшивок покрытия может быть отнесен к алюминиевому сплаву системы алюминий – цинк – магний (Al – Zn – Mg) марки 1915. Расчетное сопротивление алюминия данной марки, в соответствии с п. 6.1 СП 128.13330.2016², составляет 230 МПа, что меньше полученного при испытаниях 305 МПа в 1.3 раза. Это свидетельствует об изменении физико-механических свойств алюминиевого сплава с течением времени [7–19].

Проведем оценку годового перепада температур для расчета температурно-климатических воздействий на несущие конструкции покрытия.

Основным параметром материала, отвечающим за температурные деформации конструкций, является коэффициент линейного расширения, для алюминия он равен $0.23 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ в диапазоне температур от -70 до $+100$ °С (приложение Б СП 128.13330.2016), что в два раза пре-

вышает аналогичный параметр у конструкционной стали.

Определим нормативные значения температур наружного воздуха для теплого t_w и холодного t_c периодов года как для неотапливаемого и незащищенного от воздействия солнечной радиации покрытия здания в соответствии с табл. 13.1 СП 20.13330.2016:

$$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4, \quad t_c = t_{ec} - 0.5 \cdot \theta_1,$$

где t_{ew} , t_{ec} – средние суточные температуры наружного воздуха в теплое и холодное время года, принимаемые в соответствии с п. 13.4 данного СП;

θ_1 – приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от суточных колебаний температуры наружного воздуха, принимаемое по табл. 13.2 СП 20.13330.2016;

θ_4 – приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от солнечной радиации, принимаемое в соответствии с п. 13.5 СП 20.13330.2016.

Средние суточные температуры наружного воздуха в теплое и холодное время года:

$$t_{ec} = t_{min} + 0.5 \cdot A_1, \quad t_{ew} = t_{max} - 0.5 \cdot A_{VII},$$

где t_{min} и t_{max} – нормативные значения минимальной и максимальной температуры воздуха в соответствии с приложением Е СП 131.13330.2020³;

¹ Нагрузки и воздействия = Loads and actions : СП 20.13330.2016 : утвержден приказом Министерства строительства и ЖКХ Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г. / исполнители – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 07.03.2023).

² Алюминиевые конструкции = Aluminium structures : СП 128.13330.2016 : Актуализированная редакция СНиП 2.03.06-85 : утвержден Приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 16 декабря 2016 г. № 948/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г. / исполнители – АО «НИЦ «Строительство» ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, институт ЦНИИПСК им. Мельникова, ЗАО «МЕТАКОН ЦЕНТР». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044319> (дата обращения: 07.03.2023).

³ Строительная климатология = Building climatology : СП 131.13330.2020 : утвержден приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 24 декабря 2020 г. № 859/пр и введен в действие с 25 июня 2021 г. / исполнители – ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСК РААСН) при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 07.03.2023).

A_I, A_{VII} – средние суточные амплитуды температуры воздуха наиболее холодного и наиболее теплого месяца соответственно, принимаемые по табл. 3.1 и 4.1 СП 131.13330.2020.

Нормативные значения минимальной и максимальной температуры воздуха в соответствии с СП 20.13330.2016: $t_{min} = -50$ °C, $t_{max} = +38$ °C.

Средние суточные амплитуды температуры воздуха наиболее холодного и наиболее теплого месяца в соответствии с СП 131.13330.2020: $A_I = 9.2$ °C, $A_{VII} = 11.4$ °C.

Тогда значения средних суточных температур наружного воздуха в теплое и холодное время года равны:

$$t_{ec} = -50 + 0.5 \cdot 9.2 = -45.4 \text{ °C},$$

$$t_{ew} = 38 - 0.5 \cdot 11.4 = 32.3 \text{ °C}.$$

Приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от суточных колебаний температуры наружного воздуха, принимаемое по табл. 13.2 СП 20.13330.2016: $\theta_I = 8$ °C.

Приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от солнечной радиации, принимаемое в соответствии с п. 13.5 СП 20.13330.2016:

$$\theta_4 = 0.05 \cdot \rho \cdot S_{max} \cdot k,$$

где ρ – коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности конструкции, принимаемый по табл. 13.3 СП 20.13330.2016;

S_{max} – максимальное значение суммарной (прямой, рассеянной и отраженной) солнечной радиации, Вт·ч/м, принимаемое для горизонтальных поверхностей по табл. 13.4, а для вертикальных поверхностей различной ориентации – по табл. 13.5 СП 20.13330.2016;

k – коэффициент, принимаемый по табл. 13.6 СП 20.13330.2016.

Для алюминия коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности конструкции $\rho = 0.5$.

Максимальное значение суммарной (прямой, рассеянной и отраженной) солнечной ради-

ации для горизонтальных поверхностей для 57.8° с. ш. (г. Тюмень): $S_{max} = 804.8$ Вт·ч/м.

Коэффициент $k = 0.7$ для металлических конструкций зданий.

Приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от солнечной радиации:

$$\theta_4 = 0.05 \cdot 0.5 \cdot 804.8 \cdot 0.7 = 14.1 \text{ °C}.$$

Нормативные значения температур для теплового t_w и холодного t_c периодов года:

$$t_w = +32.3 + 8 + 14.1 = +54.4 \text{ °C},$$

$$t_c = -45.4 - 0.5 \cdot 8 = -49.4 \text{ °C}.$$

Таким образом, годовой перепад температур составит:

$$\Delta t = t_w + t_c = 54.4 + 49.4 = 103.8 \text{ °C}.$$

Выполним расчет нормативных изменений температур при замыкании конструкции для теплового и холодного периода года.

Нормативные значения изменений температур при замыкании конструкций в теплое Δt_w и холодное Δt_c время года определяются по формулам:

$$\Delta t_w = t_w - t_{ow}, \quad \Delta t_c = t_c - t_{oc},$$

где t_w, t_c – нормативные значения температур для теплового и холодного времени года, приведенные в табл. 13.1 СП 20.13330.2016;

t_{ow}, t_{oc} – начальные температуры (температуры замыкания) в теплое и холодное время года, принимаемые в соответствии с п. 13.6. СП 20.13330.2016.

Начальная температура, соответствующая замыканию конструкции или ее части в законченную систему, в теплое и холодное время года определяется по формулам:

$$t_{ow} = 0.8 \cdot t_{VII} + 0.2 \cdot t_I, \quad t_{oc} = 0.2 \cdot t_{VII} + 0.8 \cdot t_I,$$

где t_I, t_{VII} – многолетние средние месячные температуры воздуха в январе и июле, принимаемые для надземной части сооружений по табл. 5.1 СП 20.13330.2016: $t_I = -16.3$ °C, $t_{VII} = 18.5$ °C.

Начальная температура, соответствующая замыканию конструкции или ее части в законченную систему, в теплое и холодное время года:

$$t_{ow} = 0.8 \cdot 18.5 + 0.2 \cdot (-16.3) = 11.54 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{oc} = 0.2 \cdot 18.5 + 0.8 \cdot (-16.3) = -9.34 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Нормативные значения изменений температур при замыкании конструкций в теплое Δt_w и холодное Δt_c время года:

$$\Delta t_w = 54.4 + 9.34 = +63.7 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_c = -49.4 - 11.54 = -60.9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Выполним расчет нормативных значений температурных воздействий для теплового и холодного периодов года.

Нормативные значения температурных воздействий, обусловленные перепадом температур по сечению элемента, в соответствии с табл. 13.1 СП 20.13330.2016, в теплое время $\vartheta_w = \theta_s$, в холодное $\vartheta_c = 0$.

Приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от солнечной радиации θ_s , принимаемое в соответствии с п. 13.5 СП 20.13330.2016:

$$\begin{aligned} \theta_s &= 0.05 \cdot \rho \cdot S_{max} (1-k) = \\ &= 0.05 \cdot 0.5 \cdot 804.8 (1-0.7) = 6 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Тогда $\vartheta_w = 6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_c = 0$.

Проведем расчет температурных деформаций блока на годовой перепад температур.

Температурные деформации элемента определяются по формуле:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta t,$$

где L – длина элемента, мм,

α – коэффициент линейного расширения, $^\circ\text{C}^{-1}$, при температуре от -70 до $+100$ $^\circ\text{C}$, принимаемый по табл. Б.1 СП 128.13330.2016;

Δt – максимальный годовой перепад температур, $^\circ\text{C}$.

В соответствии с табл. Б.1 СП 128.13330.2016, коэффициент линейного расширения

$$\alpha = 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}.$$

Длина блока $L = 60\,000$ мм. Максимальный годовой перепад температур $\Delta t = 103.8$ $^\circ\text{C}$.

Таким образом, температурные деформации блока в продольном направлении при упрощенном ручном расчете составят:

$$\Delta L = 60\,000 \cdot 2.3 \cdot 10^{-5} \cdot 103.8 = 143.2 \text{ мм}.$$

С целью учета пространственной работы покрытия и для оценки деформированной схемы пространственного блока выполнено численное моделирование температурных воздействий в программном комплексе ING+. Расчеты на температурные воздействия выполнены на максимальный годовой перепад температур 103.8 $^\circ\text{C}$, прикладываемый к верхней обшивке и верхним поясам ферм пространственного блока.

С учетом проектного предварительного напряжения верхней и нижней обшивок максимальное перемещение в середине пролета в вертикальной плоскости составило 45.2 мм, максимальное перемещение в горизонтальной плоскости составило 10.3 мм на опоре в верхней точке опорной стойки и 2.9 мм на опоре в нижней точке опорной стойки (рис. 5).

Учитывая потери предварительного напряжения верхней и нижней обшивок, о чем свидетельствуют «хлопуны» в верхней мембране и перекосы в нижней, максимальное перемещение в середине пролета в вертикальной плоскости составило 138.3 мм, максимальное перемещение в горизонтальной плоскости составило 26 мм на опоре в верхней точке опорной стойки и 14.5 мм на опоре в нижней, что в целом подтверждается наблюдениями службы эксплуатации (рис. 6).

Для оценки граничных значений перемещений конструкции вследствие температурных воздействий определим предельно допустимое удлинение алюминиевого пространственного блока покрытия от годового перепада температур $[\Delta L]$ согласно табл. Д.4 СП 20.13330.2016:

$$[\Delta L] = \frac{h_s}{180} = \frac{11360 \text{ мм}}{180} = 56.8 \text{ мм}.$$

Выводы

Покрытие здания Дворца спорта в г. Тюмени воспринимает циклические температурные воздействия на протяжении всего срока эксплуата-

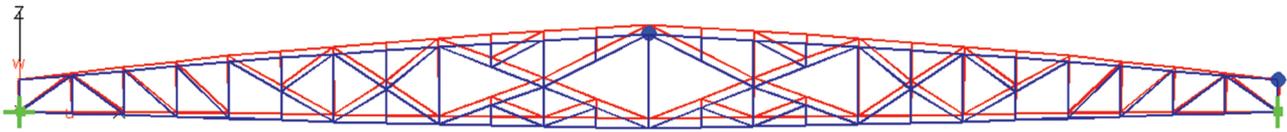


Рис. 5. Деформированная схема пространственного блока покрытия от температурных воздействий с учетом предварительного напряжения обшивок
 Fig. 5. Deformed scheme of the spatial covering block taking into account the prestressing of the sheathing

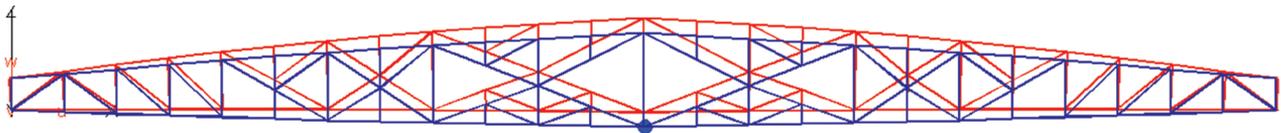


Рис. 6. Деформированная схема пространственного блока покрытия от температурных воздействий без учета предварительного напряжения обшивок
 Fig. 6. Deformed scheme of the spatial covering block without taking into account prestressing of the sheathings

ции, что привело к его значительным температурным деформациям.

1. Расчетные температурные деформации ферм покрытия в направлении пролета конструкции составили 14.5 мм, что значительно меньше предельно допустимой величины 56.8 мм (СП 20.13330.2016).
2. Вследствие особенной формы ферм покрытия, составляющих пространственные блоки, и имеющегося предварительного натяжения верхней и нижней обшивок, продольные деформации верхнего пояса покрытия привели к выгибам конструкции на величину до 138.3 мм. Эти деформации негативно сказываются не только на наружных ограждающих конструкциях, но и на стенах и перегородках третьего этажа здания.

Оценивая в исторической ретроспективе построенные в нашей стране сооружения из большепролетных алюминиевых предварительно напряженных конструкций, следует отметить, что не все заявленные достоинства, такие как хорошая коррозионная стойкость и герметичность кровельных обшивок, подтвердились положительным опытом их эксплуатации:

- малый собственный вес алюминиевых конструкций неразрывно связан с вынужденной пониженной жесткостью материала (в 3 раза), его модулем упругости, что приводит к

большим, чем в стальных конструкциях прогибам и перемещениям;

- совмещение функций несущей конструкции и ограждения приводит к циклическим температурным воздействиям на несущий блок покрытия в течение всего срока эксплуатации, усугубляемым большим по отношению к стали коэффициентом линейного расширения алюминия (в 2 раза);
- расчетные температурные деформации ферм покрытия в направлении пролета в 4 раза меньше предельно допустимой величины, однако при этом возникают выгибы ферм на величину до 140 мм, не учтенные проектной документацией и негативно влияющие на строительные конструкции третьего этажа (стены и перегородки);
- появление контактной (гальванической) коррозии, возникающей между стальными анодированными болтами и алюминиевыми элементами, приводит к разрушению алюминиевых конструкций, т. к. защитное покрытие стальных болтов со временем «съедается»;
- герметичность кровельного покрытия нарушается из-за разрушения стыков между блоками и заклепочными соединениями крепления верхней обшивки к поясам стропильных ферм, а также смещения смежных пространственных блоков относительно друг друга.

Библиографический список

1. Михайлов, Г. Г. Большепролетные алюминиевые конструкции для спортивно-зрелищных сооружений и комплексов / Г. Г. Михайлов. – Текст : электронный // Стройпрофиль. – 2007. – № 5. – URL: <https://stroyprofile.com/archive/2701> (дата обращения: 12. 07.2023).
2. Михайлов, Г. Г. Большепролетные алюминиевые конструкции: история и современность / Г. Г. Михайлов. – Текст : электронный // Стройпрофиль. – 2007. – № 4. – URL: <https://stroyprofile.com/archive/2655> (дата обращения: 12. 07.2023).
3. Зыков, С. А. Сравнительный анализ свойств сварных соединений алюминиево-магниевых сплавов, выполненных неплавящимся и плавящимся электродом / С. А. Зыков, В. И. Павлова, Е. П. Осокин. – Текст : непосредственный // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2014. – № 5. – С. 2.
4. Конюхов, А. Д. Свойства стыковых сварных соединений алюминиевого сплава / А. Д. Конюхов, А. М. Дриц, А. К. Шуртаков. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 3. – С. 33–38.
5. Кунин, Ю. С. Расчет и проектирование фрикционных соединений алюминиевых конструкций. Проблемы и пути решения / Ю. С. Кунин, А. А. Синеев. – DOI 10.54950/26585340_2022_2_72. – Текст : непосредственный // Строительное производство. – 2022. – № 2. – С. 72–76.
6. Кунин, Ю. С. Несущая способность фрикционных соединений алюминиевых конструкций / Ю. С. Кунин, А. А. Синеев. – DOI 10.33622/0869-7019.2020.12.82-85. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 12. – С. 82–85.
7. Высокопрочный алюминиевый сплав с пониженной плотностью для авиастроения / В. И. Елагин, В. В. Захаров, Т. Д. Ростова [и др.]. – Текст : непосредственный // Технология легких сплавов. – 2014. – № 4. – С. 23–31.
8. Вторичное старение применительно к высокопрочным алюминиевым сплавам / В. И. Елагин, Л. Б. Бер, Т. Д. Ростова [и др.]. – Текст : непосредственный // Технология легких сплавов. – 2013. – № 2. – С. 20–28.
9. Развитие идей структурного упрочнения применительно к обшивочным листам из алюминиевых сплавов / В. И. Елагин, В. В. Захаров, Т. Д. Ростова [и др.]. – Текст : непосредственный // Технология легких сплавов. – 2011. – № 3. – С. 18–24.
10. Повышение прочности и пластичности Al-Mg-Mn-сплавов, легированных цирконием и скандием, при равноканальном угловом прессовании / С. В. Добаткин, В. В. Захаров, Ю. Эстрин [и др.]. – Текст : непосредственный // Технология легких сплавов. – 2009. – № 3. – С. 46–59.
11. Швечков, Е. И. Анизотропия механических свойств и характеристик трещиностойкости листов из алюминиевых сплавов / Е. И. Швечков. – Текст : непосредственный // Технология легких сплавов. – 2015. – № 3. – С. 72–84.
12. Механические свойства и характеристики трещиностойкости крупногабаритного профиля из сплава 1163Т / Е. И. Швечков, А. В. Сыров, Г. Д. Лебедев [и др.]. – Текст : непосредственный // Технология легких сплавов. – 2013. – № 3. – С. 51–58.
13. Коргин, А. В. Расчет мостовых конструкций из алюминиевых сплавов на выносливость / А. В. Коргин. – DOI 10.22227/2305-5502.2022.2.3. – Текст : непосредственный // Строительство: наука и образование. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 31–49.
14. Коргин, А. В. Включение ортотропных плит настила в работу несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов / А. В. Коргин, В. А. Ермаков, Л. З. Зейд Килани. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.7.882-896. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 7. – С. 882–896.
15. Деформирования и разрушение элементов конструкций из алюминиевого сплава, обладающих структурной неоднородностью / Д. С. Лобанов, М. П. Третьяков, В. Э. Вильдеман [и др.]. – Текст : непосредственный // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2021. – Т. 2. – С. 107–110.
16. Ищук, Ю. П. Достоинства и недостатки строительных конструкций из алюминиевых сплавов / Ю. П. Ищук, П. В. Погодина, А. Н. Леонова. – Текст : непосредственный // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2020. – № 8. – С. 237–244.
17. Ягнюк, Б. Н. Характеристики алюминиевых сплавов для строительных конструкций в европейских стандартах / Б. Н. Ягнюк. – DOI 10.15393/j2.art.2019.4462. – Текст : непосредственный // Resources and Technology. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 68–79.
18. Bisha, A. Aluminium and glass construction. Energetic planning / A. Bisha, A. Londo. – Текст : непосредственный // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – 2012. – № 6. – С. 12–18.

19. Ведяков, И. И. Алюминиевые сплавы для строительных металлических конструкций (комментарий к СП 128.13330) / И. И. Ведяков, П. Д. Одесский, М. И. Гукова. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 10. – С. 5–8.

References

1. Mikhaylov, G. G. (2007). Bol'sheproletnye alyuminievye konstruksii dlya sportivno-zrelishchnykh sooruzheniy i kompleksov. *Stroyprofil'*, (5). (In Russian). Available at: <https://stroyprofile.com/archive/2701> (accessed 12.07.2023).
2. Mikhaylov, G. G. (2007). Bol'sheproletnye alyuminievye konstruksii: istoriya i sovremennost'. *Stroyprofil'*, (4). (In Russian). Available at: <https://stroyprofile.com/archive/2655> (accessed 12.07.2023).
3. Zikov, S. A., Pavlova, V. I., & Osokin, E. P. (2014). Svravnitel'nyy analiz svoystv svarnykh soedineniy alyuminievo-magnievykh splavov, vypolnennykh neplavyashchimsya i plavyashchimsya elektrodom. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, (5), P. 2. (In Russian).
4. Konyukhov, A. D., Drits, A. M., & Shutrakov, A. K. (2013). Properties of aluminium alloy butt weld connections. *Russian Railway Science Journal*, (3), pp. 33-38. (In Russian).
5. Kunin, Yu. S., & Sineev, A. A. (2022). Calculation and design of friction joints of aluminum structures. *Problems and Solutions. Construction production*, (2), pp. 72-76. (In Russian).
6. Kunin, Ju. S., & Sineev, A. A. (2020). Load-bearing capacity of friction joints of aluminum structures. *Industrial and Civil Engineering*, (12), pp. 82-85. (In Russian).
7. Yelagin, V. I., Zakharov, V. V., Rostova, T. D., Shvechkov, Ye. I., Fisenko, I. A., & Kirillova, L. P. (2014). A high-strength low-density aluminium alloy for the aircraft industry. *Technology of Light Alloys*, (4), pp. 23-31. (In Russian).
8. Yelagin, V. I., Ber, L. B., Rostova, T. D., Shvechkov, Ye. I., & Ukolova, O. G. (2013). Secondary ageing with reference to high-strength aluminium alloys. *Technology of Light Alloys*, (2), pp. 20-28. (In Russian).
9. Yelagin, V. I., Zakharov, V. V., Rostova, T. D., Shvechkov, Ye. I., Fisenko, I. A., & Kirillova, L. P. (2011). Development of structural strengthening ideas in conformity with aluminium alloy skin sheets. *Technology of Light Alloys*, (3), pp. 18-24. (In Russian).
10. Dobatkin, S. V., Zakharov, V. V., Estrin, Yu. Rostova, T. D., Ukolova, O. G., & Chirkova, A. V. (2009). An improvement in strength and ductility of Al-Mg-Mn alloys alloyed with Zr and Sc obtained due to equal channel angular pressing. *Technology of Light Alloys*, (3), pp. 46-59. (In Russian).
11. Shvechkov, Ye. I. (2015). Mechanical and crack resistance anisotropy of aluminium alloy sheets. *Technology of Light Alloys*, (3), pp. 72-84. (In Russian).
12. Shvechkov, Ye. I., Syrov, A. V., Lebedev, G. D., Rostova, T. D., Azanova, Ye. V., & Borovkov, O. V. (2013). Mechanical properties and crack resistance characteristics of large-size 1163T alloy shapes. *Technology of Light Alloys*, (3), pp. 51-58. (In Russian).
13. Korgin, A. V. (2022). The analysis of fatigue resistance of bridge structures made of aluminum alloys. *Construction: Science and Education*, 12(2), pp. 31-49. (In Russian). DOI 10.22227/2305-5502.2022.2.3.
14. Korgin, A. V., Ermakov, V. A., & Zeyd Kilani, L. Z. (2022). Getting orthotropic deck plates involved in the structural performance of the bearing structures of bridges made of aluminum alloys. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 17(7), pp. 882–896. (In Russian). DOI 10.22227/1997-0935.2022.7.882-896.
15. Lobanov, D. S., Tret'yakov, M. P., Vil'deman, V. E., Tret'yakova, T. V., & Karmanov, V. V. (2021). Deformirovaniya i razrushenie elementov konstruksiy iz alyuminievogo splava, obladayushchikh strukturnoy neodnorodnost'yu. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2, pp. 107-110. (In Russian).
16. Ischuk, Y. P., Pogodina, P. V., & Leonova, A. N. (2020). Advantages and disadvantages of building structures made of aluminum alloys. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*, (8), pp. 237-244. (In Russian).
17. Yagnyuk, B. (2019). Aluminium alloys characteristics used for building structures in european standards. *Resources and Technology*, 16(1), pp. 68-79. (In Russian). DOI 10.15393/j2.art.2019.4462.
18. Bisha, A., & Londo, A. (2012). Aluminium and glass construction. *Energetic Planning. Mechanics. Researches and Innovations*, (6), pp. 12-18. (In Russian).
19. Vedyakov, I. I., Odessky, P. D., & Gukova, M. I. (2013). Aluminium alloys for building metal structures (commentaries on SP 128.13330). *Industrial and Civil Engineering*, (10), pp. 5-8. (In Russian).

Сведения об авторах

Малышкин Александр Петрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru

Есипов Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru

Бараняк Андрей Игоревич, главный инженер проекта, ООО «НПК «Сибстрой Инжиниринг», e-mail: andrei.baranyak@yandex.ru

Есипов Михаил Андреевич, бакалавр, Тюменский индустриальный университет, e-mail: yacorl.mail@gmail.com

Information about the authors

Aleksandr P. Malyshkin, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru

Andrei V. Esipov, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru

Andrej I. Baranyak, Chief Project Engineer, LLC "RPC "Sibstroy Engineering", e-mail: andrei.baranyak@yandex.ru

Mikhail A. Esipov, Bachelor, Industrial University of Tyumen, e-mail: yacorl.mail@gmail.com

*Получена 13 сентября 2023 г., одобрена 23 октября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 13 September 2023, Approved 23 October 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

ОТДЕЛЬНОСТОЯЩИЙ ФУНДАМЕНТ СО СТУПЕНЧАТОЙ ПОДОШВОЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В. С. Сафарян

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

FREESTANDING FOUNDATION WITH STEPPED BASE. RESULTS OF A FULL-SCALE EXPERIMENT

Vage S. Safaryan

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Несмотря на значительное число существующих решений, вопрос оптимизации геометрии отдельностоящих фундаментов мелкого заложения остается актуальным и недостаточно изученным. Объектом настоящего исследования являются фундаменты со ступенчатой подошвой, для подтверждения эффективности которых были проведены три различных эксперимента: цифровое моделирование, лабораторные испытания, натурный эксперимент. В первую очередь основания сравнивались по показателю абсолютной осадки, в каждом из экспериментов фундамент со ступенчатой подошвой продемонстрировал себя более эффективным по сравнению с аналогом с плоской подошвой (приблизительно на 30 %). В ходе проведения натурного эксперимента при итоговом давлении под подошвой фундамента 18 т/м² осадка фундамента с плоской подошвой составила 70.67 мм, в то время как фундамент со ступенчатой подошвой сел на 49.32 мм. Натурный эксперимент подтвердил результаты предыдущих опытов, фундамент со ступенчатой подошвой продемонстрировал осадку существенно меньше, чем аналог с плоской подошвой. В будущих исследованиях планируется

Abstract. Despite the large number of existing solutions, the issue of optimizing the structure of freestanding shallow foundations is still relevant because of poorly studying. The object of the study is foundations with stepped base. To confirm the efficiency of these foundations, we conducted three different experiments: digital modelling, laboratory tests and full-scale experiment. First, the foundations were compared in terms of absolute settlement. In each of the experiments, the foundation with a stepped base was more efficient than its flat-base analogue (by about 30 %). During the full-scale experiment, at a final pressure under the foundation base of 18 t/m², the foundation with flat base settled by 70.67 mm, while the foundation with stepped base settled by 49.32 mm. The experiment confirmed the results of the previous experiments: the foundation with a stepped base showed a substantially smaller settlement than the flat base analogue. In future studies, we plan to investigate the operation of strip foundations with stepped base in more detail, to determine the internal forces appearing in the body of the foundations, and to define the need of reinforcement for foundations with stepped base.

более подробно изучить работу ленточных фундаментов со ступенчатой подошвой, определить внутренние усилия, появляющиеся в теле фундаментов, а также необходимость в армировании фундаментов со ступенчатой подошвой.

Ключевые слова: фундамент мелкого заложения, столбчатый фундамент, отдельностоящий фундамент, ленточный фундамент, эффективный фундамент, ступенчатая подошва, неплоская подошва, механика грунтов, осадки фундаментов

Key words: shallow foundation, columnar foundation, freestanding foundation, strip foundation, efficient foundation, stepped base, non-flat base, soil mechanics, settlement of foundation

Для цитирования: Сафарян, В. С. Отдельностоящий фундамент со ступенчатой подошвой: результаты натурального эксперимента / В. С. Сафарян. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-17-25. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 17–25.

For citation: Safaryan, V. S. (2023). Freestanding foundation with stepped base. Results of a full-scale experiment. *Architecture, Construction, Transport*, (4(106)), pp. 17-25. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-17-25.

Введение

Важной частью любого здания или сооружения является фундамент. Стоимость устройства несущих конструкций нулевого цикла при неглубоком заложении может составлять до 10 % стоимости строительства.

Самыми распространенными фундаментами мелкого заложения являются ленточные и столбчатые. Эти фундаменты являются безальтернативными для одноэтажных промышленных или сельскохозяйственных зданий, они также широко используются в частной застройке и при строительстве малоэтажных зданий жилого, общественного и административного назначения [1–3].

Исследования вариантов конфигураций фундаментов неглубокого заложения направлены на изучение зависимости геометрии подошвы и напряженно-деформированного состояния грунтового основания, несущей способности фундамента. Использование более эффективных конструкций или технологий устройства таких фундаментов может принести существенный экономический эффект для отрасли, выражаемый в снижении трудоемкости и материалоемкости при строительстве нулевого цикла.

Исследователи предлагают различные методы оптимизации устройства фундаментов неглубокого заложения [4]. Например, Н. М. Бородачевым решена задача по уменьшению концентрации реактивных давлений [5]. Ученым предложено интегральное уравнение, при частном решении которого одной из наиболее оптимальных форм подошвы является окружность с некоторым радиусом, величина которого зависит от геологических условий.

Еще одно решение по устройству фундаментов мелкого заложения с неплоской формой опирания на грунт предложено Я. А. Пронозиним, он рекомендует использовать подошвы фундамента в виде оболочки [6, 7]. По сравнению со стандартными решениями фундаменты-оболочки обладают большим набором преимуществ (таких как уменьшение глубины сжимаемой толщи, увеличение несущей способности, уменьшение осадки и др.). Такие фундаменты были реализованы при строительстве ряда многоэтажных объектов в Тюменской области. Однако их использование в малоэтажном строительстве нецелесообразно, так как технология изготовления криволинейной поверхности фундаментов достаточно сложная, что может привести к завышению стоимости

фундаментов зданий, основания которых не воспринимают большие нагрузки.

Конфигурации эффективных фундаментов неглубокого заложения с плоской подошвой были рассмотрены также А. В. Глушковым [8]. В его исследованиях особо подчеркнута роль «арочного эффекта», при котором крестообразное или лучевое строение плоской подошвы включает в работу дополнительный объем грунта за пределами проекции фундамента. Это позволяет существенно снизить материалоемкость без потери несущей способности фундамента.

Криволинейную подошву фундаментов неглубокого заложения также изучают и за рубежом. Так, в [9] авторы исследуют несущую способность фундаментов мелкого заложения со ступенчатой подошвой на склонах, сложенных прочными грунтами, а в [10] изучают поведение неглубоких сферических оболочек.

Однако, несмотря на значительное число предлагаемых методов оптимизации и готовых решений, упрощение технологии изготовления, уменьшение материалоемкости и трудоемкости при устройстве фундаментов мелкого заложения, не воспринимающих большие нагрузки и устраиваемых в слабых дисперсных грунтах, является актуальной задачей.

В этой статье предлагается более эффективная конструкция для фундаментов мелкого заложения с неплоской подошвой – ступенями вниз (рис. 1). Основанием для данного решения могут служить следующие тезисы [11–14]:

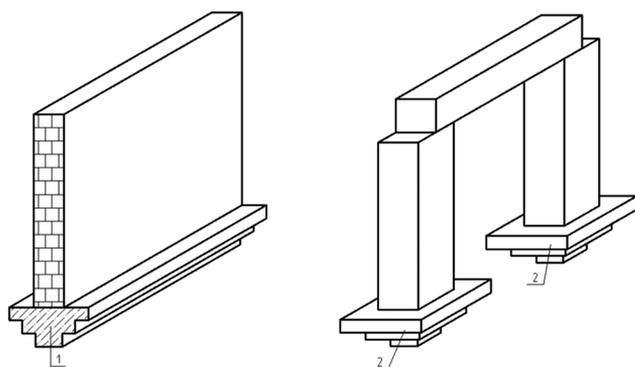


Рис. 1. Фундаменты со ступенчатой подошвой:
1) ленточный, 2) столбчатый
Fig. 1. Foundations with stepped base:
1) strip foundations, 2) columnar foundations

- ступенчатая подошва может быть вписана в оптимальную [4] форму подошвы, что приведет к более равномерному распределению напряжений в основании;
- консольные участки тела фундамента (ступени) находятся сверху, при передаче нагрузки на грунтовое основание часть напряжений создает дополнительное обжимающее усилие, тем самым повышая трение по боковой поверхности (рис. 2). В то же время фундамент с классической геометрией расширяется книзу, и помимо полезной нагрузки нижние ступени воспринимают вес вышележащего грунта;
- у фундамента со ступенчатой подошвой больше угловых точек, из которых идет развитие зон пластических деформаций грунта, благодаря чему значение второго критического давления при прочих равных у данных фундаментов выше;
- площадь соприкосновения фундамента предлагаемой конструкции и грунтов существенно больше по сравнению с фундаментами с плоской подошвой, что также может привести к увеличению ее несущей способности.

Важным преимуществом измененных фундаментов является уменьшение объемов земляных работ при их устройстве. В связных грунтах с соответствующим показателем текучести данные фундаменты могут устраиваться безопасным способом в собственном котловане, что существенно уменьшает трудоемкость по

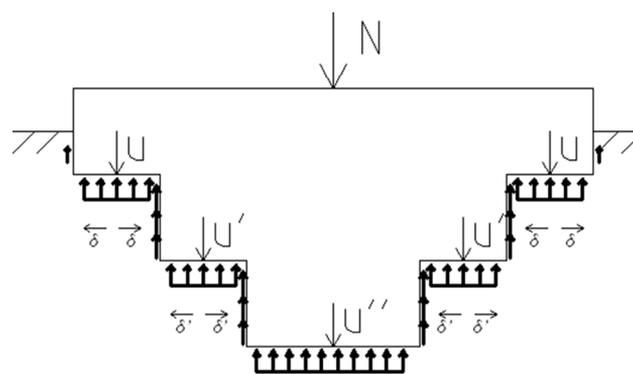


Рис. 2. Возникновение трения по боковой поверхности в ступенчатой подошве
Fig. 2. Occurrence of lateral surface friction in a stepped base

их устройству. В несвязных же грунтах эффект уменьшения объемов земляных работ достигается за счет клинообразной формы фундамента (рис. 3).



Рис. 3. Визуализация котлованов с одинаковыми параметрами (углом откосов, материалоемкостью и технологическими отступами от краев конструкций) для фундаментов ступенями вверх и вниз
 Fig. 3. Visualisation of foundation pit with the same parameters (angle of dip, consumption of materials and technological offsets from the edges of structures) for foundations with up and down steps

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются фундаменты со ступенчатой подошвой. В программном комплексе Plaxis 3D было проведено цифровое сравнительное моделирование фундаментов с плоской и ступенчатой подошвой. Использовались две модели грунта: Мора – Кулона и линейно-упругая. Основным критерием сравнения была величина осадки фундамента. По результатам моделирования фундаменты со ступенчатой подошвой в зависимости от геологических условий, способа моделирования грунта и собственной геометрии продемонстрировали меньшую

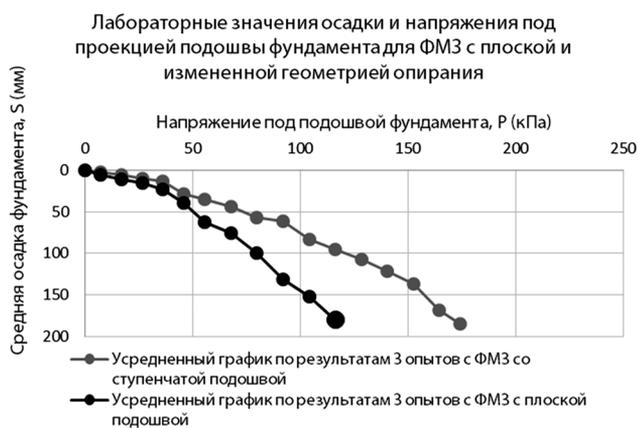


Рис. 4. Результаты лабораторного эксперимента
 Fig. 4. Results of the laboratory experiment

осадку (от 6 до 28 %) по сравнению с фундаментами с плоской подошвой.

Руководствуясь данными цифрового моделирования фундаментов [15], была поставлена задача подтвердить эффективность конструкции фундаментов мелкого заложения со ступенчатой подошвой в ходе лабораторных испытаний.

На базе экспериментальной лаборатории Тюменского индустриального университета были проведены сравнительные испытания моделей фундаментов с плоской и ступенчатой подошвой при работе в условиях слабых водонасыщенных глинистых грунтов, результаты опытов представлены на графике (рис. 4).



Рис. 5. Геология участка
 Fig. 5. Geology of the site

Эксперимент наглядно показал, что фундаменты со ступенчатой подошвой в аналогичных грунтовых условиях демонстрируют осадку приблизительно на 30 % меньше, чем фундаменты с плоской подошвой. Также было установлено, что по сравнению с аналогом с неизменной подошвой фундамент с измененной подошвой более устойчив к случайным эксцентриситетам и внецентренному нагружению [16–17].

Экспериментальная часть и результаты

Следующим этапом исследований было проведение натурных испытаний фундаментов с неплоской подошвой. Площадка для испытаний выбиралась исходя из геологических условий. Поскольку прочные грунты не требуют дополнительных мероприятий по увеличению их несущей способности, нашей целью было испытать модели фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах. Испытания проводились на территории поселка Березняковского рядом с Тюменской кольцевой

автодорогой. Геологические условия участка соответствовали поставленной задаче (рис. 5)

Испытания грунтов фундаментами с разной геометрией подошвы проводились согласно ГОСТ 20276.1-2020¹. Заранее были изготовлены две модели фундаментов – с плоской и ступенчатой подошвой, их геометрические размеры были приближены к размерам реально используемых конструкций. Также важными условиями были простота изготовления и удобство проведения дальнейших расчетов (рис. 6).

Перед началом эксперимента для удаления толстого слоя насыпного грунта был выкопан котлован. Глубина погружения фундамента со ступенчатой подошвой относительно верха котлована составляла 600 мм, фундамент с плоской подошвой был погружен на 400 мм. Разница в глубине погружения обуславливалась тем, что изначально стояла цель сравнить фундаменты с одинаковой материалоемкостью в грунте. Планировалось погрузить плоский фундамент до отметки середины ступен-

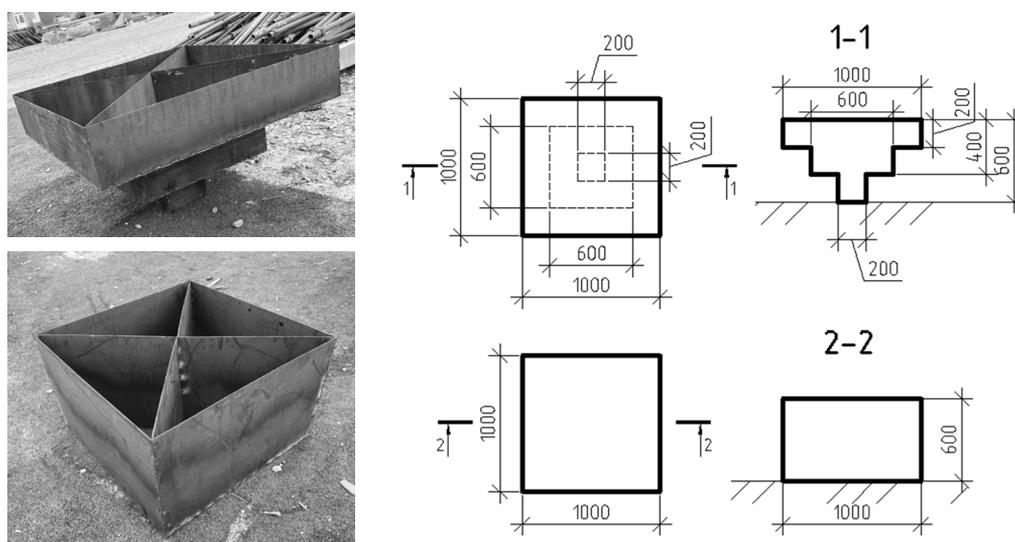


Рис. 6. Модели фундаментов
Fig. 6. Models of foundation

¹ ГОСТ 20276.1-2020. Грунты. Метод испытания штампом = Soils. Plate bearing test methods : межгосударственный стандарт : взамен ГОСТ 20276-2012 в части метода испытания штампом : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 августа 2020 г. № 480-ст в качестве национального стандарта РФ с 1 января 2021 г. / разработан НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, АО «НИЦ «Строительство» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174754> (дата обращения: 12.08.2023).

чатого – 0.3 м, но для удобства расчетов и дальнейшей математической обработки результатов глубина погружения была изменена и соответствовала отметке низа второй ступени. Таким образом, плоский фундамент в грунте занял пространство 0.4 м³, ступенчатый – 0.28 м³. Нагрузки прикладывались ступенчато с шагом 1 000 кг. Передача нагружения осуществлялась посредством специальных крестовин и гидравлических домкратов. Сравнивались показатели осадок фундаментов, данные снимали с помощью датчиков перемещения часового типа и специально смонтированных реперных систем со «столиками» (рис. 7).

Показания приборов снимали регулярно до достижения стабилизации грунтов. Условием стабилизации была принята осадка не более 0.1 мм за 2 часа. Новая ступень прикладывалась только после достижения стабилизации.

Эксперимент начался в августе и продлился 30 дней. Итоговая нагрузка для обоих фундаментов составила 18 000 кг. Модели вели себя во многом согласно ожиданиям. Итоговая осадка фундамента с плоской подошвой составила 70.67 мм, а фундамента со ступенчатой подошвой – 49.32 мм. Результаты эксперимента приведены на итоговом графике (рис. 8).



Рис. 7. Смонтированные установки для проведения эксперимента
Fig. 7. Mounted installations for the experiment

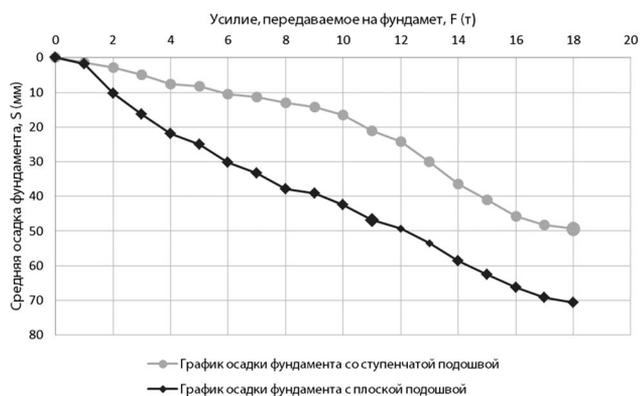


Рис. 8. Результаты натурного эксперимента
Fig. 8. Results of the full-scale experiment

Выводы

В ходе проведения эксперимента было достигнуто давление 18 т/м² под подошвой фундаментов (для ступенчатого фундамента – под проекцией подошвы). Такое давление характерно для реальных фундаментов мелкого заложения, устроенных в дисперсных грунтах, в связи с чем мы считаем, что проведенный эксперимент максимально приближен к реальным условиям работы конструкций.

Фундамент с плоской подошвой на последней ступени испытаний сел на величину – 70.67 мм; фундамент со ступенчатой подошвой продемонстрировал осадку – 49.32 мм. Так, при прочих равных условиях фундамент со ступенчатой подошвой продемонстрировал осадку на 30.2 % меньше стандартного фундамента. Натурный эксперимент подтвердил результаты лабораторных опытов и доказал существенно большую эффективность исследуемых фундаментов в слабых дисперсных грунтах по сравнению с распространенными стандартными конструкциями.

Фундаменты неглубокого заложения с модифицированной подошвой имеют большой прикладной потенциал. Их изучение и дальнейшее внедрение позволит принести существенную экономическую выгоду, выраженную в снижении трудоемкости и материалоемкости строительства, а также повысит надежность и долговечность вновь возводимых зданий.

Несмотря на то, что в ходе проведения экспериментов удалось получить результаты, подтверждающие эффективность работы фун-

даментов со ступенчатой подошвой, считаем необходимым в дальнейших исследованиях изучить также работу ленточных фундаментов со ступенчатой подошвой, влияние формы подошвы на распределение напряжений в грунтовом массиве, разработать методику расчета фундаментов со ступенчатой геометрией подошвы.

Благодарности

Автор выражает благодарность коллективу АО «Тюменьтел» и лично генеральному директору А. А. Овеяну за предоставление участка для эксперимента и всестороннюю поддержку при его проведении; коллективу ООО «Сибиком» и лично директору С. В. Котовичу за оказание помощи в организации и проведении натурных испытаний, а также заведующему кафедрой строительных конструкций Тюменского индустриального университета В. Ф. Баю за ценные советы и помощь в планировании исследования.

Также важными вопросами являются: определение внутренних усилий, возникающих в фундаментах со ступенчатой подошвой, определение необходимости армирования таких фундаментов, более глубокая оценка влияния формы подошвы на несущую способность фундаментов при внецентренном загрузении [18].

Acknowledgements

The author would like to express his gratitude to the staff of JSC "Tyumenitel" and personally to A. A. Oveyan, General Director, for providing the site for the experiment and comprehensive support during its implementation; to the staff of LLC "Sibicom" and personally to S. V. Kotovich, Director, for assistance in organising and conducting full-scale tests; and to V. F. Bai, Head of the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, for valuable advices and assistance in planning the study.

Библиографический список

1. Алексеев, С. И. Механика грунтов. Основания и фундаменты / С. И. Алексеев. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2019. – 180 с. – ISBN 978-5-4323-0339-4.
2. Беспалова, М. В. Механика грунтов в задачах и примерах / М. В. Беспалова ; Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2021. – 63 с. – ISBN 978-985-6550-98-3.
3. Механика грунтов, основания и фундаменты / сост. П. А. Кравченко, В. Н. Парамонов, О. С. Кувалдина. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. – 36 с.
4. Бай В. Ф. Повышение эффективности фундаментов мелкозаложенного / В. Ф. Бай, В. С. Сафарян. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-1-65-72. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 1 (99). – С. 65–72.
5. Бородачев, Н. М. Об управлении распределением реактивных давлений под подошвой фундамента / Н. М. Бородачев. – Текст : непосредственный // Сопротивление материалов и теория сооружений : республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Вып. 18. – Киев: Будівельник, 1972. – С. 8–11.
6. Пронозин, Я. А. Взаимодействие ленточно-оболочечных фундаментов с сильносжимаемым грунтовым основанием : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пронозин Яков Александрович, 2016. – 368 с. – Текст : непосредственный.
7. Патент № 2393297 С1 Российская Федерация, МПК E02D 27/01. фундамент : № 2009116522/03 : заявл. 29.04.2009 : опубл. 27.06.2010 / Я. А. Пронозин, О. С. Порошин, Р. В. Мельников ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет».
8. Глушков, А. В. Влияние формы и размеров подошвы фундаментов на напряженно-деформированное состояние основания : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Глушков Алексей Вячеславович. – Тюмень, 2016. – 22 с.

9. Maeda, Yo. Bearing capacity of shallow foundation with stepped footing on slopes / Yo. Maeda, H. Ochiai. – Текст : непосредственный // Memory of the Faculty of Engineering, Kyushu University. – 1992. – Vol. 52. – No. 2. – P. 201–232. – URL: <https://www7.civil.kyushu-u.ac.jp/geotech/cd/data/106.pdf>.
10. Hong, T. Axisymmetric shells and plates on tensionless elastic foundations / T. Hong, J. G. Teng, Y. F. Luo. – DOI 10.1016/s0020-7683(98)00228-5. – Текст : электронный // International Journal of Solids and Structures. – 1999. – Vol. 36. – No. 34. – P. 5277-5300. – URL: <https://ru.zlib-articles.se/book/4163288/ce92e0> (date of the application: 15.08.2023).
11. Das, B. M. Principles of geotechnical engineering / B. M. Das, Kh. Sobhan. – Australia, Brazil, Japan, Korea, Mexico, Singapore, Spain, United Kingdom, United States : Cengage Learning. – 2012. – 756 p. – Текст : непосредственный. – URL: <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583609876-principles-of-geotechnical-engineering-8th-das.pdf>.
12. Грицук, М. С. Рациональные конструкции плит для ленточных фундаментов : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / М. С. Грицук. – Брест, 1998. – 283 с. – Текст : непосредственный.
13. Архипов, Д. Н. Взаимодействие грунтового основания и сборных ленточных фундаментов с геометрически изменяемой формой подошвы : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Архипов Дмитрий Николаевич. – Волгоград, 2006. – 24 с. – Текст : непосредственный.
14. Кятов, Н. Х. Проектирование оснований и фундаментов / Н. Х. Кятов, Р. Н. Кятов. – Москва : Издательство «Юрайт», 2023. – 327 с. – Текст : непосредственный.
15. Мартюшева, А. И. Моделирование деформаций основания под штампами с различной формой подошвы / А. И. Мартюшева. – Текст : непосредственный // Нефть и газ Западной Сибири : материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 02–03 ноября 2017 года. – Том 1. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 154–157.
16. Тетиор, А. П. Об устойчивости основания под фундаментами с криволинейной формой подошвы / А. П. Тетиор. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1969. – № 5. – С. 14.
17. Рыбин, В. С. Определение оптимальной формы и размеров подошвы внецентренно нагруженных фундаментов мелко заложения / В. С. Рыбин, Л. В. Рыбина. – Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2012. – № 1. – С. 6–9.
18. Игнатюк, В. Ю. Теоретические и экспериментальные исследования работы фундаментных плит с криволинейной поверхностью опирания : специальность 01.02.03 «Строительная механика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Игнатюк Виктор Юлианович. – Москва, 1981. – 177 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Alekseev, S. I. (2019). *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenti*. Moscow, Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov Publ., 180 p. (In Russian).
2. Bepalova, M. V. (2021). *Mekhanika gruntov v zadachakh i primerakh*. Gomel, Belarusian State University of Transport Publ., 63 p. (In Russian).
3. Kravchenko, P. A., Paramonov, V. N., & Kuvaldina, O. S. (2017). *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti*. Saint-Petersburg : Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 36 p. (In Russian).
4. Baj, V. F., & Safaryan, V. S. (2022). Improving the efficiency of shallow foundations. *Architecture, Construction, Transport*, (1), pp. 65-72. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2022-1-65-72.
5. Borodachev, N. M. (1972). *Ob upravlenii raspredeleniem reaktivnykh davleniy pod podoshvoy fundamenta. Soprotivlenie materialov i teoriya sooruzheniy: respublikanskiy mezhvedomstvennyy nauchno-tekhnicheskii sbornik*. Kyiv, Budivel'nik Publ., (18), pp. 8-11. (In Russian).
6. Pronozin, Ya. A. (2016). *Vzaimodeystvie lentochno-obolocheknykh fundamentov s sil'noszhimaemym gruntovym osnovaniem*. Diss. dokt. tekhn. Nauk. Moscow, 368 p. (In Russian).
7. Pronozin, Ja. A., Poroshin, O. S., & Mel'nikov, R. V. *Foundation. Patent na izobretenie 2393297 C1 RU, MPK E02D 27/01. No 2009116522/03. Applied: 29.04.2009. Published: 27.06.2010*. (In Russian).
8. Glushkov, A. V. (2016). *Vliyanie formy i razmerov podoshvy fundamentov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie osnovaniya. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk*. Tyumen, 22 p. (In Russian).

9. Maeda, Yo., & Ochiai, H. (1992). Bearing capacity of shallow foundation with stepped footing on slopes. Memory of the Faculty of Engineering, 52(2), pp. 201-232. (In English). Available at: <https://www7.civil.kyushu-u.ac.jp/geotech/cd/data/106.pdf>.
10. Hong, T., Teng, J. G., & Luo, Y. F. (1999). Axisymmetric shells and plates on tensionless elastic foundations. International Journal of Solids and Structures, 36(34), pp. 5277-5300. (In English). Available at: <https://ru.zlib-articles.se/book/4163288/ce92e0>. DOI 10.1016/s0020-7683(98)00228-5 (accessed 15.08.2023).
11. Das, B. M., & Sobhan, Kh. (2012). Principles of geotechnical engineering. Australia, Brazil, Japan, Korea, Mexico, Singapore, Spain, United Kingdom, United States, Publ. Cengage Learning, 756 p. (In English). Available at: <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583609876-principles-of-geotechnical-engineering-8th-das.pdf>.
12. Gritsuk, M. S. (1998). Ratsional'nye konstruksii plit dlya lentochnykh fundamentov. Diss. dokt. tekhn. nauk. Brest, 283 p. (In Russian).
13. Arkhipov, D. N. (2006). Vzaimodeystvie gruntovogo osnovaniya i sbornykh lentochnykh fundamentov s geometricheski izmenyaemoy formoy podoshvy. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Volgograd, 24 p. (In Russian).
14. Kyatov, N. Kh., & Kyatov, R. N. (2023). Proektirovanie osnovaniy i fundamentov. Moscow, «Yurayt» Publ, 327 p. (In Russian).
15. Martyusheva, A. I. (2017). Modelirovanie deformatsiy osnovaniya pod shtampami s razlichnoy formoy podoshvy. Neft' i gaz Zapadnoy Sibiri: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, November, 02-03. Tyumen, Industrial University of Tyumen, pp. 154-157. (In Russian).
16. Tetior, A. P. (1969). Ob ustoychivosti osnovaniya pod fundamentami s krivolineynoy formoy podoshvy. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura, (5), P. 14. (In Russian).
17. Rybin, V. S., & Rybina, L. V. (2012). Opredelenie optimal'noy formy i razmerov podoshvy vnetsentrenno nagruzhennykh fundamentov melkogo zalozheniya. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov, (1), pp. 6-9. (In Russian).
18. Ignatyuk, V. Yu. (1981). Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya raboty fundamentnykh plit s krivolineynoy poverkhnost'yu opiraniya. Diss. kand. tekhn. nauk. Moscow, 177 p. (In Russian).

Сведения об авторе

Сафарян Варе Суменович, аспирант кафедры строительного производства, ассистент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет; главный инженер проекта, ООО «Строитель», e-mail: safaryanv@yandex.ru

Information about the author

Vage S. Safaryan, Postgraduate at the Department of Construction Production, Assistant at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen; Chief Project Engineer, LLC "Stroitel", e-mail: safaryanv@yandex.ru

*Получена 15 октября 2023 г., одобрена 10 ноября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 15 October 2023, Approved 10 November 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОУПРУГИХ ГРУНТОВ

А. Е. Гладков, Т. В. Мальцева, Н. П. Исакова
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

METHOD FOR DETERMINING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF VISCOELASTIC SOILS

Artem E. Gladkov, Tatyana V. Maltseva, Natalya P. Isakova
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Экспериментальные исследования процессов в грунтовом основании под нагрузкой показывают, что грунты проявляют вязкоупругие свойства. Представлена методика определения механических характеристик вязкоупругого грунта. Из экспериментальных данных испытания образца на ползучесть получена функция ползучести грунта. Далее численно-аналитическим методом ломаных определена функция релаксации грунта. Представление функции ползучести в виде ломаной линии позволило получить функцию релаксации (обратную функцию к функции ползучести в изображениях по Лапласу – Карсону) как решение задачи вязкоупругости. На основании известного изображения искомого оригинала функции релаксации в виде ломаной линии осуществлен переход от изображения к оригиналу по методу ломаных, который сведен к системе линейных алгебраических уравнений относительно искомым параметров функции релаксации. Для определения функции релаксации по данной методике нет необходимости ставить эксперимент с образцом грунта на релаксацию, что позволяет экономить на проведении лабораторного эксперимента. Предложенный алгоритм представляет интерес при проектировании объектов строительства на слабых грунтовых основаниях с учетом вязкоупругих свойств грунта.

Abstract. Experimental studies of processes in soil foundations under load show that soils exhibit viscoelastic properties. The article presents the method for determining the mechanical characteristics of viscoelastic soil. One of the functions, for example, the soil creep function, is obtained from the experimental data of testing a sample for creep. Next, the soil relaxation function was determined using the numerical-analytical method of broken lines. The representation of the creep function in the form of a broken line made it possible to obtain the relaxation function (the inverse function to the creep function in Laplace – Carson images) as a solution of the viscoelasticity problem. Based on the known image of the desired original of the relaxation function in the form of a broken line, a transition from the image to the original was made using the broken line method, which is reduced to a system of linear algebraic equations regarding the desired parameters of the relaxation function. To determine the relaxation function using the proposed method, there is no need to experiment with a soil sample for relaxation. This saves on laboratory experiments. The proposed algorithm is of interest when designing construction projects on weak soil foundations, taking into account the viscoelastic properties of the soil.

Ключевые слова: вязкоупругие свойства грунта, грунтовое основание, функции ползучести и релаксации, метод ломаных

Key words: viscoelastic properties of soil, soil foundation, creep and relaxation functions, broken line method

Для цитирования: Гладков, А. Е. Методика определения механических характеристик вязкоупругих грунтов / А. Е. Гладков, Т. В. Мальцева, Н. П. Исакова. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-26-33. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 26–33.

For citation: Gladkov, A. E., Maltseva, T. V., & Isakova, N. P. (2023). Method for determining the mechanical characteristics of viscoelastic soils. *Architecture, Construction, Transport*, (4(106)), pp. 26-33. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-26-33.

Введение

Грунты – сложная многокомпонентная среда, в условиях внешних нагрузок в них могут развиваться сложные механические процессы, связанные с развитием напряжений и деформаций во времени. При расчете напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований необходимо учитывать их вязкоупругие свойства. Одним из проявлений вязкоупругости грунта является его ползучесть [1], то есть изменение осадки основания во времени при постоянной нагрузке. Слабые грунты (например, глины, суглинки) в [2] предложено рассматривать как вязкоупругий или вязкопластичный материал. Для прогнозирования напряженно-деформированного состояния грунта во времени разработаны вязкоупругопластические модели грунта, учитывающие одновременно с консолидацией изменение формы [3]. Модель включает линейную зависимость между скоростью деформаций сдвига и напряжениями. Грунт рассматривается как деформируемое твердое тело. В работе [4] предложена трехпараметрическая вязкоупругая модель грунта. Задача вязкоупругости преобразована в задачу упругости с помощью преобразования Лапласа. В этой модели ядро ползучести представлено экспоненциальной функцией, которое, во-первых, имеет ограниченное количество параметров в отличие от ломаной линии, предложенной для функции ползучести, во-вторых, экспоненциальная функция с тремя параметрами не имеет аналитической записи изображения по Лапласу – Карсону для методики, предложенной

в данной статье. Для моделирования вязкоупругих свойств грунта в [5] рассмотрена обобщенная модель Фойгта на основе теории дробного исчисления. В работах [6, 7] дифференциальные зависимости деформаций от напряжений не используются, а рассмотрена интегральная форма уравнения зависимости деформаций от напряжений и рассмотрены экспериментальные исследования на ползучесть слабого грунта.

На основании обзора математических моделей вязкоупругих грунтовых оснований для зависимости между напряжением и деформацией использована интегральная форма Больцмана – Вольтерры, в которую механические характеристики входят как функции времени. Параметры математической модели (механические характеристики грунта) определены из эксперимента на трехосное сжатие образца из глины. Физический закон связи напряжений и деформаций в виде интеграла Больцмана приведен к свертке двух функций в изображениях по Лапласу – Карсону. Из совпадения выражений для законов Гука и Больцмана в изображении по Лапласу – Карсону с точностью до обозначений решение вязкоупругой задачи получено в два этапа согласно подходу А. А. Ильюшина и П. М. Огибалова, предложенному для расчета конструкций. На первом этапе выполняется расчет упругого основания без учета времени. Полученное решение на основе принципа Вольтерры (системы переобозначений) записывается в изображениях по Лапласу – Карсону. На втором этапе для фиксированной точки пространства делается приближенный переход от известного

изображения к оригиналу по методу ломаных Л. Е. Мальцева. Представление решения вязкоупругой задачи в два этапа является новым в математическом моделировании вязкоупругих грунтов.

Вязкоупругие свойства грунта в математических моделях учитываются через функции влияния, то есть функции ползучести $P(t)$ (изменение деформации при постоянном напряжении) или функции релаксации $R(t)$ (изменение напряжения при постоянной деформации), которые являются ключевыми параметрами выбранной модели грунта и остаются неизменными при разных видах нагрузки.

Механические характеристики материала (функции влияния) определяются на основании экспериментальных данных. Экспериментальные исследования вязкоупругих свойств грунта отражены в [8, 9]. В данной работе с помощью экспериментальных данных определяется функция ползучести грунта, а функция релаксации находится численно-аналитическим методом. Для определения функции релаксации по предложенной в работе методике нет необходимости ставить эксперимент на релаксацию образца, взятого из грунта.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является вязкоупругий грунт. Предметом исследования – получение механических характеристик вязкоупругого грунта, то есть функций ползучести и релаксации грунта.

В статье использованы два метода исследования: экспериментальный и теоретический.

Экспериментальная часть

Для определения вязкоупругих характеристик глинистого грунта использован прибор для трехосного сжатия образца грунта. Лаборатор-

ный эксперимент с образцом суглинка был выполнен Р. С. Гулятьевым (магистрантом базовой кафедры ООО «Мостострой-11»). Грунт был выбран 12.07.2023 г. на глубине 2 м на участке в коттеджном поселке «Родные просторы» Тюменской области.

Физико-механические характеристики образца: влажность W – 32 %; число пластичности I_p – 0.22; плотность ρ – 1.43 г/см³; коэффициент пористости e – 0.22.

Эксперимент проведен в соответствии с ГОСТ 12248.3-2020¹. Испытание проходило по консолидированно-дренированной схеме в камере стабилометра (рис. 1).

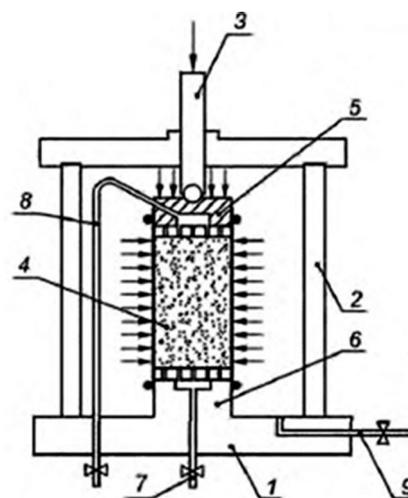


Рис. 1. Схема испытания грунта методом трехосного сжатия: 1 – основание камеры; 2 – корпус камеры; 3 – шток; 4 – образец грунта в оболочке; 5 – верхний штамп; 6 – нижний штамп; 7, 8 – магистрали системы дренажа, измерения порового давления и противодействия; 9 – магистраль давления в камере
Fig. 1. Scheme of soil testing by triaxial compression method: 1 – chamber base; 2 – chamber body; 3 – rod; 4 – soil sample in the shell; 5 – upper die block; 6 – lower die block; 7, 8 – lines of drainage system, pore pressure and counterpressure measurement; 9 – pressure line in the chamber

¹ ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия = Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing : межгосударственный стандарт ; введен 2021-06-01 / разработан НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство» при участии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, ООО «НПП «Геотек», АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ-ПГ», ООО «Петромоделинг». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/566409062> (дата обращения: 20.10.2023).

Испытывался образец в форме цилиндра, диаметр которого 38 мм, а высота 76 мм. Боковое давление (давление в камере) в камере составляло 100 кПа. Вертикальная нагрузка прикладывалась ступенями по 20 % от бокового давления в камере, ступень составляла 20 кПа. Критерий разрушения образца соответствовал предельной относительной вертикальной деформации равной 15 %. Параметр вертикальной стабилизации составлял 0.05 %. Время стабилизации вертикальной деформации – 2 часа. Результаты эксперимента по ступеням загрузки представлены на рис. 2.

По результатам эксперимента с помощью метода наименьших квадратов была получена функция объемной ползучести в виде ломаной линии [10] (время безразмерное):

$$\Pi(t) = \Pi(0) \left\{ h(t) - \sum_{i=0}^n (a_i + a_{i+1}) \cdot (t - T_i) \cdot h(t - T_i) \right\}, \quad (1)$$

где $a_0 = 0, a_{i+1} = 0, T_0 = 0, h(t)$ – функция Хевисайда, искомые параметры a_i определены на основе экспериментальных данных.

Параметры сплайна a_i вычисляются для каждого временного интервала отдельно с использованием метода наименьших квадратов. На начальном временном интервале $0 \leq t \leq T_1$ определяются $\Pi(0)$ и a_1 , а на остальных i -х сегментах находятся другие параметры a_i , где $i = 2, \dots, n$.

После того как на основании эксперимента определены параметры сплайнов $\Pi(t)$, можно записать выражение функции ползучести в изображениях по Лапласу – Карсону $\Pi^*(p)$ [10]:

$$\Pi^*(p) = \Pi(0) \left[1 - \frac{a_0 - a_1}{p} e^{-pT_0} - \frac{a_1 - a_2}{p} e^{-pT_1} - \dots - \frac{a_i - a_{i+1}}{p} e^{-pT_{i+1}} \right],$$

$$p = \frac{1}{T}.$$

Перейдем к определению функции объемной релаксации грунта $R(t)$. Представим функцию релаксации в виде ломаной линии с неизвестными параметрами $b_i, i = 1, \dots, m$:

$$R(t) = R(0) \left\{ h(t) - \sum_{i=0}^m (b_i + b_{i+1}) (t - \tilde{T}_i) h(t - \tilde{T}_i) \right\}, \quad (2)$$

точки T_i, \tilde{T}_i на временной оси для функции ползучести и для функции релаксации могут быть различны.

Функции ползучести и релаксации в изображениях по Лапласу – Карсону (знак * указывает изображение) являются взаимнообратными:

$$R^*(p) = \frac{1}{\Pi^*(p)}. \quad (3)$$

Для нахождения неизвестного оригинала функции релаксации применим метод ломаных. Суть метода заключается в составлении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) по правилу совпадения неизвестного оригинала в изображениях с известной функцией в изображениях на системе точек (коллокаций) $p_i, i = 1, \dots, 4$.

СЛАУ метода ломаных имеет вид [10]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^L \frac{e^{-p_i T_{i-1}} - e^{-p_i T_i}}{p_i} b_i = \frac{\Pi^*(p_i)}{\Pi^*(p_0)} - 1 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^L \frac{e^{-p_{L-1} T_{i-1}} - e^{-p_{L-1} T_i}}{p_{L-1}} b_i = \frac{\Pi^*(p_{L-1})}{\Pi^*(p_0)} - 1 \\ \sum_{i=1}^L (T_i - T_{i-1}) b_i = \frac{\Pi^*(p_{L=0})}{\Pi^*(p_0)} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

Последнее уравнение системы уравнений (4) записано для точки $p_5 = 0$, поэтому отличается от других уравнений системы (4). При построении СЛАУ метода ломаных на основании теории операционного исчисления учтена теорема о пределах [10]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = \lim_{p \rightarrow 0} R^*(p), \quad \lim_{t \rightarrow 0} R(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} R^*(p).$$

Методика, представленная формулами (1) – (4), была автоматизирована в Excel и протестирована на данных эксперимента для образца из оргстекла [11]. Погрешность вычислений метода составила 0.9 % (рис. 3).

Результаты

Определение функции объемной ползучести

Процесс изменения деформации тела во времени при постоянном напряжении называется

ся ползучестью. Нагрузки на образец рассматриваются такими, чтобы связь между напряжениями и деформациями была линейной. Функция объемной ползучести используется в теории наследственности Больцмана – Вольтерры в виде интегрального уравнения 2-го рода [12]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{K} + \frac{1}{K} \int_0^t \Pi(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $\varepsilon(t)$ – относительная деформация, $\sigma(t)$ – нормальное напряжение, K – упругая часть функции ползучести $\Pi(t)$. Для получения функции ползучести были использованы 2 и 3 степени нагружения (рис. 2). На рис. 4 изображены графики экспериментальной и теоретической (полученной по методу наименьших квадратов) функций ползучести. Параметры ломаной линии: $a_1 = 2.992 \cdot 10^{-5}$; $a_2 = 9.571 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = 2.696 \cdot 10^{-5}$; $a_4 = 8.68 \cdot 10^{-5}$; $a_5 = 0.00309$; $a_6 = 9.785 \cdot 10^{-7}$.

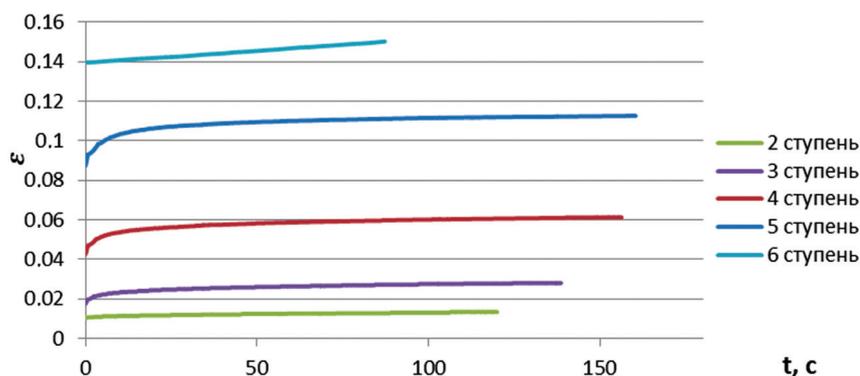


Рис. 2. Графики деформаций по ступеням нагружения
Fig. 2. Deformation diagrams by loading stages

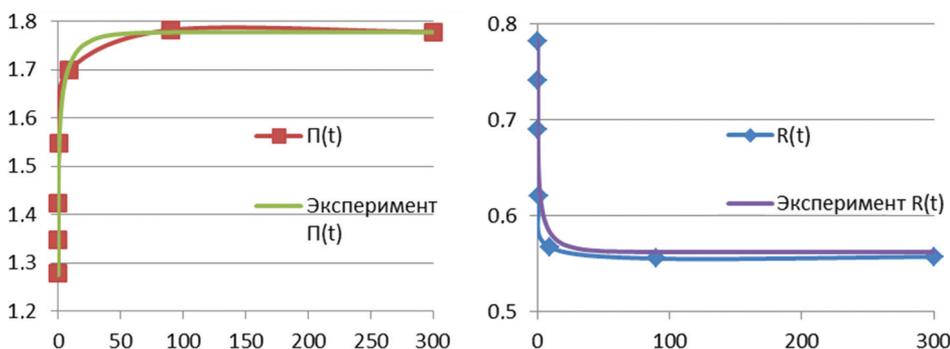


Рис. 3. Результаты тестового примера для оргстекла
Fig. 3. Test case results for acrylic plastic

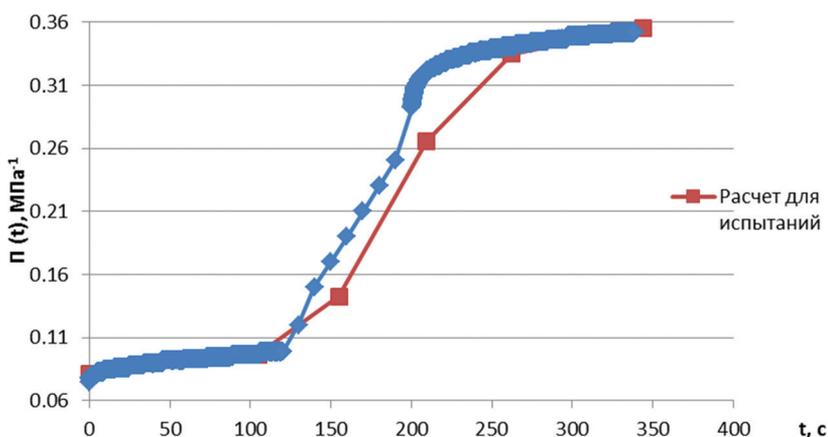


Рис. 4. Экспериментальная и теоретическая функции ползучести
Fig. 4. Experimental and theoretical creep functions

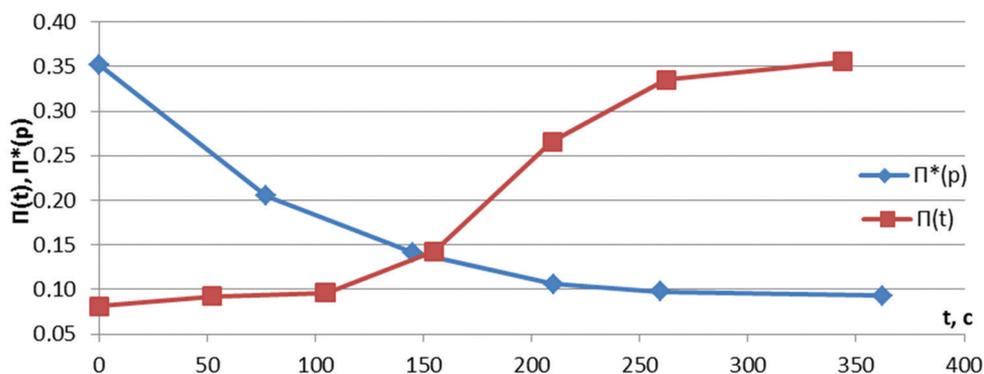


Рис. 5. Оригинал и изображение функции ползучести
Fig. 5. Original and image of the creep function

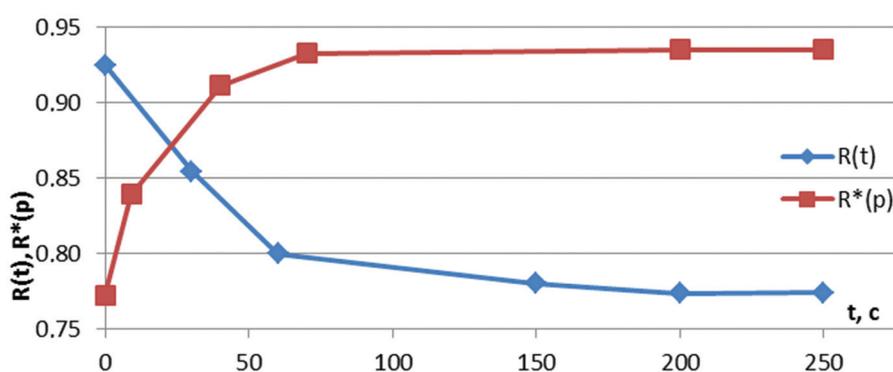


Рис. 6. Оригинал и изображение функции релаксации
Fig. 6. Original and image of the relaxation function

Определение функции релаксации грунта

Процесс изменения напряжений в теле во времени при постоянной деформации является релаксацией [12].

Для нахождения релаксации грунта по системе уравнений (4) назначены следующие значения T_i : $T_1 = 5$, $T_2 = 80$, $T_3 = 150$, $T_4 = 200$, $T_5 = 250$. В результате решения системы уравнений матричным способом получили параметры b_i : $b_1 = -0.0012$, $b_2 = -0.00138$, $b_3 = -0.00721$, $b_4 = -0.00483$. Графики механических характеристик грунта в оригинале и в изображениях представлены на рис. 5 и 6.

Выводы

Представление функции ползучести в виде ломаной линии позволяет получить функцию релаксации (обратную функцию к функции ползучести в изображениях по Лапласу – Карсону) как решение задачи вязкоупругости. Изображение ломаной линии известно.

Переход от изображения к оригиналу выполняется по методу ломаных, который сводится

к системе линейных алгебраических уравнений относительно искомым параметрам функции релаксации.

На тестовом примере показана погрешность метода ломаных, она не превосходит 0.9%. Обработка результатов экспериментальных данных по методу наименьших квадратов составила 5.2%. Увеличение количества отрезков ломаной линии позволит уменьшить расхождение с экспериментальными данными.

По предложенной методике нет необходимости ставить эксперимент с образцом из грунта на релаксацию, для определения функции ползучести достаточно иметь экспериментальные данные ползучести деформаций во времени или данные изменения напряжений во времени.

Полученные механические характеристики вязкоупругого грунта применимы для прогнозного расчета деформированного состояния оснований зданий и сооружений из вязкоупругих грунтов по решениям задач о действии внешней нагрузки на грунтовое основание, изложенным в работе [13].

Библиографический список

1. Nguyen, P. D. The dependence of the strength properties of soil on its physical state / P. D. Nguyen. – DOI 10.5862/MCE.35.3. – Текст : непосредственный // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – No. 35 (9). – P. 23–28.
2. Liu, E. L. An elastoplastic model for saturated freezing soils based on thermo-poromechanics / E. L. Liu, Y. M. Lai, H. Wong, J. L. Feng. – DOI 10.1016/j.ijplas.2018.04.007. – Текст : непосредственный // International Journal of Plasticity. – 2018. – No. 107. – P. 246–285.
3. Sabri, M. M. Soil-structure interaction: theoretical research, in-situ observations, and practical applications / M. M. Sabri, K. G. Shashkin. – DOI 10.34910/MCE.120.5. – Текст : непосредственный // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 120 (4). – P. 12005.
4. Mishra, A. Analysis of creep settlement of pile groups in linear viscoelastic soil / A. Mishra, N. R. Patra. – DOI 10.1002/nag.2976. – Текст : непосредственный // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2019. – No. 43 (1). – P. 2288–2304.
5. Liu, J. C. One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load / J. C. Liu, G. H. Lei, X.-D. Wang. – DOI 10.1080/1064119X.2013.877109. – Текст : непосредственный // Marine Georesour Geotechnol. – 2015. – No. 33 (4). – P. 337–347.
6. Wang, L. Semi-analytical solution for one-dimensional consolidation of fractional derivative viscoelastic saturated soils / L. Wang, D. Sun, P. Li, Yi Xie. – DOI 10.1016/j.compgeo.2016.10.020. – Текст : непосредственный // Computers and geotechnics. – 2017. – No. 83 (1). – P. 30–39.
7. Experiment study of lateral unloading stress path and excess pore water pressure on creep behavior of soft soil / W. Huang, K. Wen, D. Li [et al.]. – DOI 10.1155/2019/9898031. – Текст : непосредственный // Advances in Civil Engineering. – 2019. – Vol. 2019. – P. 9898031.
8. Experimental research on consolidation creep characteristics and microstructure evolution of soft soil / J. Yuan, Y. Gan, J. Chen [et al.]. – DOI 10.3389/fmats.2023.1137324. – Текст : непосредственный // Structural Materials. – 2023. – No. 10. 1137324.
9. Мальцева, Т. В. Математическая теория водонасыщенного грунта / Т. В. Мальцева. – Тюмень : Вектор Бук, 2012. – 240 с. – ISBN 978-5-91409-279-2. – Текст : непосредственный.
10. Мальцев, Л. Е. Теория вязкоупругости для инженеров-строителей / Л. Е. Мальцев, Ю. И. Карпенко. – Тюмень : Вектор Бук, 1999. – 239 с. – Текст : непосредственный.
11. Колтунов, М. А. Ползучесть и релаксация / М. А. Колтунов. – Москва : Высшая школа, 1976. – 278 с. – Текст : непосредственный.
12. Безухов, Н. М. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. М. Безухов. – Москва : Высшая школа, 1968. – 538 с. – Текст : непосредственный.
13. Maltseva, T. V. Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils / T. V. Maltseva, E. R. Treflina, T. V. Saltanova. – DOI 10.18720/MCE.95.11. – Текст : непосредственный // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – No. 95 (3). – P. 119–130.

References

1. Nguyen, P. D. (2012). The dependence of the strength properties of soil on its physical state. Magazine of Civil Engineering, 35(9), pp. 23-28. (In English). DOI 10.5862/MCE.35.3.
2. Liu, E. L., Lai, Y. M., Wong, H., & Feng, J. L. (2018). An elastoplastic model for saturated freezing soils based on thermo-poromechanics. International Journal of Plasticity, (107), pp. 246-285. (In English). DOI 10.1016/j.ijplas.2018.04.007.
3. Sabri, M. M., & Shashkin, K. G. (2023). Soil-structure interaction: theoretical research, in-situ observations, and practical applications. Magazine of Civil Engineering, (120(4)), pp. 12005. (In English). DOI 10.34910/MCE.120.5.
4. Mishra, A., & Patra, N. R. (2019). Analysis of creep settlement of pile groups in linear viscoelastic soil. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, (43 (1)), pp. 2288-2304. (In English). DOI 10.1002/nag.2976.
5. Liu, J. C., Lei, G. H., & Wang, X.-D. (2015). One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load. Marine Georesour Geotechnol, (33(4)), pp. 337-347. (In English). DOI 10.1080/1064119X.2013.877109.
6. Wang, L., Sun, D., Li, P., & Xie, Yi. (2017). Semi-analytical solution for one-dimensional consolidation of fractional derivative viscoelastic saturated soils. Computers and geotechnics, (83(1)), pp. 30-39. (In English). DOI 10.1016/j.compgeo.2016.10.020.

7. Huang, W., Wen, K., Li, D., Deng, X., Jiang, H., & Amini, F. (2019). Experiment study of lateral unloading stress path and excess pore water pressure on creep behavior of soft soil. *Advances in Civil Engineering*, 2019, p. 9898031. (In English). DOI 10.1155/2019/9898031.
8. Yuan, J., Gan, Y., Chen, J., Tan, S., & Zhao, J. (2023). Experimental research on consolidation creep characteristics and microstructure evolution of soft soil. *Structural Materials*, 10:1137324. (In English). DOI 10.3389/fmats.2023.1137324
9. Maltseva, T. V. (2012). *Matematicheskaya teoriya vodonasyshchennogo grunta* [Mathematical theory of water-saturated soil]. Tyumen, Vector Buk Publ., 240 p. (In Russian). ISBN 978-5-91409-279-2.
10. Maltsev, L. E., & Karpenko, Yu. I. (1999). *Teoriya vyazkoupругosti dlya inzhenerov-stroiteley* [Viscoelasticity theory for civil engineers]. Tyumen, Vector Buk Publ., 239 p. (In Russian).
11. Koltunov, M. A. (1976). *Polzuchest' i relaksatsiya* [Creep and relaxation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 278 p. (In Russian).
12. Bezukhov, N. M. (1986). *Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 538 p. (In Russian).
13. Maltseva, T. V., Trefilina, E. R., & Saltanova, T. V. (2020). Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils. *Magazine of Civil Engineering*, (95(3)), pp. 119-130. (In English). DOI 10.18720/MCE.95.11.

Сведения об авторах

Гладков Артем Евгеньевич, обучающийся кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: artem21.03.200322@mail.ru

Мальцева Татьяна Владимировна, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет, e-mail: maltsevatv@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-0274-0673

Исакова Наталья Петровна, ассистент кафедры физики и приборостроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: isakovanp@tyuiu.ru

Information about the authors

Artem E. Gladkov, Student at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: artem21.03.200322@mail.ru

Tatyana V. Maltseva, D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Professor at the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, e-mail: maltsevatv@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-0274-0673

Natalya P. Isakova, Assistant at the Department of Physics and Instrumentation, Industrial University of Tyumen, e-mail: isakovanp@tyuiu.ru

*Получена 07 ноября 2023 г., одобрена 25 ноября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 07 November 2023, Approved 25 November 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

А. А. Тестешев, В. Д. Тимоховец, Т. Г. Бабич
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

DIFFERENTIATION OF THE USE OF REMOTE TRAFFIC RESEARCH METHODS

Alexander A. Testeshev, Vera D. Timohovets, Tatyana G. Babich
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Существующие агломерационные тренды выдвигают новые требования к транспортной инфраструктуре современных городов. Планирование городского развития должно базироваться на репрезентативной информации о дорожном движении. Для снижения ресурсных затрат на сетевое исследование транспортных потоков выбран метод дистанционного зондирования движения по критериям площади и конфигурации улично-дорожной сети урбанизированной территории, предполагающий применение современных спутниковых систем. Наиболее подходящими для данной цели в России являются спутники «Ресурс-П» и «Канопус-В», лучшими за рубежом по соотношению качества съемки и регулярности обновления ресурсов можно назвать The Landsat Program и Maxar (США). Установлена корреляция пространственного разрешения спутниковых снимков и масштаба дешифрируемого изображения с техническими возможностями спутниковых систем; критическое пространственное разрешение в 1/14.8 м/мм достигается при масштабе 1:450. Авторы разработали и рассмотрели на примере 14 городских российских и зарубежных агломераций алгоритм выбора рационального метода дистанционного зонди-

Abstract. The existing urban trends give new demands on the transport infrastructure of modern cities. Urban development planning should be based on representative traffic information. To reduce the resource costs of network research of traffic flows, we chose the method of remote sensing of traffic by criteria of area and configuration of the street-road network of the urbane territory with the use of modern satellite systems. The most suitable satellites for this purpose in Russia are Resurs-P and Kanopus-B, while the best satellites abroad in terms of image quality and regularity of resource updates are The Landsat Programme and Maxar (USA). We set, that the spatial resolution of satellite images and the scale of the image to be interpreted are correlated with the technical capabilities of satellite systems; the critical spatial resolution of 1/14.8 m/mm is achieved at a scale of 1:450. The authors developed an algorithm for selecting a rational method of remote sensing of traffic for different spatial urban structures at micro-, meso- and macro-levels and considered it on the example of 14 urban Russian and foreign agglomerations. The article presents a feasibility study of remote sensing application based on the "cost per unit of accuracy" criterion. Its values ranged from 0.08 to 1393.94 thousand rubles depending

рования движения для различных пространственных городских структур на микро-, мезо- и макроуровнях. Приведено технико-экономическое обоснование применения дистанционного исследования по критерию «стоимость единицы точности». Его значения составили от 0.08 до 1393.94 тыс. руб. в зависимости от выбранного метода мониторинга и площади пространственных структур изучаемых объектов. Приоритетным по стоимости единицы точности оказался метод дистанционного спутникового зондирования. С учетом полученных данных планируется создание программного продукта по автоматизации дешифровочных алгоритмов определения параметров дорожного движения.

Ключевые слова: масштаб съемки, дистанционное зондирование, съемочная система

on the selected monitoring method and the area of spatial structures of the studied objects. The satellite remote sensing method was found to be a priority in terms of cost per unit of accuracy. Taking into account the obtained data, we plan to create a software product for automation of decoding algorithms for determining traffic parameters.

Key words: shooting scale, remote sensing, shooting system

Для цитирования: Тестешев, А. А. Дифференциация применения методов дистанционного исследования дорожного движения / А. А. Тестешев, В. Д. Тимоховец, Т. Г. Бабич. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-34-47. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 34–47.

For citation: Testeshev, A. A., Timohovets, V. D., & Babich, T. G. (2023). Differentiation of the use of remote traffic research methods. *Architecture, Construction, Transport*, (4(106)), pp. 34-47. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-34-47.

Введение

Современный этап развития общества сопровождается таким глобальным пространственным процессом, как урбанизация, приводящим к росту концентрации населения в границах городских территорий. Лидирующие позиции в этом процессе занимают экономически развитые страны мира (без учета стран-государств, имеющих качественные отличия в пространственном развитии в силу территориального расположения), такие как Япония (91.7 %), Объединенные Арабские Эмираты (86.8 %), Австралия (86.1 %), Великобритания (83.7 %), Соединенные Штаты Америки (82.5 %), Франция (80.7 %), Германия (77.4 %), Российская Федерация (74.6 %), Китайская Народная Республика (60.3 %) и др.

Оценка динамики урбанистических и агломерационных процессов, а также их проблема-

тики базировалась на выборке статистических показателей развития территорий ряда крупных городов Российской Федерации и зарубежных стран (таблица 1).

Изучение выполненных исследований по теме городского планирования и развития [1] показало, что на основе качественного анализа тенденций урбанизации территорий прогнозируется дальнейший рост городских агломераций, а авторы [2], исследуя характер сфер человеческой деятельности, приходят к заключению о росте мобильности городского населения, занятого в реальном секторе материально-вещественной экономики.

Количественный анализ представленных данных (таблица 1) позволяет заключить, что темпы прироста численности населения в городах хоть и отличаются незначительными флук-

Таблица 1
Table 1

Динамика численности населения и площадь занимаемых земель городскими территориями
Population dynamics and land area occupied by urban areas

Типовая структура города	Наименование города	Геометрические размеры города*, км	Прирост численности населения, %			Характерные площади, км ²		
			1990–2000	2000–2010	2010–2020	города	района (средняя)	микрорайона
Эллиптическая / прямоугольная	Санкт-Петербург	52 × 28	-2.2	+4.6	+1.0	1 439.0	60.7	0.8
	Новосибирск	28 × 18	-0.0	-2.2	+4.7	502.0	70.3	0.8
	Самара	58 × 8	-5.7	+0.8	-0.7	541.0	48.5	0.8
	Омск	34 × 17	-0.9	+0.4	+0.1	572.0	98.4	0.8
	Уфа	36 × 20	+0.3	-2.7	+5.9	707.0	131.0	0.8
	Пермь	32 × 25	-3.4	-1.8	+6.1	799.0	72.5	0.8
	Красноярск	26 × 13	+0.0	+10.0	+11.0	379.0	36.0	0.8
	Воронеж	40 × 15	+2.0	-2.0	+15.9	596.0	127.0	0.8
	Лондон	50 × 30	+0.4	+1.7	+0.3	1 706.0	60.6	0.8
Радиальная / квадратичная	Москва	30	+1.1	+1.4	+0.9	2 561.0	40.6	0.8
	Екатеринбург	13	-2.09	+6.2	+9.7	495.0	126.0	0.8
	Ростов-на-Дону	11	+0.0	+7.0	+4.3	348.5	85.4	0.8
	Челябинск	13	-2.7	+4.2	+5.6	530.0	75.0	0.8
	Тюмень	16	+9.9	+1.4	+2.9	698.5	126.5	0.8
	Берлин	16	-1.5	-1.7	+0.9	891.0	64.7	0.8
	Пекин	60	+6.4	+4.8	+2.4	16 801.0	304.2	0.8
Треугольная	Волгоград	20–30	+0.2	+2.1	-1.2	859.0	71.5	0.8
	Нижний Новгород	36–50	-3.4	-7.8	+0.0	514.0	94.0	0.8
	Токио	50–60	+2.3	+0.9	-1.5	2 194.0	34.8	0.8
	Нью-Йорк	35–42	+9.4	+2.1	+2.0	1 214.9	148.9	0.8

туациями в силу политических (международные конфликты, миграционные процессы), экономических (санкции, эмбарго, дефолт) и других (эпидемии, пандемии и др.) внешних факторов, в целом демонстрируют положительную динамику изменения демографической ситуации. Для обеспечения качества городской среды как при экстенсивной (рост населения за счет расширения территории), так и при интенсивной (за счет увеличения плотности населения) урбанизации возникает необходимость ужесточить требования к различным сферам жизнедеятельности человека, что обусловлено возможностями транспортной инфраструктуры [2]. От эффективности транспортных систем зависит успешная деятельность социально значимых объектов – медицинских, образовательных, спортивных учреждений, учреждений социального обслуживания, культуры и т. д. Качество транспортного обслуживания

(перемещения товаров, грузов, перевозки пассажиров) оценивается соотношением затрат времени на передвижение и транспортной доступности. Транспорт выполняет интеграционную и коммуникационную роли и обеспечивает полноценное функционирование инфраструктур городского хозяйства.

Рост мобильности населения выдвигает качественно новые требования к улично-дорожной сети города, которая должна быть релевантной запросам и потребностям современного человека.

Объект и методы исследования

В целях формирования комфортной городской среды Минстрой России разработал национальный проект «Жилье и городская среда» [3], реализация которого невозможна без развития транспортной системы. Объектом исследования

являются параметры транспортного потока, количественно характеризующие дорожное движение.

Планирование развития урбанизированных транспортных систем базируется на основе репрезентативной информации о транспортных потоках [4], которая может быть собрана различными методами.

Контактные методы, являясь традиционными и общедоступными, в условиях физического взаимодействия с объектом наблюдения регистрируют показания с помощью наземных средств измерений: детекторов, постов мониторинга, радаров и телеметрии.

Бесконтактные методы, основанные на геоинформационных технологиях, обеспечивают передачу показаний в центры наблюдения дистанционно посредством радиоволн, проводных систем, через спутниковые сигналы и т. п. Процесс съемки может осуществляться в рамках авиационного мониторинга с самолетов, вертолетов, микроавиационных радиоуправляемых аппаратов или космического мониторинга, производимого с пилотируемых орбитальных станций, кораблей многоразового использования, автономных спутниковых съемочных систем и т. п.

Данные, полученные с помощью контактных и бесконтактных методов, могут быть применены для решения различных инженерных задач: проектирования объектов городской инфраструктуры, изучения динамики транспортного спроса, оптимизации маршрутов движения, обеспечения дорожной безопасности и др. В зависимости от масштаба съемки данные могут использоваться на различных уровнях:

- микроуровень – мониторинг условий в отдельных микрорайонах, жилых комплексах, на локальных транспортных объектах местного значения, по площади не превышающих 0.1–0.6 км²;
- мезоуровень – изучение движения на магистральных улицах и городских дорогах транспортных объектов общегородского значения, а также отдельных районов и областей городских территорий, по площади составляющих 0.6–5.6 км²;

- макроуровень – исследование территорий населенных пунктов и улично-дорожной сети города в целом с целью получения представления об общей транспортной ситуации на площадях, превышающих 5.6 км².

Главным недостатком многих методов является трудозатратность, что делает оправданным их использование только на локальных транспортных объектах малой площади и длины: пересечениях, отдельных улицах и т. д. Для изучения движения на всей улично-дорожной сети наиболее целесообразным представляется применение ресурсосберегающих методов. Современный уровень развития информационно-коммуникационных технологий позволяет для исследования транспортных потоков с необходимой точностью измерений в качестве основных использовать дистанционные методы, а контактные применять для тарировки (выборочной проверки и корректировки) результатов.

В настоящее время наибольшее распространение получили методы, например, дистанционное зондирование [5] и спутниковый мониторинг, с помощью которых выполняется ряд функций одновременно.

Дистанционное зондирование Земли представляет собой наблюдение за поверхностью планеты наземными, авиационными и космическими средствами, которые оснащены специальными видами съемочной аппаратуры [6]. Зондирование применяется в различных областях человеческой деятельности и является достаточно сложной системой, которая включает в себя:

- обновление картографических ресурсов (топографических, автодорожных, навигационных и других специальных карт);
- мониторинг состояния окружающей среды с учетом воздействия природных и антропогенных факторов: оценка ущерба лесных пожаров, наблюдение за ледовой обстановкой, оценка влияния сельскохозяйственной деятельности человека и др.;
- мониторинг чрезвычайных ситуаций, связанных с природными и техногенными воздействиями.

С помощью зондирования можно решать и задачи меньшего масштаба: осуществлять строительный контроль (в том числе мониторинг несанкционированных построек), следить за функционированием дорожно-транспортной инфраструктуры и т. д. Однако анализ показал, что чаще всего зондирование применяется в экологическом и природоохранном направлениях, в то время как наблюдение за объектами транспортной инфраструктуры практически не ведется в силу малой изученности его возможностей. Исследования авторов [7, 8] доказывают возможность дистанционного мониторинга урбанизированных транспортных систем, что повышает конкурентоспособность данного метода за счет репрезентативности разработанного дешифровочного аппарата, позволяющего определять первичные и производные характеристики транспортных потоков. Предлагаемая в настоящей работе дифференциация дистанционных методов зондирования базируется на учете тех-

нических возможностей средств наблюдения, соотношенных с экономическими затратами на исследование транспортных сетей различных планировочных конфигураций, размеров и площадей.

Многообразие съемочных систем дистанционного зондирования, их специализаций и возможностей [9] предопределило необходимость изучения принципов работы и характеристик режима съемки (таблица 2).

Разнообразие видов дистанционного зондирования расширяет границы его применения для достижения различных инженерных целей. Наиболее релевантными для исследования транспортных потоков представляются сканерные и лазерные методы с ориентировочной точностью 35 и 65 % соответственно (в силу широкого применения и наличия в большом количестве оборудования для лазерного сканирования).

На сегодняшний момент дистанционное зондирование Земли получило широкое распро-

Таблица 2
Table 2

Характеристики съемочных систем дистанционного зондирования
Characteristics of remote sensing systems

Вид, год начала применения Технические характеристики	Фотографические (1858 г.)	Телевизионные (1960 г.)	На основе приборов с зарядовой связью (1970 г.)	Сканерные (1957 г.)	Радиолокационные (1959 г.)	Лазерные (1986 г.)
Спектральная разрешающая способность, мкм	0.4–0.9	0.4–0.9	0.6–0.9	3.0–14.0	0.8–30.0	0.3–0.95
Линейная разрешающая способность, м	до 8	до 20	до 20	до 1	до 10	до 1
Фотограмметрическая точность*	Максимальная	Минимальная	Минимальная	Максимальная	Минимальная	Максимальная
Фотометрическая точность**	Стабильная	Стабильная	Минимальная	Стабильная	Переменная, зависит от внешних факторов	Стабильная
Масштаб съемки	1:7 000	1:500 000	от 1:250 000 до 1:50 000	1:500 000	от 1:400 000 до 1:180 000	до 1:500
Высота съемки, км	435	1–917	250	717	от 250	от 0.5

* Фотограмметрическая точность характеризует степень искажения снимка, максимальному значению соответствует предел погрешности измерения в 25 % (относимый к случайной погрешности)

** Фотометрическая точность характеризует точность передачи пропорций яркостей снимаемых объектов по полю изображения

Таблица 3
Table 3

Технические характеристики наиболее распространенных и точных спутников
Technical characteristics of the most common and accurate satellites

Страна	Вид	Спутник	Краткие характеристики		Стоимость съемки по видам, у.е.		
			Наименование	Значение	пан-хроматическая	синтезированная	мультиспектральная
РФ	Сканерный	Ресурс-П	Пространственное разрешение	до 1 м	5.68	5.68	5.68
			Ширина полосы съемки	97 км			
	Матрично-сканерный	Канопус-В	Пространственное разрешение	2.5 м	0.8	0.8	0.8
			Ширина полосы съемки	23 км			
США	Телевизионные и сканерные	The Landsat	Пространственное разрешение	30 м	18	32.4	56.4
			Ширина полосы съемки	до 185 км			
			Количество снимков в день	700 шт.			
	Сканерный	Maxar	Пространственное разрешение	0.15 м	61.2	65.4	67.2
			Количество полос изображения	4 шт.			
			Ширина полосы съемки	16.4 км			
			Средняя позиционная точность снимков	менее 5 м			
	Франция, Швеция	Сканерный	Spot	Ширина полосы съемки	200 км	14.39	15.3
Пространственное разрешение				0.80 м			
Канада	Радиолокационный	Radarsat	Пространственное разрешение	3 м	9.6	16.2	24
			Ширина полосы съемки	до 185 км			

странение во многих странах мира. В Российской Федерации орбитальная группировка дистанционного зондирования Земли представлена космическими аппаратами серий «Ресурс-П» (2013 г. – н.в.), «Канопус-В» (2012 г. – н.в.), «Метеор-М» (2009–2014 гг.) и «Электро-Л» (2015 г. – н.в.). Анализ назначения и технических возможностей спутников показал, что за счет высоких функциональных характеристик только первые два аппарата могут использоваться для наблюдения за урбанизированной транспортной сетью несмотря на то, что данный вид зондирования не указан в официальной спецификации. Оставшиеся аппараты предназначены исключительно для получения информации в области контроля и охраны окружающей среды.

За рубежом преуспели в этой области Соединенные Штаты Америки со своими спутниками The Landsat Program от NASA/USGS, Maxar [10, 11]. Также космические методы зондирования широ-

ко применяются во Франции, Швеции, Бельгии, где создана система Spot; спутниковые системы активно используются в Японии – ALOS [12], Канаде – RADARSAT [13], Индии – RESOURCESAT, Германии – TERRASAR-X и др. Технические характеристики спутников представлены в таблице 3.

Результаты и обсуждение

Для мониторинга городских территорий преимущественно используется высокодетальная съемка, которая позволяет получать снимки с беспрецедентным разрешением, в том числе обеспечивая возможность идентификации транспортных потоков.

Оценка спутниковых снимков была выполнена через пространственное разрешение, выражающее фактическое количество метров в одном миллиметре изображения [14]. Анализ показал зависимость данного параметра от масштаба изображения (рис. 1).

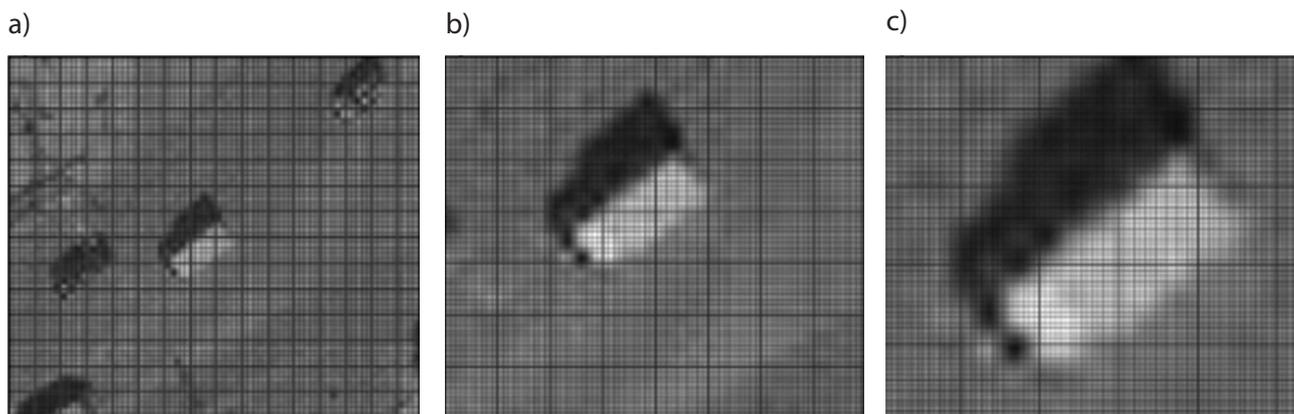


Рис. 1. Многократное увеличение изображения снимка, выполненного спутником Landsat-8 в масштабах: а) 1:600; б) 1:300; в) 1:200
 Fig. 1. Multiple zoom of Landsat-8 satellite image at a scale of: а) 1:600; б) 1:300; в) 1:200

Было установлено, что при многократном увеличении масштаба изображения до критических величин возникают сложности с распознаванием транспортных средств. При всестороннем изучении спутниковых снимков была выявлена дополнительная возможность определения их вида по форме теневой проекции. Граничные значения пространственного разрешения и масштаба, при которых возможно определение транспортного средства и его вида, находятся на основании разработанного графика (рис. 2).

Таким образом, критическим масштабом, при котором идентификация транспортного средства и состава транспортного потока становится

невозможной, является 1:1350, а максимально допустимое для распознавания пространственное разрешение 1/14.8 м/мм достигается при масштабе 1:450.

Наилучшим балансом по качеству съемки и регулярности обновления ресурсов на сегодняшний день характеризуются данные дистанционного зондирования спутниковыми компаниями Соединенных Штатов Америки. Поскольку зондирование осуществляется в общемировом масштабе, появляется возможность использования его результатов во всех странах, включая РФ.

Общедоступные версии картографических ресурсов обычно имеют достаточно низкое разрешение, что не позволяет идентифицировать статичные объекты. Платные версии, например, у Махар, обеспечивают доступ пользователей к высокодетальному контенту, позволяющему решать инженерные задачи различного назначения. Благодаря новейшим разработкам геоинформационные данные можно получать даже при неблагоприятных погодных условиях, но для отдельных съемочных систем все же характерно незначительное снижение качества конечного продукта. Также необходимо учитывать инвариантность пути следования, при котором каждый космический объект, как правило, привязан к индивидуальной орбите, что препятствует использованию спутниковых систем для всех видов зондирования в рамках проектно-исследовательской деятельности транспортного планирования.

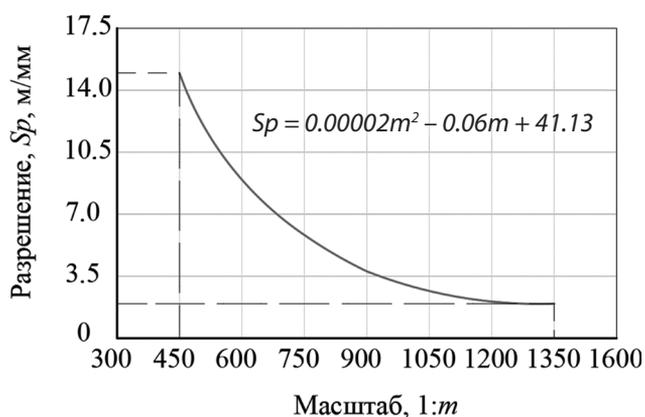


Рис. 2. Графическая зависимость масштаба изображения и его разрешающей способности
 Fig. 2. Graphical dependency of image scale and image resolution

Повышение эффективности зондирования, по мнению авторов, может быть достигнуто за счет обоснования выбора метода мониторинга обследуемой урбанизированной территории. Пространственные элементы инфраструктуры городских территорий имеют различную конфигурацию, размеры и площадь, что и предопределяет рационализацию областей применения способов мониторинга по критерию минимальных ресурсных затрат.

Алгоритм выбора метода мониторинга представлен на рис. 3.

Для незначительных объемов съемки и достаточно малых размеров объекта или при исследовании одиночных линейных сооружений целесообразно прибегать к методу аэрофото съемки [15]. Современные летательные аппараты (ЛА) ведут съемку на высоте от 100 до 1 500 м от поверхности Земли. Поскольку точность метода зондирования обратно пропорциональна вы-

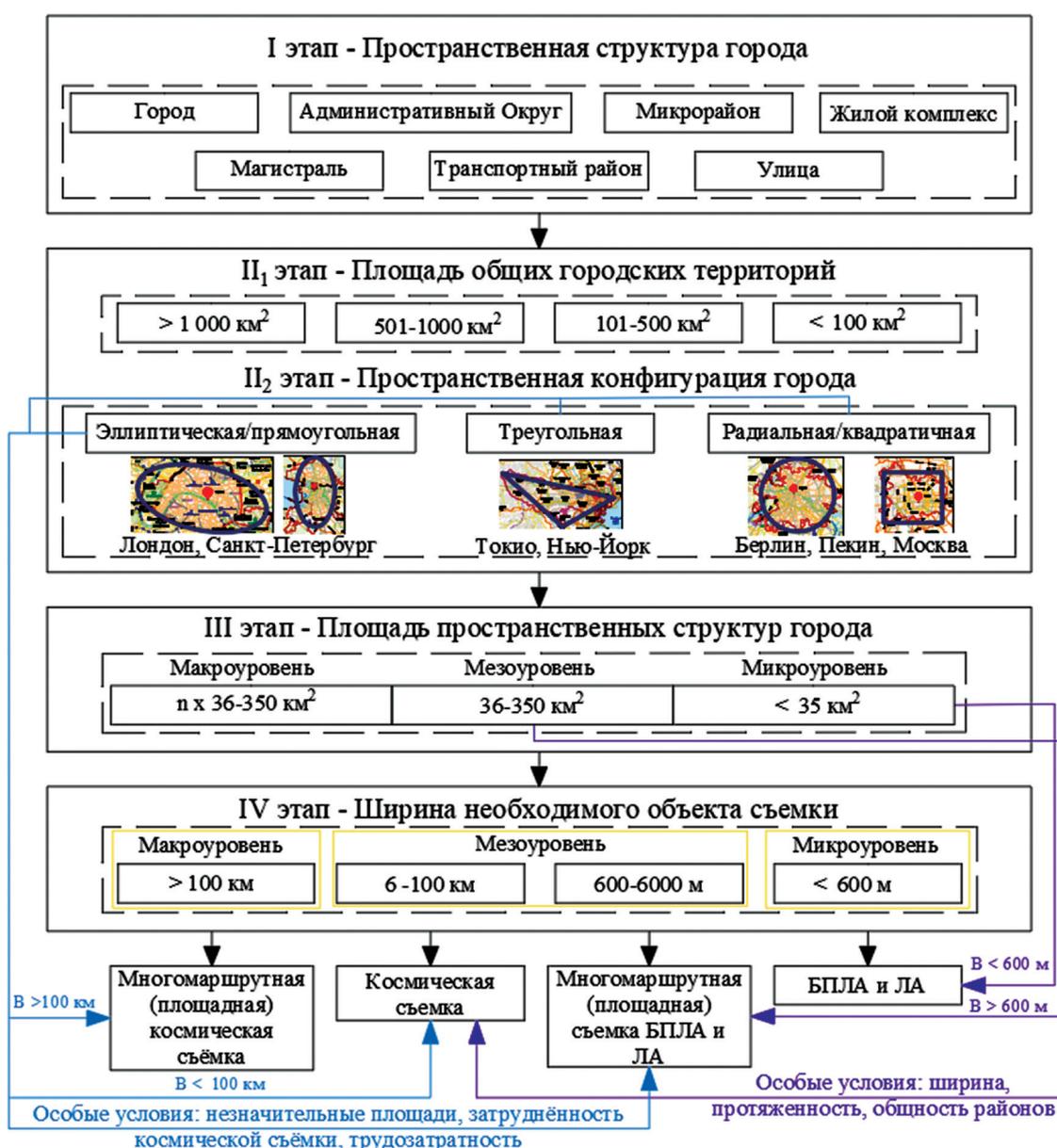


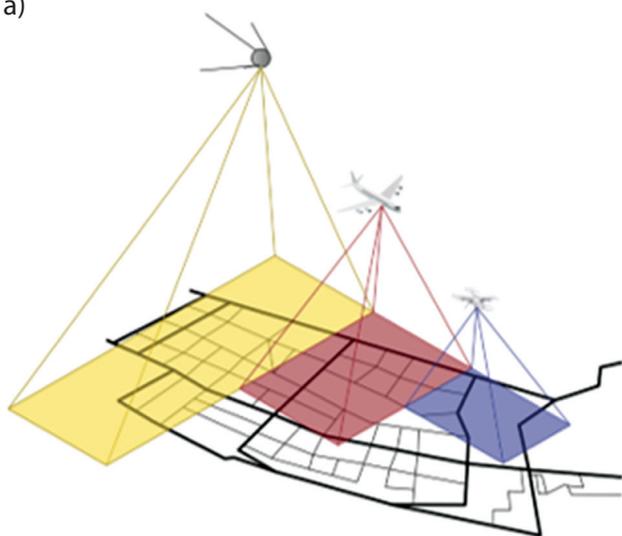
Рис. 3. Алгоритм выбора метода мониторинга транспортных потоков
Fig. 3. Algorithm for selecting a method for monitoring traffic flows

соте съемки, то применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляется более рациональным, чем управляемых систем.

Параметрические отличия характеристик космической съемочной системы с БПЛА и ЛА представлены на рис. 4.

На основании ранее представленной информации о конфигурациях и размерных характеристиках выбранных городов (таблица 1) было

a)



b)

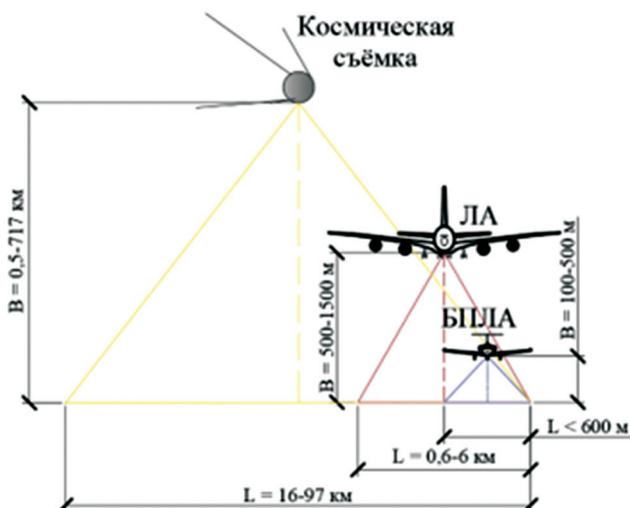


Рис. 4. Схема параметрических особенностей различных методов зондирования:

a) в аксонометрической системе; b) плоское изображение с детализацией

Fig. 4. Schematic of parametric features of different sensing methods:

a) in axonometric system; b) flat image with detailing

выполнено обоснование экономической целесообразности применения съемочных систем различного вида в зависимости от площади съемки.

Формирование стоимости дистанционного зондирования имеет специфические особенности: минимальная площадь съемки составляет 25 км² при использовании съемок, полученных до 1980 года, и 100 км² при осуществлении новой съемки, вследствие чего разница в стоимостном эквиваленте зондирования на микро-, мезо- и макроуровне отсутствует.

Применение управляемых и беспилотных летательных аппаратов имеет схожие характеристики по стоимости и времени съемки единичного пролета по заданной траектории, но в силу малой высоты полета (рис. 4) и, соответственно, небольшой ширины зоны охвата происходит кратное увеличение количества проходов по ширине исследуемой территории, что в среднем на 40 % повышает общую стоимость съемки с БПЛА в сравнении с ЛА.

При значительных масштабах целесообразно прибегнуть к дистанционному зондированию посредством спутникового мониторинга. Для исследования площадей, численно приравняемых к отдельным округам, транспортным районам, составляющим, как правило, не более 1/4–1/10 площади городских территорий, наиболее подходящим по временным и финансовым затратам становится использование пилотируемых летательных аппаратов. При местном проектировании, в частности, отдельных объектов улично-дорожной сети, предпочтительным является использование беспилотных технологий.

Особенностью спутниковых систем является их многофункциональность, что позволяет подбирать рациональный вид съемки под требуемые условия исследования, что выгодно отличает их от БПЛА и ЛА, имеющих стандартные характеристики и предоставляющих практически равнозначные данные.

Детализированные расчеты количества проходов и стоимости съемки, зависящие от метода мониторинга и уровня изученности транспортной системы, представлены в таблице 4 настоящего исследования.

Таблица 4
Table 4

Определение целесообразности применения съемочных систем в зависимости от масштаба поставленной задачи (фрагмент)
Determining the feasibility of shooting systems depending on the scale of the surveyed area (excerpt)

Типо- вая струк- тура города	Наименование города	Стоимость съемки, у. е. / количество проходов											
		Спутниковая съемка / дистанционное зондирование				Управляемые летательные аппараты				Беспилотные летательные аппараты			
		микро- масштаб	мезомас- штаб	макро- масштаб	от	микро- масштаб	мезомасштаб	макро- масштаб	от	микро- масштаб	мезомасштаб	макро- масштаб	от
Эллиптическая / прямо- угольная	Санкт-Петербург	от 59 400 1	5940-85477 1-4	от 59400 1	от 253 1	19170-454465 7-63	от 1579 1-4	от 354 2	26838-636251 от 63	от 2211 от 4			
	Новосибирск	от 59 400 1	5940-29819 1-2	от 59400 1	от 253 1	22202-158542 4-37	от 1579 1-4	от 354 2	31083-221958 от 37	от 2211 от 4			
	Самара	от 59 400 1	5940-32135 2-4	от 59400 1	от 253 1	15317-170859 4-39	от 1579 1-4	от 354 2	21444-239230 от 39	от 2211 от 4			
	Омск	от 59 400 1	5940-33977 1-3	от 59400 1	от 253 1	31077-180649 4-40	от 1579 1-4	от 354 2	43507-252909 от 40	от 2211 от 4			
	Лондон	от 59 400 1	5940-101848 1-4	от 59400 1	от 253 1	19139-538789 7-69	от 1579 1-4	от 354 2	26794-754305 от 69	от 2211 от 4			
Радiallyная / квадра- тичная	Москва	от 59 400 1	5940-152123 1-4	от 59400 1	от 253 1	12822-808815 9-85	от 1579 1-4	от 354 2	17951-1132341 от 85	от 2211 от 4			
	Екатеринбург	от 59 400 1	7484-29403 1-2	от 59400 1	от 253 1	39793-156331 4-37	от 1579 1-4	от 354 2	55711-218863 от 37	от 2211 от 4			
	Тюмень	от 59 400 1	7514-41491 1	от 59400 1	от 253 1	39951-220600 5-44	от 1579 1-4	от 354 2	55932-308840 от 44	от 2211 от 4			
	Берлин	от 59 400 1	5940-52925 1-2	от 59400 1	от 253 1	20434-281396 5-50	от 1579 1-4	от 354 2	28607-393954 от 50	от 2211 от 4			
	Пекин	от 59 400 1	18070-997979 2-8	от 59400 1	от 253 1	96072-5306092 22-217	от 1579 1-4	от 354 2	134501-7428529 от 217	от 2211 от 4			
Треугольная	Волгоград	от 59 400 1	5940-51025 1-2	от 59400 1	от 253 1	22581-271289 5-49	от 1579 1-4	от 354 2	31614-379805 от 49	от 2211 от 4			
	Нижний Новгород	от 59 400 1	5940-30532 1-4	от 59400 1	от 253 1	29687-162331 4-38	от 1579 1-4	от 354 2	41562-227264 от 38	от 2211 от 4			
	Токио	от 59 400 1	5940-130324 1-4	от 59400 1	от 253 1	10991-692909 8-78	от 1579 1-4	от 354 2	15387-970073 от 78	от 2211 от 4			
	Нью-Йорк	от 59 400 1	8845-72165 1-3	от 59400 1	от 253 1	47026-383690 6-58	от 1579 1-4	от 354 2	65836-537166 от 58	от 2211 от 4			

Примечание: в мезомасштабе рассматривались районы городов и города в целом, в макромасштабе – наиболее протяженные и крупные транспортные объекты (магистральные дороги и улицы общегородского значения), районы города площадью до 5 км²; микромасштаб – микрорайоны небольшой площади (до 0.8 км²), малые транспортные объекты местного значения

Стоимость каждого отдельного вида съемки зависит от множества факторов, в первую очередь, это точность и пространственное разрешение, которое желает получить пользователь. Таким образом, в зависимости от масштабов и пространственной конфигурации изучаемого объекта, необходима количественная дифференциация различных методов исследования.

В качестве технико-экономического критерия целесообразности применения того или иного метода исследования движения был использован предложенный авторами относительный показатель «стоимость единицы точности» (C_{ET}), рассчитываемый по формуле:

$$C_{ET} = \frac{C}{T},$$

где C – стоимость определения интенсивности движения, руб.;

T – точность определения интенсивности движения, %.

Ранжирование рассматриваемых методов дистанционного зондирования по критерию C_{ET} представлено на рис. 5.

Анализ полученных результатов показал, что наименьшей стоимостью (0.08 тыс. руб. для микроуровня, 3.4 тыс. руб. для мезоуровня и 7.9 тыс. руб. для макроуровня) единицы точности характеризуется метод дистанционного спутникового мониторинга, который может быть рекомендован как приоритетный для изучения характеристик дорожного движения независимо от площади урбанизированной транспортной сети (рис. 5).

Выводы

Изучение городского транспортного движения необходимо для формирования эффективной транспортной системы в целом.

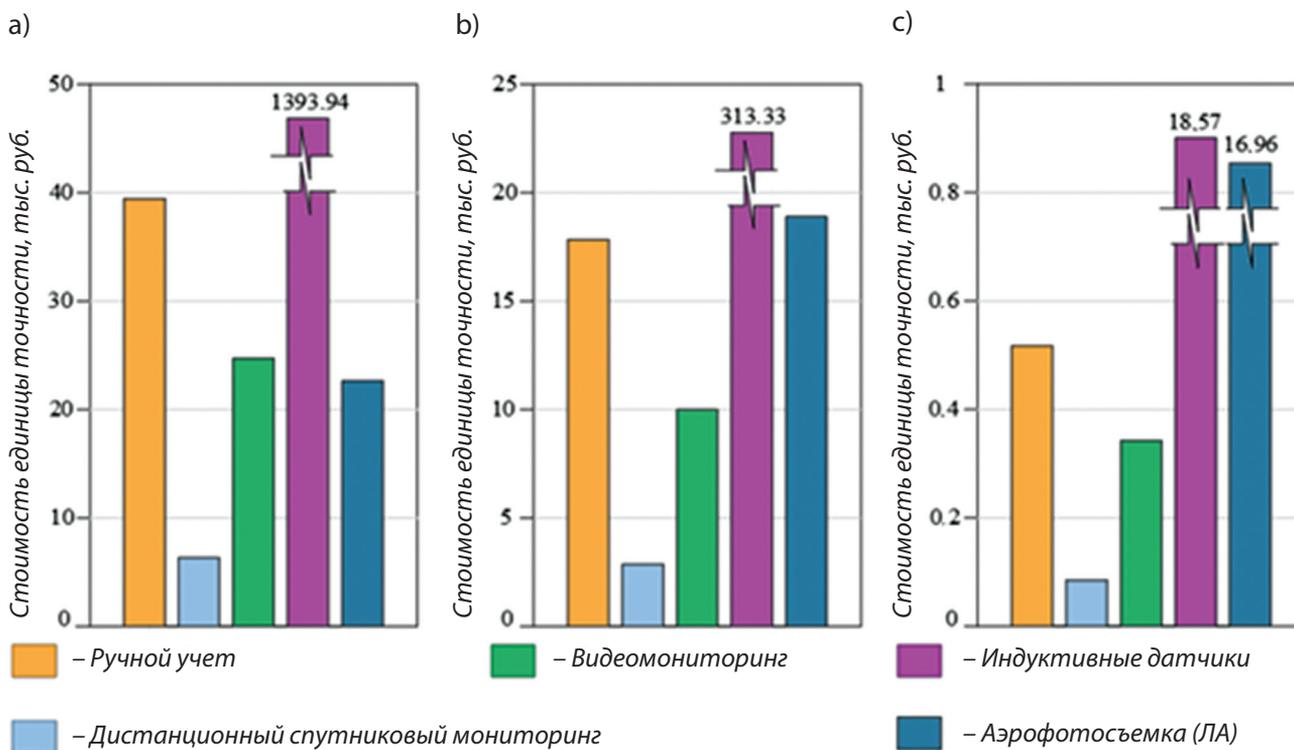


Рис. 5. Методы дистанционного зондирования транспортных потоков по критерию стоимости единицы точности: а) макроуровень (45 км²); б) мезоуровень (20 км²); в) микроуровень (0.6 км²)
 Fig. 5. Methods for remote sensing of traffic flows according to the criterion of cost per unit of accuracy: а) macro level (45 км²); б) meso level (20 км²); в) micro level (0.6 км²)

Для получения репрезентативной информации мы предлагаем опираться на данные дистанционного зондирования. В ходе исследования:

1. Проанализированы характеристики современных спутниковых систем и выполнено их ранжирование по точности съемки, позволившее выбрать спутники в зависимости от необходимой точности и стоимости съемки. Лучшими по рассматриваемым характеристикам можно считать спутники The Landsat Program и Maxar (США).
2. Установлена корреляция пространственного разрешения спутниковых снимков от масштаба изображения с картографических онлайн-ресурсов, при которых возможна идентификация транспортного средства и состава движения. Критическими значениями, при которых идентификация невозможна, являются пространственное разрешение 1/14.8 м/мм при масштабе 1:450, а также масштаб мельче 1:1 350.
3. Составлен алгоритм выбора метода мониторинга дорожного движения при съемке городской территории и транспортной сети различных размеров, позволивший определить количество проходов источников

воздушного зондирования (до 217) и их стоимость для 14 городских агломераций РФ и зарубежных стран.

4. Выполнено технико-экономическое обоснование областей применения методов дистанционного зондирования дорожного движения по критерию «стоимости единицы точности» при различной ресурсной обеспеченности субъектов дорожного хозяйства и масштаба решаемых задач. Минимальной стоимостью критерия сравнения (0.08 для микроуровня, 3.4 для мезоуровня и 7.9 для макроуровня) характеризуется метод дистанционного спутникового зондирования, что позволяет рекомендовать его как приоритетный при исследовании любых площадей городской транспортной сети.

В развитие исследования в настоящее время ведутся работы по апробации методики дистанционного зондирования транспортных потоков на улицах с нерегулярным движением, оценке корреляционной зависимости состава движения от мощности объектов городской инфраструктуры и созданию программного продукта по автоматизации дешифровочных алгоритмов определения параметров дорожного движения.

Библиографический список

1. Zhuykov, S. V. Methods of Architectural Planning for the Development of Urban Areas / S. V. Zhuykov. – Текст : непосредственный // Components of Scientific and Technological Progress. – 2021. – No 5 (59). – P. 20–23.
2. Шестеров, Е. А. Создание координированной транспортной системы при территориально-транспортном планировании развития городских территорий / Е. А. Шестеров. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-3-30-38. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 30–38.
3. Национальный проект «Жилье и городская среда» // Минстрой России : сайт. – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/natsionalnye-proekty/natsionalnyy-proekt-zhilye-i-gorodskaya-sreda/> (дата обращения: 22.09.2023). – Текст : электронный.
4. Дрю, Д. Р. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Р. Дрю ; пер. с англ. Е. Г. Коваленко, Г. Д. Шермана. – Москва : Транспорт, 1972. – 424 с. – Текст : непосредственный.
5. Кудашев, Е. Б. Конвергенция новейших информационных технологий и методов дистанционного зондирования Земли для построения аэрокосмического экологического мониторинга мегаполисов / Е. Б. Кудашев, В. П. Мясников, О. В. Сюнтюренко. – Текст : непосредственный // Вестник РФФИ. – 2001. – № 2. – С. 47–54.
6. Kryukovsky A.S. Ionospheric inhomogeneities and their influences on the Earth's remote sensing from space / A. S. Kryukovsky, B. G. Kutuza, V. I. Stasevich, D. V. Rastyagaev. – DOI 10.3390/rs14215469. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, No. 21. – P. 5469.
7. Тимоховец, В. Д. Совершенствование методов дистанционного мониторинга транспортных потоков для проектирования улично-дорожной сети крупных городов : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на

- соискание ученой степени кандидата технических наук. – Текст : непосредственный / Тимоховец Вера Дмитриевна. – Омск, 2020. – 133 с.
8. Тестешев, А. А. Полипараметрические уравнения для дешифровки результатов дистанционного спутникового мониторинга транспортных потоков / А. А. Тестешев, В. Д. Тимоховец, Т. Г. Микеладзе. – Текст : непосредственный // Транспортное строительство. – 2018. – № 5. – С. 19–21.
 9. Khutorova, O. G. Some regularities of atmospheric mesoscale variations obtained from satellite navigation system remote sensing / O. G. Khutorova, V. N. Khutorov. – DOI 10.21046/2070-7401-2020-17-6-76-81. – Текст : непосредственный // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2020. – Vol. 17, No. 6. – P. 76–81.
 10. Landsat Science : сайт. – URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 22.03.2019). – Текст : электронный.
 11. Maxar Satellite Constellation // University of Minnesota. Driven to discover : сайт. – 2023. – October 3. – URL: <https://www.pgc.umn.edu/guides/commercial-imagery/maxar-satellite-constellation/> (дата обращения: 22.10.2023).
 12. ALOS (PRISM, AVNIR-2, PALSAR) (Япония) // Сканэкс : сайт. – URL: <https://www.scanex.ru/data/satellites/alos/> (дата обращения: 22.03.2023). – Текст : электронный.
 13. Earth observation satellites. – Текст : электронный // Government of Canada : сайт. – URL: <https://asc-csa.gc.ca/eng/satellites/earth-observation/default.asp> (дата обращения: 22.08.2023).
 14. Testeshev, A. Development of harmonized multifactor mono-dependency to decipher satellite-based monitoring of traffic streams / A. Testeshev, V. Timohovetz, T. Mikeladze. – DOI 10.1016/j.trpro.2018.12.096. – Текст : непосредственный // *Transportation Research Procedia*, Saint Petersburg, September, 27–29, 2018. Vol. 36. – Saint Petersburg : Elsevier B.V., 2018. – P. 747–753.
 15. Денисова, В. В. Аэрофотосъемка / В. В. Денисова. – Текст : непосредственный // Молодежь и научно-технический прогресс : международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Губкин, 16 апреля 2015 года. Том 1. – Губкин : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2015. – С. 292–294.

References

1. Zhuykov, S. V. (2021). Methods of architectural planning for the development of urban areas. *Components of Scientific and Technological Progress*, (5(59)), pp. 20-23. (In English).
2. Shesterov, E. A. (2023). Coordinated transport system in territory and transportation development in urban areas. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*, 25(3), pp. 30-38. (In Russian). DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-3-30-38.
3. Natsional'nyy proekt "Zhil'e i gorodskaya sreda". Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/natsionalnye-proekty/natsionalnyy-proekt-zhilye-i-gorodskaya-sreda/> (accessed 22.09.2023). (In Russian).
4. Drew, D. R. (1968). *Traffic flow theory and control*. New York, St. Louis, San Francisco, Toronto, London, Sydney, Publ. MvGraw-Hill book company, 467 p. (In English).
5. Kudashev, E. B., Myasnikov, V. P., & Syuntyurenko, O. V. (2001). Konvergentsiya noveyshikh informatsionnykh tekhnologiy i metodov distantionnogo zondirovaniya Zemli dlya postroeniya aerokosmicheskogo ekologicheskogo monitoringa megapolisov. *Russian Foundation for Basic Research Journal*, (2), pp. 47-54. (In Russian).
6. Kryukovsky, A. S., Kutuza, B. G., Stasevich, V. I., & Rastyagaev, D. V. (2022). Ionospheric inhomogeneities and their influences on the Earth's remote sensing from space. *Remote Sensing*, 14(21), pp. 5469. (In English). DOI 10.3390/rs14215469.
7. Timohovets, V. D. (2020). Sovershenstvovanie metodov distantionnogo monitoringa transportnykh potokov dlya proektirovaniya ulichno-dorozhnoy seti krupnykh gorodov. Diss. kand. tekhn. nauk. Omsk, 133 p. (In Russian).
8. Testeshev, A. A., Timokhovets, V. D., & Mikeladze, T. G. (2018). Development of polyparametric equations for interpretation of results of remote satellite-based monitoring of traffic flows. *Transportnoe stroitel'stvo*, (5), pp. 19-21. (In Russian).
9. Khutorova, O. G., & Khutorov, V. N. (2020). Some regularities of atmospheric mesoscale variations obtained from satellite navigation system remote sensing. *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 17(6), pp. 76-81. (In English). DOI 10.21046/2070-7401-2020-17-6-76-81.

10. Landsat Science. Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> (accessed 22.03.2019).
11. Maxar Satellite Constellation. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/guides/commercial-imagery/maxar-satellite-constellation/> (accessed 22.10.2023).
12. ALOS (PRISM, AVNIR-2, PALSAR) (Japan). Available at: <https://www.scanex.ru/data/satellites/alos/> (accessed 22.03.2023).
13. Earth observation satellites. Available at: <https://asc-csa.gc.ca/eng/satellites/earth-observation/default.asp> (accessed 22.08.2023).
14. Testeshev, A., Timohovetz, V. & Mikeladze, T. (2018). Development of harmonized multifactor mono-dependency to decipher satellite-based monitoring of traffic streams. Transportation Research Procedia, Saint Petersburg, September, 27-29. Saint Petersburg, Publ. Elsevier B.V., 36, pp. 747-753. (In English). DOI 10.1016/j.trpro.2018.12.096.
15. Denisova, V. V. (2015). Aerofotos"emka. Molodezh' i nauchno-tekhnicheskiy progress : mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Gubkin, April, 15. Gubkin, Belgorod State Technological University BSTU named After V. G. Shoukhov Publ., Vol. 1, pp. 292-294. (In Russian).

Сведения об авторах

Тестешев Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: testeshvaa@tyuiu.ru. ORCID 0009-0005-1719-1637

Тимоховец Вера Дмитриевна, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: timohovetsvd@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3927-2332

Бабич Татьяна Григорьевна, ассистент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: babichtg@tyuiu.ru. ORCID 0009-0001-9356-0159

Information about the authors

Alexander A. Testeshev, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Highways and Airfields, Industrial University of Tyumen, e-mail: testeshvaa@tyuiu.ru. ORCID 0009-0005-1719-1637

Vera D. Timohovets, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Highways and Airfields, Industrial University of Tyumen, e-mail: timohovetsvd@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3927-2332

Tatyana G. Babich, Assistant at the Department of Highways and Airfields, Industrial University of Tyumen, e-mail: babichtg@tyuiu.ru. ORCID 0009-0001-9356-0159

*Получена 29 сентября 2023 г., одобрена 02 ноября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 29 September 2023, Approved 02 November 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

THE EFFICIENCY OF LOW-POWER SOLID-FUEL WATER BOILERS

Parviz S. Khujaev

Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi,
Dushanbe, Republic of Tajikistan

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАЛОМОЩНЫХ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

П. С. Хужаев

Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими,
Душанбе, Республика Таджикистан

Abstract. Burning fuel in large quantities when using hot water boilers leads to losses, which reduces the energy conversion efficiency of the boiler. Therefore, there were mainly small energy-saving stoves designed to burn fuel. The author proposed to use a small boiler with a firebox with a vertical grate. A small boiler with an adjustable grate water heater with a capacity of 50 kW was installed in the boarding school building. Combustion of any fuel in such a furnace had following results: a) the productivity of the boiler unit had been increased to 79–81 %; b) heat loss reduced by 2 times and harmful emissions into the atmosphere in 1.5 once. The costs of providing thermal energy compared to other operating boiler houses amounted to 14 400 somoni (1 200 dollars). This is 18 % less than the costs of the previous heating season without using the proposed boiler. The efficiency of heating processes in the boiler was assessed during one heating season.

Key words: hot water boiler, furnace, vertical grate, thermodynamic analysis, energy efficiency, heat loss with flue gases, fuel combustion temperature

Аннотация. Сжигание топлива в больших количествах при использовании водогрейных котлов приводит к определенным потерям, что снижает КПД котла. Поэтому для сжигания топлива были разработаны малогабаритные энергосберегающие печи. Автор предложил использовать малогабаритный котел с топкой с вертикальной колосниковой решеткой. Малогабаритный котел с водонагревателем с регулируемой колосниковой решеткой мощностью 50 кВт был установлен в здании школы-интерната. Сжигание любого топлива в такой топке привело к следующим результатам: а) производительность котлоагрегата увеличилась до 79–81 %; б) потери тепла сократились в 2 раза, а вредные выбросы в атмосферу – в 1.5 раза. Затраты на обеспечение тепловой энергией по сравнению с другими действующими котельными составили 14 400 сомони (1 200 долл.). Это на 18 % меньше затрат предыдущего отопительного сезона без использования предлагаемого котла. Эффективность тепловых процессов в котле оценивалась в течение одного отопительного сезона.

Ключевые слова: водогрейный котел, топка, вертикальная колосниковая решетка, термодинамический анализ, энергоэффективность, потери тепла с дымовыми газами, температура сгорания топлива

For citation: Khujaev, P. S. (2023). The efficiency of low-power solid-fuel water boilers. *Architecture, Construction, Transport*, 4(106), pp. 48-54. (In English). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-48-54.

Для цитирования: Хужаев, П. С. Эффективность маломощных твердотопливных водогрейных котлов / П. С. Хужаев. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-48-54. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 48–54.

Introduction

In Tajikistan, one of the main types of accessible and economically viable fuel is coal and lignite. At the same time, coal has disadvantages, such as high heat loss due to mechanical and chemical underburning, and a negative impact on the environment due to dangerous emissions of carbon dioxide and combustion products. In this regard, low-power solid fuel hot water boilers are traditionally used for heating and hot water supply [1].

The main types of fuel for such stoves are wood, coal and manure – local fuel, which is waste from livestock farming. Solid fuel obtained from different deposits differ from each other in their properties and combustion products.

The main values of the thermophysical properties of coal from some deposits in Tajikistan are presented in Table 1.

The efficiency of thermal processes in the boiler was evaluated using the first and second laws of thermodynamics. Based on the energy balance,

the boiler efficiency was assessed [2–4]. The work is based on well-known research in the field of heat generating plants by K. F. Roddatis, A. N. Poltaretsky, V. M. Fokin, E. G. Volkovyskiy, N. B. Lieberman, Yu. L. Gusev. It is also necessary to note the works of A. V. Vikhrov and L. K. Ramzin, which address the issues of the organization of solid fuel combustion and the design features of boilers with furnaces of layered construction.

Since the 90s of the twentieth century, research has been carried out on the conditions for the efficient combustion of fuels of various compositions without the formation of harmful emissions into the atmosphere. Research is mainly aimed at identifying methods, mechanisms for controlling and organizing fuel combustion processes with minimal emissions of harmful substances into the atmosphere. The most effective methods for calculating thermal conditions in a limited volume are described in the works [5–8]. Research on this topic was conducted by [9–11].

Table 1
Таблица 1

Thermophysical properties of coal of the main deposits in Tajikistan
Термофизические свойства угля основных месторождений Таджикистана

Name of the deposits	Heat of combustion, kJ/kg	Humidity, %	Ash content, %	Yield of volatile substances, %
Hakimi	27 017–32 573	5.2–17.4	4.8–19.7	26.8–46.9
Fan-Yagnob	32 260	0.35–1.88	3.9–24.5	23.1–36.9
Sayat	30 919	4.9	32.3	32.43
Ziddi	28 085–32 175	3.4–10.2	12.6–33.7	4.9–25.8
Mienadu	35 026	1.1	11.1–30	4.9–25.8
Ravnou	31 694	0.3–9.6	6.3–34.8	29.3–38.3
Nazar-Aylock	35 145	0.78–4.66	1.2–4.2	3.0–5.0
Shurab	27 964	13.1	12.5	34.8

However, in existing publications, practically no attention is paid to optimizing the operating modes of low-power solid fuel water boilers when operating on coal with high ash content. In existing small boilers there is no solid fuel discharge, the firebox has only one burner, and the fireplace grate is fixed. My colleagues and I have also devoted our research to exploring this topic [12–14]. In the design of a small boiler proposed by the author, all types of fuel are burned; the grate inside the firebox is movable in the vertical direction. A distinctive feature of the circuit is the presence of a small water heater boiler. The volume of the firebox has increased for burning other solid fuels, taking into account their characteristics.

The purpose of the study is to develop the design of a hot water boiler for efficient combustion of fuels of various compositions. To develop the design of a water-heating boiler, a mathematical description of the combustion processes of fuel when the volume of the combustion space changes was carried out. A design of a water-heating boiler with a movable grate was developed, and experimental studies of the combustion of high-ash fuel on a movable grate were carried out.

The thickness of the radiating layer is calculated according to the formula:

$$S = 3.6 \cdot V_t / F_{st},$$

where V_t is the volume of the furnace chamber, m^3 , F_{st} – the surface area of the furnace walls, m^2 .

The issues related to the energy and heat release analysis of the efficient combustion of solid fuel can be quite broad and complex. However, here are several factors that should be considered when analyzing the efficiency of low-power solid fuel hot water boilers:

1. A method used to conduct an energy analysis of the solid fuel combustion.
2. Factors affecting the efficiency of solid fuel combustion.
3. Parameters and indicators used to analyze heat release in solid fuel combustion.
4. Existing technologies for improving the efficiency of solid fuel combustion.

5. Environmental aspects that should be considered in the analysis of solid fuel combustion.
6. Opportunities to optimize the solid fuel combustion process to achieve maximum energy efficiency and minimum exhaust emissions.

Exergetic analysis is one of the tools for evaluating the effectiveness of thermodynamic processes. It allows us to determine the maximum possible use of energy that can be extracted from the system to perform useful work.

When exergetic analysis is applied to boilers, it helps to determine the level of energy losses associated with processes such as heat exchange, diffusion, friction and others. This makes it possible to identify problem areas that can be optimized to increase boiler efficiency.

Object and methods of research

The object of the study is a hot water boiler unit with the vertical grate of furnace.

The thermodynamic efficiency of a system at equilibrium includes:

1. Efficiency (reduces the energy conversion efficiency) is the ratio of useful energy used to energy expended. In the case of a reversible transition, efficiency can be defined as the ratio of work obtained to heat expended.
2. Thermal efficiency is the ratio of heat generated to heat consumed. In a reversible process, the thermal efficiency will be maximum and equal to unity.
3. Exergy efficiency is the ratio of released exergy (useful work) to stored exergy (expended heat). In a reversible process, the exergy efficiency will be equal to unity.

In an adiabatic process, the efficiency will be high since the system does not lose or release thermal energy.

Let us consider a method for studying technological and exergy processes based on the second law of thermodynamics. The action of these processes occurs under conditions of interaction of the system with an equilibrium environment. Environmental parameters ensure the constancy

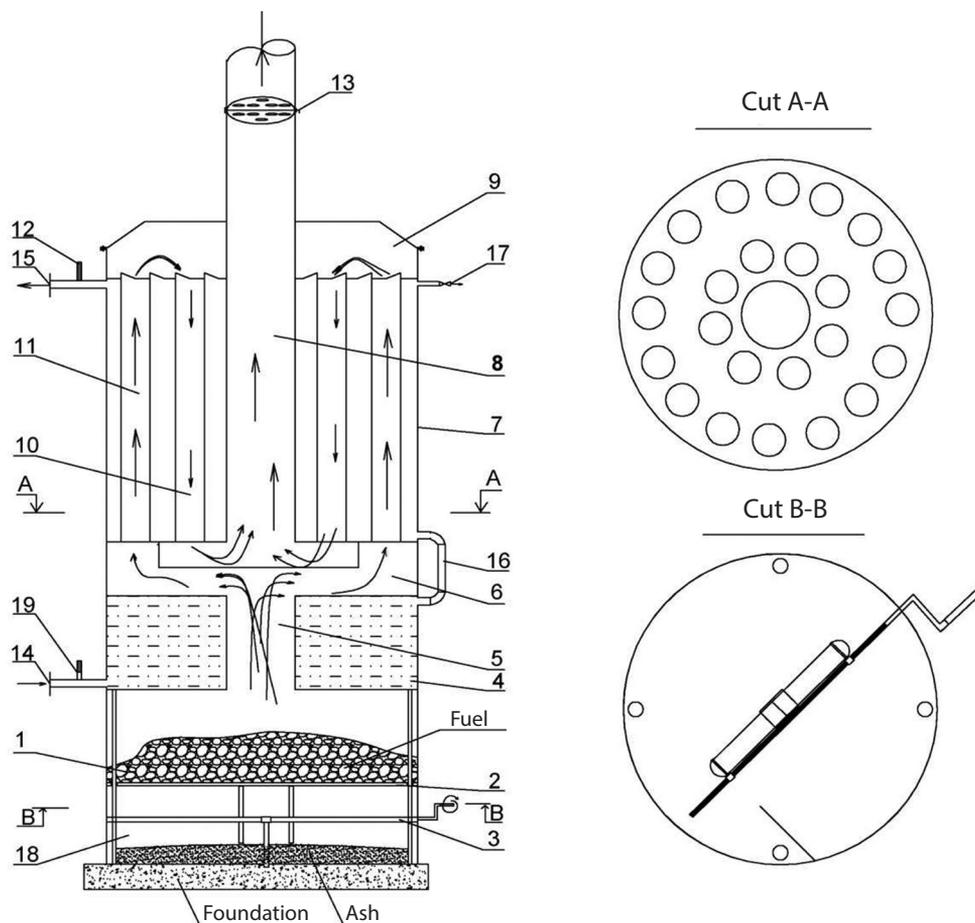


Fig. 1. Diagram of a hot-water sectional solid fuel boiler: 1 – firebox; 2 – movable grate; 3 – lifting mechanism; 4 – the beam-receiving surface (additional drum); 5 – the transition gas pipe; 6 – the lower gas distribution chamber outlet; 7 – the main drum of the boiler; 8 – the central exhaust pipe; 9 – upper gas distribution chamber; 10 – exhaust pipes with descending flows; 11 – exhaust pipes with ascending flows; 12 – thermometer; 13 – chimney with gate; 14 – cold water inlet pipe; 15 – heated water outlet pipe; 16 – transition pipe; 17 – air outlet pipe; 18 – ash pan; 19 – thermometer

Рис. 1. Схема водогрейного секционного твердотопливного котла: 1 – топка; 2 – подвижная колосниковая решетка; 3 – подъемный механизм; 4 – лучевоспринимающая поверхность (дополнительный барабан); 5 – переходная газовая труба; 6 – нижняя газораспределительная камера отводная; 7 – основной барабан котла; 8 – центральная газоотводная труба; 9 – верхняя газораспределительная камера; 10 – газоотводные трубы с нисходящими потоками; 11 – газоотводные трубы с восходящими потоками; 12 – термометр; 13 – дымоход с шибером; 14 – патрубок входа холодной воды; 15 – патрубок выхода нагретой воды; 16 – переходной патрубок; 17 – патрубок выпуска воздуха; 18 – зольник; 19 – термометр

of the thermodynamic system, and energy is converted into work. There are several types of work. To improve the efficiency of the boiler, the concept of chemical filling can be used [2–5, 10–14].

If calculate the exergy balance, you can take into account the excess lost in the process of switching between components:

$$E_{ent} = E_{ex} + \sum E_{D_i},$$

where E_{ent} is exergy supplied to the object with flows of matter and energy;

E_{ex} – exergy leaving the installation;

E_{D_i} – exergy losses.

The article discusses the equipment of a furnace with a variable volume of combustion space. Coal from the Ziddi deposit was used to produce flue gases. Their temperature was 300 K. In the mixing chamber, the combustion products were diluted

with air ($T_o = 293 K$, moisture content $d = 0.01 \text{ kg/kg}$, $p = 9.8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$). The air consumption for complete combustion of 1 kg of fuel is $46.7 \text{ m}^3/\text{kg}$ [4].

The exergy balance for the furnace is determined by the formula:

$$E_t = E_{cp} + \Delta E_{the\ env.} + \Delta E,$$

where E_t is exergy of the initial fuel $E_t = 5\ 383 \text{ kcal/kg} = 22\ 538 \text{ kJ/kg}$;

E_{cp} – exergy of combustion products in the furnace at adiabatic combustion temperature;

$\Delta E_{the\ env.}$ – exergy of the heat flow into the environment;

ΔE – total losses in the furnace.

According to calculations, the energy conversion efficiency of the furnace can be about 89 %. The operation of the furnace with a variable volume of combustion space is 15-20 % more efficient than standard furnace.

Results

Therefore, the exergy efficiency of the boiler η_{ex} characterizes the share of usefully used exergy:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{cost}}{E_{ser}} = \frac{E_{exit} - E_{redu}}{E_{entrance} - E_{redu}},$$

where E_{cost} , E_{ser} are spent and used exergy, respectively; E_{redu} – common transit exergy, that is, exergy that passes from the entrance to the equipment to its exit without participation in energy exchange processes. For the waste heat boiler in this case, the transit exergy includes the exergy of the feed water flows $E'_{v,a}$ and the air E'_{air} as well as the physical exergy of the exhaust gas flow of the soot production. The coal from the Ziddi deposit has the following characteristics of its combustion, m^3/kg : $V_o^0 = 5.51$; $V_{CO_2} = 0.915$; $V_{N_2} = 4.2$; $V_{H_2O} = 0.615$; $V_{cp} = 5.73$. For coal from the Ziddi deposit ($Q_p^n = 22500 \text{ kJ/kg}$) the exergy of coal combustion products was calculated (table 2, 3).

Let us determine the exergy of flue gases in the mixture obtained by diluting the combustion products of coal with air in the amount of $46.7 \text{ m}^3/\text{kg}$; $p = p_o = 9.8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$, $T_o = 293 K$, $W_o = 0.01 \text{ kg/kg}$ up to the temperature of the mixture $t_{sm} = 573 K$.

There were firebox characteristics using in the study:

- hearth surface was 0.2826 m^2 ;
- side surface – 0.7536 m^2 ;
- ceiling surface – 0.2703 m^2 ;
- the inner surface of the central exhaust pipe – 0.314 m^2 ;

Table 2
Таблица 2

Exergy of the coal from the Ziddi deposit
Эксергия угля Зиддинского месторождения

$V_{cp}^0, \text{ m}^3/\text{kg}$	Mole fractions			Moisture content $X_{zo}, \text{ kg/kg}$	Chemical effect of the combustion process $e0_{cp}, \text{ kJ/kg}$
	N_2	CO_2	H_2O		
6.603	0.789	0.1750	0.0983	0.0162	1046

Table 3
Таблица 3

Thermodynamic parameters of flue gas components
Термодинамические параметры компонентов дымовых газов

Substances	$V_r, \text{ m}^3/\text{kg t}$	$N_r, \text{ kmol/m}^3$	$h, \text{ kJ/kmol}$	$h_o, \text{ kJ/kmol}$	$\Delta h, \text{ kJ/kmol}$	$N\Delta h, \text{ kmol/kg t}$	$S, \text{ kJ/(kmol}\cdot\text{K)}$
CO_2	0.916	0.0412	12 519	761	11 751	478	30.43
N_2	57.20	2.551	8 789	581	8211	20 949	21.64
O_2	15.18	0.677	9 100	590	8510	5 769	22.26
H_2O	1.75	0.071	10 351	673	9672	818	25.56
Total	78.64	3.511				28 020	

- the surface of the ceiling of the flue pipe – 1.2265 m²;
- furnace volume – $1.228525 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3$.

The mass flow rate of combustion products during the combustion of 1 kg of solid fuel is determined by the dependence:

$$G_o = 1 - \frac{A^p}{100} + 1.306 \cdot \mu V^o,$$

for V [kg] fuel:

$$G = B \cdot G_o = B \left[1 - \frac{A^p}{100} + 1.306 \cdot \mu V^o \right] = f(B, \mu, V^o)$$

$$\text{or } t(x) = t_o + \exp \left[- \frac{k \pi d_{g.tr.h}}{cf(B, \mu, V^o)} x \right].$$

In the process of energy and exergy analysis of the efficiency of operation of low-power solid fuel hot water boilers by installing a movable grate, it was found that the variable volume of the furnace space, helps us to reduce fuel consumption, and also contributes to the afterburning of volatile gases and unburned pulverized fractions of coal.

The calculation showed that the efficiency of the furnace was 89 % and fuel consumption decreased by 15–20 %. Heat loss from external gases amounted to 8.8 %; heat losses from the use of mechanical fuel amounted to 17.4 %. The productivity of the boiler unit has been increased to 79–81 %. On the issue of emission of harmful substances into the atmosphere, a boiler model with removable grates and combustion technology is considered in the Set of rules 89.13330.2012¹.

Conclusion

Based on the research carried out, an urgent scientific problem has been solved – a low-power solid fuel boiler with a movable furnace and the possibility of regulating volumetric thermal voltage has been developed for use in the water heating system of detached buildings to ensure the efficiency of solid fuel combustion. The proposed boiler design ensured a minimum airflow rate for complete combustion of solid fuel in the boiler furnace and a maximum direct heat transfer coefficient in the combustion chamber. The study showed a number of findings:

1. The maximum efficiency of the proposed furnace when burning various solid fuel (coal) is established by changing the furnace space of the boiler using a movable grate, which allows us to adjust the volume of the furnace space.
2. Reducing and increasing the furnace space of a small water heater helps maintain the required boiler temperature, which leads to a reduction in the content of nitrogen oxides by 20–25 %.
3. In the course of economic research and implementation of the developed project, a small boiler with an adjustable grate water heater with a capacity of 50 kW was installed in the boarding school building. Over the period of operation, one season, compared to other existing boiler houses, cost 14 400 somoni (1.200 US dollars), which is 18 % less than the initial costs of previous years for the provision of thermal energy.

Based on the results of the study, a comprehensive automated control system for boiler operating modes will be created, providing regulation of the volume of the combustion space, air supply and removal of combustion products.

References

1. Khujaev, P. S. (2013). Kharakteristiki ugley nekotorykh mestorozhdeniy respublik Tadzhikistan. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Arkhitekturnoe obrazovanie i arkhitektura Tadzhikistana: 50 let razvitiya i sovershenstvovaniya". Dushanbe, pp. 194–199. (In Russian).

¹ SP 89.13330.2012. Kotel'nye ustanovki [Set of rules 89.13330.2012. Combustion boiler systems of heating generation]. (2012). Moscow, Minregion Rossii Publ. 100 p. (In Russian).

2. Kagan, G. M. (eds.). (1998). Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod). 3rd edition, revised. Saint Petersburg, VTI Publ., 260 p. (In Russian).
3. Khujaev, P. S., & Suleymanov, A. A. (2016). Luchistyy teploobmen v topochnom prostranstve s peremennym ob'emom. Aktual'nye problemy arkhitektury, stroitel'stva, energoeffektivnosti i ekologii – 2016 : Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v trekh tomakh, Tyumen, April, 27–29. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., 2, pp. 132-137. (In Russian).
4. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., & Sukomel, A. S. (1981). Teploperedacha. 4th edition, revised. Moscow, Energoizdat Publ., 416 p. (In Russian).
5. Rivkin, S. L., & Aleksandrov, A. A. (1984). Termodinamicheskie svoystva vody i vodyanogo para. 2nd edition, revised. Moscow, Energoatomizdat Publ., 80 p. (In Russian).
6. Roddatis, K. F. (1977). Kotel'nye ustanovki. Moscow, Energiya Publ., 432 p. (In Russian).
7. Roddatis, K. F., & Poltaretskiy, A. N. (1989). Spravochnik po kotel'nykh ustanovkam maloy proizvoditel'nosti. Moscow, Energoatomizdat Publ., 488 p. (In Russian).
8. Borshchov, D. Ya. (1989). Ustroystvo i ekspluatatsiya otopitel'nykh kotel'nykh maloy moshchnosti. 2nd edition, revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 198 p. (In Russian).
9. Sokolov, B. A. (2007). Kotel'nye ustanovki i ikh ekspluatatsiya. 2nd edition, revised. Moscow, Akademiya Publ., 432 p. (In Russian).
10. Khavanov, P. (2016). Method of calculating heat transfer in furnaces of small power. MATEC Web of Conferences : 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, IPICSE 2016, Moscow, October, 16-17. Moscow, EDP Sciences Publ., 86, pp. 04017. (In English). DOI 10.1051/mateconf/20168604017.
11. Khavanov, P. (2011). Termotechnical features of application of water-heating coppers of low power. Moscow, Vestnik MGSU Publ., (7), pp. 429-435. (In Russian).
12. Khujaev, P. S., Suleymanov, A. A., & Suleymanova, N. A. (2016). Vodogreynyy kotel maloy moshchnosti s ustanovkoy podvizhnoy kolosniyoy reshetki. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'nykh konstruktsiy: innovatsii, modernizatsiya i energoeffektivnost' v stroitel'stve". Sektsiya 5. Inzhenernye sistemy, December, 14-15. Almaty, KazGASA Publ., 1, pp. 205-209. (In Russian).
13. Khujaev, P. S., & Suleymanov, A. A. (2013). Vodogreynyy kotel maloy moshchnosti. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Arkhitekturnoe obrazovanie i arkhitektura Tadjikistana: 50 let razvitiya i sovershenstvovaniya». Dushanbe, pp. 231-236. (In Russian).
14. Khujaev, P. S., & Alanazarov, Sh. (2011). Linearizatsiya teplofizicheskikh svoystv produktov sgoraniya topliva ot temperatury. Materialy respublikanskoй nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 20-letiyu Gosudarstvennoy nezavisimosti Respubliki Tadjikistan i 55-letiyu Tadjikskogo tekhnicheskogo universiteta im. akademika M.S. Osimi. Dushanbe, pp. 451-456. (In Russian).

Information about the author

Parviz S. Khujaev, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Water Supply Systems, Heat and Gas Supply and Ventilation, Tajik Technical University named after Academician M. S. Osimi, e-mail: pkhujaev@gmail.com

Сведения об авторе

Хужаев Парвиз Саидгуфроневич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой систем водоснабжения, теплогазоснабжения и вентиляции, Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, e-mail: pkhujaev@gmail

Получена 04 октября 2023 г., одобрена 23 октября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.

Received 04 October 2023, Approved 23 October 2023, Accepted for publication 15 December 2023

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ФАКТОРА ОБНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА

С. Ю. Андреев¹, Л. В. Белова²

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

PECULIARITIES OF CALCULATING THE VALUE OF THE AIR BUBBLE SURFACE RENEWAL COEFFICIENT

Sergey Yu. Andreev¹, Larisa V. Belova²

¹ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Ресурсоемкость биологической очистки сточных вод снижается при повышении энергоэффективности применяемых в аэротенке систем пневматической аэрации. Модернизация процесса аэрации возможна при разработке адекватной математической модели, описывающей процесс массопередачи кислорода из пузырька воздуха в воду, необходимого для биологического окисления загрязнений сточных вод. Анализ существующих теоретических моделей, описывающих процесс массопередачи кислорода воздуха в воду, а именно – двухпленочной теории Льюиса – Уитмена, теории пенетрации Хигби, теории обновления деформированной поверхности пузырька П. В. Данквертса, – показал особенности их применения для газожидкостных систем. Большое значение для описания процессов массопередачи кислорода воздуха в воду при использовании пневматической системы аэрации в аэротенках имеет фактор обновления деформированной поверхности пузырьков воздуха. В турбулентном потоке при непрерывном обнов-

Abstract. The resource intensity of biological wastewater treatment is reduced by increasing the energy efficiency of the pneumatic aeration systems used in the aeration tank. Modernisation of the aeration process is possible with the development of an adequate mathematical model describing the process of mass transfer from air bubble to water the oxygen required for biological oxidation of wastewater pollutants. The analysis of the Lewis-Whitman two-film theory, Higbee's penetration theory, and P. W. Dankwerts' theory of deformed bubble surface renewal describing the process of mass transfer of air oxygen into water showed the peculiarities of their application to gas-liquid systems. The factor of renewal of deformed surface of air bubbles is of great importance for describing the processes of mass transfer of air oxygen to water when using pneumatic aeration system in aeration tanks. In turbulent flow at continuous renewal of interfacial surface created by air bubbles, there is intensification of mass transfer process due to turbulent diffusion, which is reflected in

лении межфазной поверхности, создаваемой пузырьками воздуха, происходит интенсификация процесса массопередачи за счет турбулентной диффузии, что отражается в расчетных математических зависимостях. Использование математических зависимостей, определяющих скорость массопередачи кислорода воздуха в воду через деформируемую поверхность пузырьков, формирующихся в аэрационном объеме аэротенка, позволит учесть изменение их формы, что повысит точность определения значений технологических характеристик систем пневматической аэрации.

Ключевые слова: массопередача кислорода, режим всплывания, коэффициент формы, коэффициент дисперсности, фактор обновления поверхности

Для цитирования: Андреев, С. Ю. Особенности расчета величины фактора обновления поверхности пузырьков воздуха / С. Ю. Андреев, Л. В. Белова. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-55-63. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 55–63.

For citation: Andreev, S. Yu., & Belova, L. V. (2023). Peculiarities of calculating the value of the air bubble surface renewal coefficient. *Architecture, Construction, Transport*, (4(106)), pp. 55-63. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-55-63.

Введение

Наиболее энергоемким элементом канализационных очистных станций, принимающих сточные воды, отводимые с территорий населенных пунктов, являются аэротенки, представляющие собой проточные емкостные сооружения, оборудованные системой аэрации. В связи с тем, что энергоэффективность применяемой системы аэрации в значительной степени (до 60–80 %) определяет ресурсоемкость биологической очистки сточных вод в аэротенках, актуальность задачи оптимизации процессов аэрации наряду с модернизацией конструктивных решений не вызывает сомнения. Эту задачу поможет решить математическая модель, адекватно описывающая процесс массопередачи кислорода воздуха в иловую смесь.

Разработать надежную методику расчета аэрационной системы аэротенка, способствующую

calculated mathematical dependences. The use of mathematical dependences determining the rate of mass transfer of air oxygen to water through the deformable surface of bubbles formed in the aeration volume of the aeration tank will make it possible to take into account the change in their shape. This will increase the accuracy of determining the values of technological characteristics of pneumatic aeration systems.

Key words: oxygen mass transfer, surfacing mode, shape factor, dispersibility factor, surface renewal factor

оптимизации аэрационных процессов и при этом обеспечивающую гарантированный диапазон качественных характеристик очищенных сточных вод, возможно лишь путем математического моделирования технологических процессов. Для адекватного описания различных технологических процессов, как правило, используются три основные группы математических моделей.

Эмпирические математические модели дают возможность изучать свойства объекта, измеряя его входные и выходные экспериментальные данные с последующей их обработкой математическими методами. Однако полученные аппроксимированные зависимости можно использовать только в ограниченных пределах значений технологических параметров.

Полуэмпирические математические модели создаются при помощи метода обобщения подобных процессов (методов теории подо-

бия), которые позволяют вывести безразмерные критериальные комплексы. Полуэмпирические математические модели отличаются большей универсальностью, чем эмпирические математические модели.

Теоретические (детерминированные) математические модели создаются на основе фундаментальных закономерностей изучаемых процессов. Математические модели детерминированного типа характеризуются не только большей универсальностью и адекватностью в описании обширного диапазона изменяющихся параметров исследуемого объекта, но и возможностью прогнозирования.

Объектом данного исследования являются существующие теоретические модели описания процесса массопереноса кислорода воздуха из всплывающего в чистой воде пузырька. Предмет исследования – детерминированная математическая модель, адекватно описывающая многокомпонентный процесс массопередачи кислорода воздуха в воду в режиме турбулентности.

При обзоре использованы первоисточники разработчиков теоретических моделей массопереноса, а также современные зарубежные и отечественные научные публикации. В процессе моделирования применялись такие методы общенаучного исследования, как анализ, обобщение и синтез. Всесторонний анализ классических и современных теоретических моделей процессов молекулярной и турбулентной диффузии позволил выявить новый аспект массопередачи кислорода в водовоздушной системе при аэрации в аэротенке.

Результаты

Впервые теоретическое описание процесса диффузии было предложено А. Фиком [1]. Основываясь на предположении об аналогичности физических процессов диффузии и теплопередачи, Фик модифицировал уравнение процесса теплопередачи, разработанное Фурье. Полученная закономерность позволяет установить скорость диффузионного переноса молекулярного кислорода через поверхность пузырька воздуха, всплывающего в чистой воде:

$$\frac{dM}{dt} = -DA \frac{dC}{dy}, \quad (1)$$

где $\frac{dM}{dt}$ – скорость процесса массопередачи кислорода воздуха из всплывающего в чистой воде пузырька, кг/с;

D – коэффициент молекулярной диффузии кислорода из пузырька воздуха, всплывающего в чистой воде, м²/с;

A – площадь контакта фаз воздух – вода, м²;

$\frac{dC}{dy}$ – градиент концентрации растворенного кислорода в нормальном направлении к поверхности диффузии, кг/м⁴.

Согласно уравнению (1), градиент концентрации кислорода $\frac{dC}{dy}$ в воде является движущей силой процесса массопереноса кислорода воздуха через границу раздела фаз воздух – вода.

Американские ученые А. Нойес и У. Уитни провели экспериментальные исследования по изучению закономерностей растворения твердого вещества в жидкости. Было установлено, что концентрация молекул в тонкой жидкостной пленке, образующейся на поверхности твердого вещества, равна концентрации насыщенного раствора C_n , кг/м³. В объеме жидкости, в связи с перемешиванием, была зафиксирована усредненная концентрация с определенным постоянным значением C , кг/м³.

В работе [2], отражавшей результат этих экспериментальных исследований, авторы предположили, что движущей силой процесса массопереноса молекул растворимого в жидкости твердого вещества является разность вышеуказанных концентраций C_n и C , кг/м³:

$$\Delta C = C_n - C. \quad (2)$$

В работах нобелевского лауреата В. Нернста [3] представления о теории диффузии получили дальнейшее развитие. Было доказано, что движущая сила процесса массопередачи – разность концентрации насыщенного раствора и концентрации раствора в конкретный период времени.

Опираясь на гипотезу о существовании на поверхности всплывающего в воде пузырька

ка тонкого, насыщенного кислородом воздуха слоя жидкости, В. Льюис и В. Уитмен в 1923–24 гг. разработали двухпленочную модель процесса массопередачи кислорода в воду. В [4] они представили формулу, описывающую процесс массопередачи кислорода воздуха в воду через поверхность всплывающего пузырька:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{D_{cd}}{y} A(C_n - C), \quad (3)$$

где D_{cd} – коэффициент молекулярной диффузии (псевдостационарной диффузии) кислорода в воду, m^2/c ;

y – суммарная толщина газовой и жидкостной пленки на поверхности пузырька воздуха, м;

A – площадь контакта фаз воздух – вода в аэрационном объеме, m^2 ;

C_n и C – концентрация насыщения воды кислородом воздуха и средняя величина растворенного кислорода в аэрационном объеме соответственно, $кг/м^3$.

Представление о квазистационарном характере процесса массопередачи через границу раздела фаз, на котором базируется двухпленочная модель, в работе [5] было подвергнуто критике, однако многие исследователи считают тезис Льюиса – Уитмена о том, что концентрация вещества в пленке однозначно не зависит от времени до второй производной, вполне обоснованным [6].

В экспериментальных работах ученых [7, 8] показано значительное влияние гидродинамики на процессы массопередачи. В теории пенетрации (проникновения), разработанной Р. Хигби, было высказано предположение о нестационарном характере процесса молекулярной диффузии через поверхностный слой жидкости, обтекающей всплывающий пузырек воздуха. Асимптотическое решение общего уравнения нестационарной диффузии Фика предоставило Хигби возможность вывести уравнение, определяющее скорость массопередачи газа, проникающего в жидкость:

$$\frac{dM}{dt} = 2 \sqrt{\frac{D_{нд} V_n}{\pi d_n}} A(C_n - C), \quad (4)$$

где $D_{нд}$ – коэффициент нестационарной молекулярной диффузии, величина которого отличается от величины коэффициента стационарной молекулярной диффузии D_{cd} , m^2/c ,

V_n – средняя скорость всплывания пузырька воздуха, м/с,

d_n – средняя величина диаметра пузырька воздуха, м.

Реальность движущихся поверхностных пленок на границе раздела фаз всплывающего пузырька была отвергнута П. В. Данквертсом, автором теории турбулентной диффузии [9]. Он обосновал гипотезу об обновлении поверхности такого пузырька новым объемом жидкости под воздействием турбулентных пульсаций скорости движущегося потока. Им впервые был введен в уравнение скорости массопередачи фактор обновления поверхности:

$$\frac{dM}{dt} = A \sqrt{D_{тд} S} (C_n - C), \quad (5)$$

где $D_{тд}$ – коэффициент турбулентной диффузии, m^2/c , величина которого отличается от значений коэффициентов D_{cd} и $D_{нд}$, используемых в теориях Льюиса – Уитмена и Хигби;

S – фактор обновления поверхности всплывающего в турбулентном режиме пузырька воздуха, величина которого определяется как доля поверхности, обновляемой в единицу времени, c^{-1} .

Теория обновления поверхности Хигби – Данкверста получила дальнейшее развитие в трудах М. Х. Кишиневского, который внес большой вклад в теорию массообмена, расширил кинетические характеристики диффузионного процесса, ввел коэффициент конвективной диффузии [10].

На основе детального анализа представленных теорий Льюиса – Уитмена, Хигби и Данквертса авторами [11] было сделано заключение о возможности их использования для процессов массопередачи кислорода воздуха через межфазную поверхность движущихся в различных гидравлических режимах пузырьков воздуха.

Режим всплывания пузырька воздуха диаметром d_n , м, движущегося относительно слоя воды, значение кинематического коэффициента

вязкости которой имеет величину ν , м²/с, со скоростью V_n , м/с, определяется значением критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}. \quad (6)$$

Теория Льюиса – Уитмена описывает псевдостационарный режим молекулярной диффузии кислорода воздуха через неподвижный пограничный слой пузырька воздуха, имеющего строго сферическую форму и всплывающего в ламинарном режиме. Такой режим также называют стоковским, областью вязкого обтекания, областью ползущего течения. Ламинарный режим всплывания пузырька воздуха в отличие от всплывания твердой сферы сохраняется вплоть до значений критерия Рейнольдса $Re = 20$ [12, 13].

Теория Хигби рассматривает массопередачу посредством нестационарной молекулярной диффузии через движущийся пограничный слой на поверхности всплывающих сферических пузырьков воздуха в режимах со скользящим пристеночным слоем жидкости, наблюдаемом при значениях чисел Рейнольдса $20 < Re \leq 500$ [11].

Концепция Данквертса относительно процесса турбулентной диффузии кислорода воздуха включает положение о том, что воздействие турбулентных пульсаций набегающего потока жидкости приводит к стабильному обновлению поверхности пузырьков воздуха, приобретающих форму вогнутого эллипсоида или выпукловогнутой линзы.

Различают два вида турбулентного режима всплывания пузырьков воздуха:

1. Турбулентный режим всплывания пузырьков воздуха диаметром $1.4 \text{ мм} < d_n \leq 5 \text{ мм}$, всплывающих в воде при числах Рейнольдса $500 < Re < 1100$.
2. Турбулентный режим всплывания пузырьков воздуха диаметром $d_n > 5 \text{ мм}$, всплывающих в воде при числах Рейнольдса $Re > 1100$ в автомодельной области квадратичного закона сопротивления.

Получившие широкое распространение на сооружениях биологической очистки сточных вод мелкопузырчатые пневматические аэраторы позволяют формировать в аэрационном объеме

аэротенка деформированные пузырьки воздуха со средней величиной диаметра $d_n = 2 - 5 \text{ мм}$ [6, 14–17].

Для описания процесса работы этих аэраторов может быть использована теория обновления поверхности пузырьков П. В. Данквертса [18].

Ввиду сложности обработки данных натуральных экспериментов, связанной с точностью измерений деформируемой поверхности всплывающих пузырьков воздуха в период аэрации, до сих пор отсутствует методика корректного расчета величины фактора обновления поверхности S , с⁻¹, для турбулентных режимов. На практике при описании процесса работы мелкопузырчатых аэрационных систем принимается допущение о том, что мелкопузырчатые аэраторы формируют в аэрационном объеме аэротенка пузырьки воздуха строго сферической формы со средним диаметром d_n , м, всплывающих со скоростью V_n , м/с. Значения скорости массопередачи кислорода воздуха для всплывающих пузырьков сферической конфигурации устанавливаются по формуле Хигби (4).

В работах Данквертса не рассматриваются значения величины S в качестве численных выражений. В исследовании моделирования аэрационных сооружений для очистки сточных вод, проведенном Л. Н. Брагинским, М. А. Евилевичем и др., был проанализирован фактор обновления поверхности всплывающего пузырька, сделано предположение о связи этого процесса с поверхностным натяжением на границе раздела фаз и осуществлена попытка определить значение фактора путем анализа баланса энергий [16].

Решить проблему определения величины фактора обновления поверхности деформированных пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентных режимах, S , с⁻¹, помогает термодинамический подход, который определяет общие закономерности и направления протекания рассматриваемых процессов.

Степень интенсивности процесса обновления поверхности раздела фаз воздух – вода S , с⁻¹, устанавливается путем соотношения величины элементарной секундной работы (мощности) $N_{\Delta p}$, Дж/с, Вт, которая происходит под влиянием силы

избыточного давления воздуха внутри пузырька $F_{\Delta P}$, Н, и величины потенциальной энергии $E_{\Delta P}$, Дж, избыточного давления внутри пузырька воздуха ΔP , Па:

$$S = \frac{N_{\Delta P}}{E_{\Delta P}}. \quad (7)$$

Величина элементарной секундной работы определяется формулой:

$$N_{\Delta P} = \frac{F_{\Delta P} \Delta l}{\Delta T} = F_{\Delta P} V_n = \Delta P \omega_n V_n, \quad (8)$$

где $F_{\Delta P}$ – сила избыточного давления воздуха внутри всплывающего пузырька, Н;

Δl – элементарное расстояние, которое преодолевает пузырек, всплывающий со средней скоростью V_n , м/с, за элементарное время ΔT , с;

ΔP – избыточное давление воздуха внутри пузырька, Па;

ω_n – площадь поперечного сечения пузырька воздуха, м².

Определение значений величины потенциальной энергии избыточного давления воздуха внутри пузырька, Дж, определяется по формуле:

$$E_{\Delta P} = \Delta P W_n, \quad (9)$$

где W_n – объем пузырька воздуха, м³.

Соответственно, величина фактора обновления поверхности деформированных пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентных режимах, устанавливается уравнением:

$$S = \frac{N_{\Delta P}}{E_{\Delta P}} = \frac{\Delta P \omega_n V_n}{\Delta P W_n} = \frac{\omega_n V_n}{W_n}. \quad (10)$$

Представленное уравнение (10), описывающее фактор обновления межфазной поверхности пузырьков воздуха, движущихся в турбулентных потоках, предлагается усовершенствовать, введя коэффициенты, учитывающие деформацию и изменение формы этих всплывающих пузырьков.

Для описания деформированных пузырьков воздуха вводятся геометрические характеристики, а именно – коэффициенты формы, дисперсности и дисперсного размера:

1. Коэффициент формы K_ϕ определяется как отношение площади внешней поверхности деформированного пузырька воздуха f_n , м², к максимальной площади его поперечного сечения ω_n , м²:

$$K_\phi = \frac{f_n}{\omega_n}. \quad (11)$$

2. Дисперсный размер воздушного пузыря δ_n , м, определяется как отношение объема пузырька W_n , м³, к площади его внешней поверхности, f_n , м²:

$$\delta_n = \frac{W_n}{f_n}. \quad (12)$$

3. Коэффициент степени дисперсности воздушного пузыря K_d определяется как отношение диаметра пузырька воздуха d_n , м, к его дисперсному размеру δ_n , м:

$$K_d = \frac{d_n}{\delta_n}. \quad (13)$$

Учитывая (11), (12) и (13), величину фактора обновления поверхности всплывающих деформированных пузырьков воздуха – формулу (10) – можно записать в виде:

$$S = \frac{\omega_n V_n}{W_n} = \frac{f_n}{K_\phi} \frac{1}{\delta_n f_n} V_n = \frac{K_d V_n}{K_\phi d_n}. \quad (14)$$

Выведенная формула (14) позволяет формулу (5) записать следующим образом:

$$\frac{dM}{dt} = \sqrt{D_{TD} \frac{K_d V_n}{K_\phi d_n}} A (C_n - C). \quad (15)$$

Предложенная формула (15) рекомендована для описания процесса массопередачи кислорода из воздушного пузырька в воду для турбулентных режимов движения воздуха. В отличие от формулы Хигби (4) она учитывает изменение их формы путем введения отношения коэффициентов $\frac{K_d}{K_\phi}$, что позволяет более корректно описывать процесс работы мелкопузырчатых пневматических аэраторов и может использоваться для технологических расчетов.

Выводы

Проведенный обзор классических теорий, описывающих процесс массопередачи кислорода воздуха в воду, – двухпленочной теории Льюиса – Уитмена, теории пенетрации Хигби, теории обновления деформированной поверхности пузырька П. В. Данквертса, – позволяет сделать некоторые выводы.

1. На основе результатов исследований было сделано предположение о том, что основные теории диффузии, предусматривающие использование коэффициентов стационарной диффузии $D_{сд}$, нестационарной диффузии $D_{нд}$, турбулентной диффузии $D_{тд}$, m^2/c , можно использовать для описания процессов массопередачи кислорода воздуха в воду из пузырьков, всплывающих в воде в ламинарном режиме, в режиме со скользящим пограничным слоем жидкости, в турбулентном режиме.
2. При расчете пневматических систем аэрации из-за отсутствия методики корректного расчета величины фактора обновления деформированной поверхности пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентных режимах, впервые представленной в теории

П. В. Данквертса, используются положения теории пенетрации Хигби.

3. Для определения величины фактора обновления поверхности деформированных пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентных режимах S, c^{-1} , предложено применять термодинамический подход. Степень интенсивности процесса обновления поверхности раздела фаз *воздух – вода* устанавливается соотношением величины элементарной секундной работы (мощности) $N_{\Delta P}$, Дж/с, Вт, совершаемой силой избыточного давления воздуха внутри пузырька $F_{\Delta P}$, Н, и величины потенциальной энергии $E_{\Delta P}$, Дж, избыточного давления внутри пузырька воздуха ΔP , Па.
4. С использованием метода анализа размерностей получено уравнение, описывающее процесс массопередачи кислорода воздуха в воду из пузырьков, всплывающих в турбулентных режимах, в котором, в отличие от формулы Хигби, учитывается эффект изменения формы деформированных пузырьков путем введения отношения коэффициента дисперсности K_d и коэффициента формы K_ϕ , что позволяет более корректно описывать процесс работы пневматических систем аэрации.

Библиографический список

1. Fick, A. On liquid diffusion / A. Fick. – London : Taylor & Francis, 1855. – 39 p. – Текст : непосредственный.
2. Noyes, A. A. The rate of solution of solid substances in their own solutions / A. A. Noyes, W. R. Whitney. – DOI 10.1021/ja02086a003. – Текст : непосредственный // Journal of the American Chemical Society. – 1897. – Vol. 19, No. 12. – P. 930–934.
3. Nernst, W. Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit in heterogenen Systemen / W. Nernst. – DOI 10.1515/zpch-1904-4704. – Текст : непосредственный // Zeitschrift für Physikalische Chemie. – 1904. – Vol. 47U, No. 1. – P. 52–55.
4. Lewis, W. K. Principles of Gas Absorption / W. K. Lewis, W. G. Whitman. – DOI 10.1021/ie50180a002. – Текст : непосредственный // Industrial & Engineering Chemistry. – 1924. – Vol. 16, No. 12. – P. 1215–1220.
5. Higbie, R. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure / R. Higbie. – Текст : непосредственный // AIChE Journal. – 1935. – Vol. 31. – P. 365–389.
6. Попкович, Г. С. Системы аэрации сточных вод / Г. С. Попкович, Б. Н. Репин. – Москва: Стройиздат, 1986. – 133 с. – Текст : непосредственный.
7. Pan, Yu. A new approach to estimating oxygen off-gas fraction and dynamic alpha factor in aeration systems using hybrid machine learning and mechanistic models / Yu. Pan, M. Dagnew. – DOI 10.1016/j.jwpe.2022.102924. – Текст : электронный // Journal of Water Process Engineering. – 2022. – No. 48, 102924. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714422003683> (дата обращения: 23.10.2023).
8. Modelling oxygen transfer using dynamic alpha factors / L.-M. Jiang, M. Garrido-Baserba, D. Nolasco [et al.]. – DOI 10.1016/j.watres.2017.07.032. – Текст : электронный // Water Research. – 2017. – No. 124. – P. 139–148. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313541730605X> (дата обращения: 23.10.2023).

9. Danckwerts, P. V. Significance of liquid-film coefficients in gas absorption / P. V. Danckwerts. – Текст : непосредственный // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1951. – Vol. 43, No. 6. – P. 1460–1467.
10. Кишиневский, М. Х. Исследование тепло- и массообмена / М. Х. Кишиневский, Т. С. Корниенко. – Кишинев : Карта молдовеняскэ, 1967. – 16 с. – Текст : непосредственный.
11. Andreev, S. Y. Evaluating the patterns of air bubble rise in water-air mixtures used in natural and waste water treatment processes / S. Y. Andreev, I. A. Garkina, M. I. Yakhkind. – DOI 10.1088/1757-899X/687/6/066054. – Текст : электронный // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety*. – Chelyabinsk : Institute of Physics Publishing, 2019. – Vol. 687, 6. – P. 066054.
12. Deryagin, B. V. Kinetic theory of the flotation of small particles / B. V. Deryagin, S. S. Dukhin, N. N. Rulev. – DOI 10.1070/RC1982V051N01ABEH002791. – Текст : непосредственный // *Russian Chemical Reviews*. – 1982. – No. 51. – P. 92–118.
13. Okazaki, S. The velocity of ascending air bubbles in aqueous solution of a surface active substance and the life of the bubble on the same solution / S. Okazaki. – Текст : непосредственный // *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. – 1964. – No. 37. – P. 144–150.
14. Мешенгиссер, Ю. М. Теоретическое обоснование и разработка новых полимерных аэраторов для биологической очистки сточных вод : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : автореферат диссертации на соискание доктора технических наук / Ю. М. Мешенгиссер. – Москва : НИИ ВОДГЕО, 2005. – 48 с. – Текст : непосредственный.
15. Худенко, Б. М. Аэраторы для очистки сточных вод / Б. М. Худенко, Е. А. Шпирт. – Москва : Стройиздат, 1973. – 112 с. – Текст : непосредственный.
16. Брагинский, Л. Н. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод / Л. Н. Брагинский, М. А. Евилевич, В. И. Бегачев. – Ленинград : Химия, 1980. – 144 с. – Текст : непосредственный.
17. Караичев, И. Е. Совершенствование методов расчета аэрации водных объектов : специальность 05.23.16 «Гидравлика и инженерная гидрология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. Е. Караичев. – Москва, 2019. – 23 с.
18. Horvath, I. R. A surface renewal model for unsteady-state mass transfer using the generalized Danckwerts age distribution function / I. R. Horvath, S. G. Chatterjee. – DOI 10.1098/rsos.172423. – Текст : электронный // *The Royal Society Publishing*. – 2018. – No. 5. – URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.172423> (дата обращения: 23.10.2023).

References

1. Fick, A. (1855). On Liquid Diffusion. London, Publ. Taylor & Francis, 39 p. (In English).
2. Noyes, A. A., & Whitney, W. R. (1897). The rate of solution of solid substances in their own solutions. *Journal of the American Chemical Society*, 19(12), pp. 930-934. (In English). DOI 10.1021/ja02086a003.
3. Nernst, W. (1904). Theory of reaction rates in heterogeneous systems [Theorie der Reaktionsgeschwindigkeit in heterogenen Systemen]. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 47U(1), pp. 52-55. (In German). DOI 10.1515/zpch-1904-4704.
4. Lewis, W. K., & Whitman, W. G. (1924). Principles of Gas Absorption. *Industrial & Engineering Chemistry*, 16(12), 1215-1220. (In English). DOI 10.1021/ie50180a002.
5. Higbie, R. (1935). The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid during Short Periods of Exposure. *AIChE Journal*, 31, 365-389. (In English).
6. Popkovich, G. S., & Repin, B. N. (1986). *Sistemy aeratsii stochnykh vod*. Moscow, Stroyizdat Publ., 133 p. (In Russian).
7. Pan, Yu., & Dagnew, M. (2022). A new approach to estimating oxygen off-gas fraction and dynamic alpha factor in aeration systems using hybrid machine learning and mechanistic models. *Journal of Water Process Engineering*, 48:102924. (In English). DOI 10.1016/j.jwpe.2022.102924. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714422003683> (accessed 23.10.2023).
8. Jiang, L.-M., Garrido-Baserba, M., Nolasco, D., Al-Omari, A., DeClippeleir, H., Murthy, S., & Rosso, D. (2017). Modelling oxygen transfer using dynamic alpha factors. *Water Research*, (124), pp. 139-148. (In English). DOI 10.1016/j.watres.2017.07.032. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313541730605X> (accessed 23.10.2023).
9. Danckwerts, P. V. (1951). Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. *Industrial & Engineering Chemistry*, 43(6), pp. 1460-1467. (In English).

10. Kishinevskiy, M. Kh., & Kornienko, T. S. (1967). Issledovanie teplo- i massoobmena. Kishinev, Kartya moldovenyaske Publ., 16 p. (In Russian).
11. Andreev, S. Y., Garkina, I. A., & Yakhkind, M. I. (2019). Evaluating the patterns of air bubble rise in water-air mixtures used in natural and waste water treatment processes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Chelyabinsk, Institute of Physics Publ., 687(6), P. 066054. (In English). DOI 10.1088/1757-899X/687/6/066054.
12. Deryagin, B. V., Dukhin, S. S., & Rulev, N. N. (1982). Kinetic theory of the flotation of small particles. Russian Chemical Reviews, (51), pp. 92-118. (In English). DOI 10.1070/RC1982V051N01ABEH002791.
13. Okazaki, S. (1964). The velocity of ascending air bubbles in aqueous solution of a surface active substance and the life of the bubble on the same solution. Bulletin of the Chemical Society of Japan, (37), pp. 144-150. (In English).
14. Meshengisser, Yu. M. (2005). Teoreticheskoe obosnovanie i razrabotka novykh polimernykh aeratorov dlya biologicheskoy ochistki stochnykh vod. Avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk. Moscow, NII VODGEO, 48 p. (In Russian).
15. Khudenko, B. M., & Shpirt, E. A. (1973). Aeratory dlya ochistki stochnykh vod. Moscow, Stroyizdat Publ., 112 p. (In Russian).
16. Braginskiy, L. N., Evilevich, M. A., & Begachev, V. I. (1980). Modelirovanie aeratsionnykh sooruzheniy dlya ochistki stochnykh vod. Leningrad, Khimiya Publ., 144 p. (In Russian).
17. Karaichev, I. E. (2019). Sovershenstvovanie metodov rascheta aeratsii vodnykh ob"ektov. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 23 p. (In Russian).
18. Horvath, I. R., & Chatterjee, S. G. (2018). A surface renewal model for unsteady-state mass transfer using the generalized Danckwerts age distribution function. The Royal Society Publishing, (5). (In English). DOI 10.1098/rsos.172423. Available at: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.172423> (accessed 23.10.2023).

Сведения об авторах

Андреев Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и гидротехники, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, e-mail: andreev3007@rambler.ru

Белова Лариса Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, заведующая кафедрой начертательной геометрии и графики, Тюменский индустриальный университет, e-mail: belovalv@tyuiu.ru

Information about the authors

Sergey Yu. Andreev, D. Sc. in Engineering, Professor, Professor at the Department of Water Supply, Water Dump and Hydraulic Engineering, Penza State University of Architecture and Construction, e-mail: andreev3007@rambler.ru

Larisa V. Belova, Cand. Sc. In Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering Systems and Structures, Head of the Department of Descriptive Geometry and Graphics, Industrial University of Tyumen, e-mail: belovalv@tyuiu.ru

*Получена 12 ноября 2023 г., одобрена 08 декабря 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 12 November 2023, Approved 08 December 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

ОБ АКТУАЛЬНОСТИ РАЗРАБОТКИ СПРАВОЧНЫХ ПОСОБИЙ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ИЗНОШЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

О. А. Продоус¹, Д. И. Шлычков², А. А. Шестаков², А. Г. Челоненко²

¹ Независимый эксперт по водоснабжению и канализации, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

THE RELEVANCE OF REVISING REFERENCE MANUALS ON HYDRAULIC CALCULATION OF WORN-OUT ENGINEERING NETWORKS OF URBAN INFRASTRUCTURE

Oleg A. Prodous¹, Dmitry I. Schlychkov², Aleksandr A. Shestakov², Andrey G. Chelonenko²

¹ Independent expert in Water Supply and Sewerage, St. Petersburg, Russia

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Аннотация. При проектировании и реконструкции инженерных сетей городской инфраструктуры проектные организации для гидравлического расчета трубопроводов используют набор классических формул, которые не учитывают изменения гидравлического потенциала в процессе эксплуатации, что приводит к значительным погрешностям. Этим обоснована необходимость разработки и уточнения справочных пособий по гидравлическому расчету изношенных металлических водопроводных, канализационных и тепловых сетей городской инфраструктуры. На конкретном примере графически продемонстрировано влияние толщины слоя внутренних отложений на точность гидравлического расчета труб, то есть на определение параметров их гидрав-

Abstract. When designing and reconstructing engineering networks of urban infrastructure, design organizations use a set of classical formulas for hydraulic calculation of pipelines. They don't take into account changes in hydraulic potential during operation, and it leads to significant errors. This justifies the need to develop and refine reference manuals for hydraulic calculation of worn-out metal water supply, sewerage and heating networks of urban infrastructure. A specific example graphically demonstrates the influence of the thickness of the layer of internal deposits on the accuracy of the hydraulic calculation of pipes, i.e. on the determination of the parameters of their hydraulic potential. Based on the proposed methods of hydraulic calculation of pipes, we proved the

лического потенциала. На основе предлагаемых методик гидравлического расчета труб доказана актуальность доработки специальных справочных пособий, учитывающих фактические изменения значений гидравлических характеристик металлических трубопроводов в процессе их эксплуатации, в частности, значение коэффициента гидравлической эффективности трубопровода.

Ключевые слова: водопроводы из стальных труб, гидравлический расчет, толщина слоя внутренних отложений, точность гидравлического расчета труб

Для цитирования: Об актуальности разработки справочных пособий по гидравлическому расчету изношенных инженерных сетей городской инфраструктуры / О. А. Проодоус, Д. И. Шлычков, А. А. Шестаков, А. Г. Челоненко. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-64-70. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 64–70.

For citation: Prodous, O. A., Schlychkov, D. I., Shestakov, A. A., & Chelonenko, A. G. (2023). The relevance of revising reference manuals on hydraulic calculation of worn-out engineering networks of urban infrastructure. Architecture, Construction, Transport, (4(106)), pp. 64-70. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-64-70.

Введение

Образование внутренних отложений на стенках металлических водопроводов связано с электромагнитными процессами, протекающими в природной воде. Слой внутренних отложений на рабочей поверхности труб не имеет законченной фиксированной структуры, так как она зависит от физико-химического состава питьевой воды и длительности эксплуатации трубопровода.

Износ водопроводной сети – состояние внутренней поверхности труб (из любого материала), характеризующее значениями фактических характеристик их гидравлического потенциала: $d_{\text{вн}}^{\phi}$, V_{ϕ} , i_{ϕ} [1, 2]. Гидравлический потенциал труб – оценочный эксплуатационный критерий, характеризующий совокупностью значений расхода q , л/с, давления PN, МПа, фактической скорости движения жидкости V_{ϕ} , м/с, и фактических потерь напора на преодоление сопротивлений по длине h_l^{ϕ} , м ($h_l^{\phi} = i_{\phi} \cdot l$, м, при $l = 1$ п. м $h_l^{\phi} = i_{\phi}$, м).

При эксплуатации инженерных сетей городской инфраструктуры из металлических труб (се-

relevance of revise the special reference manuals with taking into account actual changes in the values of hydraulic characteristics of metal pipelines in the process of their operation, in particular, the value of the coefficient of hydraulic efficiency of the pipeline.

Key words: water pipes made of steel and cast iron pipes, hydraulic calculation, thickness of the layer of internal deposits, accuracy of hydraulic calculation of pipes

тей водопровода, канализации, тепловых сетей) на их внутренней поверхности образуется слой отложений, изменяющий значение характеристик гидравлического потенциала труб: фактического внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}^{\phi}$, фактической скорости движения жидкости V_{ϕ} и фактических потерь напора по длине труб h_l , характеризующих их гидравлическим уклоном i_{ϕ} ($h_l = i_{\phi} \cdot l$, м, при $l = i_{\phi}$).

На рис. 1 приведены фрагменты стальных труб с внутренними отложениями в водопроводных, канализационных и тепловых сетях городской инфраструктуры.

Согласно [3], слой отложений δ_{ϕ} на внутренних стенках труб не является постоянной величиной и изменяется по толщине во времени, зависит от качества транспортируемой по трубам среды, скоростного режима эксплуатации и величины заряда частиц молекул воды. Это характерно как для напорных металлических труб, так и для напорных коллекторов [4–6].

Вопросы гидравлического расчета и способы предотвращения образования внутренних

a)



b)



c)



Рис. 1. Фрагменты внутренних отложений на водопроводных (а), канализационных (б), тепловых (с) сетях

Fig. 1. Fragments of internal deposits on water supply (a), sewerage (b), heating (c) networks

отложений на стенках водопроводных труб рассматривались профессором Ф. А. Шевелевым в 1953 г. [7], канд. техн. наук Б. Л. Рейзиным в 1979 г. [8] и другими учеными. Таблицы для гидравлического расчета металлических водопроводных труб, разработанные Ф. А. Шевелевым по резуль-

татам проведенных исследований, используются проектными организациями до сих пор. Анализ значений из справочных пособий Ф. А. Шевелева [9] показал, что в отдельных случаях эти значения имеют расхождение с фактическими показателями до 20 % [3].

Авторы статьи, опираясь на результаты анализа зависимости потери напора по длине [10], объясняют такое несоответствие тем, что Ф. А. Шевелев проводил исследования неновых стальных водопроводных труб с толщиной фактического слоя внутренних отложений $\delta_\phi = 1$ мм. Результаты гидравлических исследований были обобщены и распространены на весь сортамент труб.

Сравнительный анализ характеристик гидравлического потенциала изношенных металлических водопроводных труб [11] показал, что в своих исследованиях Ф. А. Шевелев не учитывал влияние изменяющейся во времени толщины слоя внутренних отложений δ_ϕ , оказывающей основное влияние на результат гидравлического расчета труб, то есть на значение фактических потерь напора h , на сопротивление по длине. В связи с этим в 2021 г. коллективом ученых из Санкт-Петербурга было разработано и выпущено первое издание Справочного пособия для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями [12]. Пособие составлено по уточненной авторами формуле Ф. А. Шевелева, учитывающей фактическое (измеренное) значение δ_ϕ , входящее в расчетную зависимость, имеющую вид:

$$i_\phi = 0.00107 \frac{V_\phi^2}{(d_{\text{вн}}^\phi)^{1.3}} = 0.00107 \frac{V_\phi^2}{[(d_n - 2S_p) - 2\delta_\phi]^{1.3}}, \text{ мм/м} \quad (1)$$

где V_ϕ – фактическая скорость движения воды в трубе с отложениями, м/с,

d_n – наружный диаметр трубы согласно ГОСТу, м;

S_p – толщина стенки трубы по согласно ГОСТу, м;

δ_ϕ – фактическая толщина слоя внутренних отложений в трубе, м.

В справочном пособии [12] приведены таблицы с гидравлическими параметрами для всех выпускаемых диаметров металлических труб с толщиной слоя внутренних отложений до 30 мм включительно.

Таблица 1
Table 1

Сравнение значений гидравлических характеристик труб по разным расчетным зависимостям при толщине слоя отложений 17 мм
Comparison of values of hydraulic characteristics of pipes according to different calculation dependences at 17 mm thickness of deposit layer

Значения характеристик гидравлического потенциала электросварных водопроводных труб диаметром $d_n = 325$ мм		
по справочному пособию [9] (Ш)		
$d_{вн}^{\phi(Ш)} *$, м	$V_{\phi}^{(Ш)} *$, м / с	$1000 i_{\phi}^{Ш}$, мм / м
0.309	1.58	12.2
по справочному пособию [12] (П)		
$d_{вн}^{\phi(П)} *$, м	$V_{\phi}^{(П)} *$, м / с	$1000 i_{\phi}^{П}$, мм / м
0.277	1.96	20.61

Так как при гидравлическом расчете металлических инженерных сетей по формуле Ф. А. Шевелева не учитывается фактический слой отложений, что ведет к погрешностям, авторы считают необходимым уточнить характеристики гидравлического потенциала труб и при расчете учитывать значение гидравлического коэффициента эффективности эксплуатации трубопровода $K_{эф}$, зависящего от фактической толщины слоя внутренних отложений δ_{ϕ} . По величине этого коэффициента можно будет объективно судить о необходимости дальнейшего использования металлических труб, имеющих $K_{эф} \leq 0.8$. Это позволит сократить срок разработки проектов реконструкции трубопроводов из стали и серого чугуна.

Объект и методы исследования

На конкретном примере сравним значения характеристик гидравлического потенциала труб. Проанализируем значения гидравлических характеристик водопроводных электросварных труб по ГОСТ 10704-91¹ диаметром $d_n = 325$ мм ($S_p = 7.0$ мм) по справочным пособиям [9] и [12]. Построим для сравнения графики зависимости $i_{\phi} = f(\delta_{\phi})$ и рассчитаем процент расхождения характеристик гидравлического потенциала для сравниваемых труб. Расход $q = 120$ л/с (0.120 м³/с). Толщина слоя отложений в трубах – 17 мм (0.017 м).

В таблице 1 приведены гидравлические характеристики труб при толщине отложений 17 мм.

Результаты и обсуждение

По справочному пособию [12] определяют значения фактического внутреннего диаметра труб $d_{вн}^{\phi}$, фактической скорости V_{ϕ} и фактического гидравлического уклона i_{ϕ} . Результаты значений гидравлических характеристик труб для заданных условий задачи представлены в таблице 1.

$$*d_{вн}^{\phi} = (d_n - 2S_p) - 2\delta_{\phi}, \quad (2)$$

$$V_{\phi} = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot (d_{вн}^{\phi})^2}, \quad (3)$$

$$i_{\phi} = 0.00107 \frac{V_{\phi}^2}{\pi \cdot (d_{вн}^{\phi})^{1.3}}. \quad (4)$$

Для приведенного примера большое расхождение значений характеристик труб (таблица 1) может быть подтверждено графиком зависимости $i_{\phi} = f(\delta_{\phi})$ (рис. 2), построенным по данным таблицы 2 для разной толщины слоя отложений δ_{ϕ} .

Графики зависимости $i_{\phi} = f(\delta_{\phi})$ подтверждают необходимость обязательного учета при гидравлическом расчете фактической толщины слоя внутренних отложений в металлических трубопроводах инженерных сетей.

Анализ значений характеристик труб, приведенных в таблице 2, показывает их существенное расхождение, что объясняется неучетом величины

¹ ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент = Electrically welded steel line-weld tubes. Range : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 15.11.91 № 1743 : взамен ГОСТ 10704-76 : дата введения 1993-01-01 / разработан и внесен Министерством металлургии СССР. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001409> (дата обращения: 02.09.2023).

Таблица 2
Table 2

Изменение значений характеристик труб при разных значениях δ_ϕ
Variation of values of pipe characteristics at different values of δ_ϕ

Толщина слоя отложений δ_ϕ , мм	Сравнение результатов расчета характеристик труб по разным справочным пособиям					
	$d_{вн}^{\phi(Ш)}$, м	$V_\phi^{(Ш)}$, м/с	$i_\phi^{Ш}$, мм/м	$d_{вн}^{\phi(П)}$, м	$V_\phi^{(П)}$, м/с	$i_\phi^{П}$, мм/м
0	0.311	1.58	0.01399	0.311	1.58	0.01399
5	0.309	1.69	0.01407	0.301	1.69	0.01456
10	0.309	0.81	0.01614	0.291	1.81	0.01745
15	0.309	1.94	0.01854	0.281	1.94	0.02097
20	0.309	2.08	0.02131	0.271	2.08	0.02527

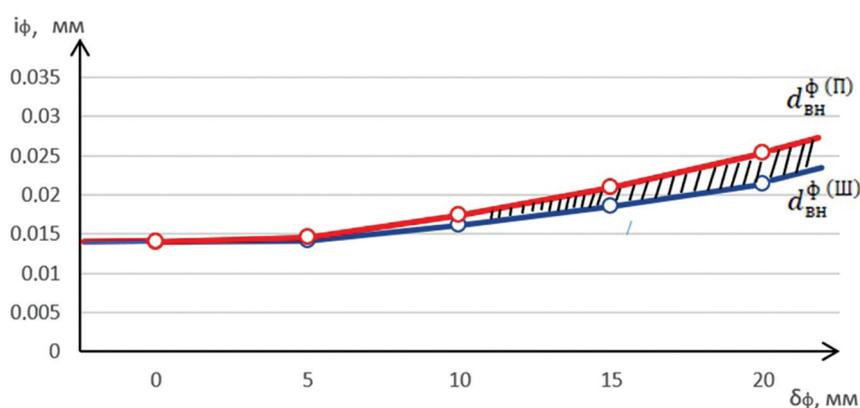


Рис. 2. График зависимости $i_\phi = f(\delta_\phi)$ для трубы $d_n = 325$ мм
Fig. 2. Dependence diagram $i_\phi = f(\delta_\phi)$ for pipe $d_n = 325$ mm

значения $\delta_\phi > 1.0$ мм при расчете по формуле (3).

Таким образом, можно утверждать, что гидравлический расчет напорных сетей водоснабжения, канализации и тепловых сетей из металлических труб должен производиться по формулам, учитывающим изменение величины их фактического внутреннего диаметра, который изменяется в процессе эксплуатации за счет образования слоя внутренних отложений в трубах (рис. 1) [13, 14].

Изменение фактического внутреннего диаметра труб $d_{вн}^{\phi}$ приводит к увеличению фактической скорости движения жидкости V_ϕ и, как следствие, увеличению потерь напора на сопротивление по длине h_l (повышению энергопотребления насосного оборудования) [15–17].

Выводы

Использование для гидравлического расчета ненормированных металлических водопроводных

труб формулы профессора Ф. А. Шевелева (формулы (3)) приводит к погрешностям. Для рассмотренной в данном исследовании задачи они составили 3.5–18.6 % в зависимости от скорости движения жидкости. Поэтому авторами рекомендовано:

- провести специальные НИР, целью которых будет разработка методики гидравлической оценки эффективности эксплуатации инженерных сетей городской инфраструктуры для принятия обоснованного решения о выводе из эксплуатации конкретного участка сети;
- доработать существующие справочные пособия для проектных и эксплуатирующих организаций по гидравлическому расчету металлических водопроводных, канализационных и тепловых сетей с внутренними отложениями с возможностью прогнозирования остаточного периода их эксплуатации.

Библиографический список

1. Продоус, О. А. Особенности гидравлического расчета водопроводов из металлических, полимерных и металлополимерных труб. Терминологический словарь по наружным сетям водоснабжения и канализации / О. А. Продоус, П. П. Якубчик, Д. И. Шлычков. – Москва : Издательство «Перо», 2023. – 288 с. – Текст : непосредственный.
2. Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков, П. П. Якубчик, С. В. Пархоменко. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 6. – С. 738–746.
3. Продоус, О. А. Гидравлический расчет сетей водоотведения с внутренними отложениями / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2022. – 120 с. – Текст : непосредственный.
4. Predicting sedimentation in urban sewer conduits / Y. H. Song, R. Yun, E. H. Lee, J. H. Lee. – DOI 10.3390/w10040462. – Текст : электронный // Water. – 2018. – 10(4):462.
5. Lange, R. L. Sedimentation dynamics in combined sewer systems / R. L. Lange, M. Wichern. – DOI 10.2166/wst.2013.278. – Текст : электронный // Water Sci Technol. – 2013. – 68(4):756-62.
6. Banasiak, R. Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments / R. Banasiak. – DOI 10.2166/wst.2008.287. – Текст : электронный // Water Sci Technol. – 2008. – 57(11):1743-8.
7. Шевелев, Ф. А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. – Москва : Госстройиздат, 1953. – 207 с. – Текст : непосредственный.
8. Рейзин, Б. Л. Коррозия и защита коммунальных водопроводов. – Москва : Стройиздат, 1979. – 308 с. – Текст : непосредственный.
9. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. – Москва : Издательский дом «Бастет», 2020. – 428 с.
10. Фоминых, А. В. Зависимость коэффициента потерь на трение по длине трубы в гидравлических системах АПК / А. В. Фоминых, А. В. Тельминов, Н. А. Ковшова. – Текст : непосредственный // Вестник Курганской ГСХА. – 2018. – № 3(27). – С. 79–82.
11. Новиков, С. В. Перспективы применения стальных труб с полимерным покрытием в системах ЖКХ / С. В. Новиков. – Текст : непосредственный // Территория Нефтегаз. – 2007. – № 11. – С. 28–31.
12. Продоус, О. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями : Справочное пособие / О. А. Продоус, А. А. Шипилов, П. П. Якубчик. – Москва : Издательство «Перо», 2021. – 238 с. – Текст : непосредственный.
13. Schwermer, C. U. Calculating expected effects of treatment effectivity and river flow rates on the contribution of WWTP effluent to the ARG load of a receiving river / C. U. Schwermer, W. Uhl. – DOI 10.1016/j.jenvman.2021.112445. – Текст : непосредственный // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 288. – P. 112445.
14. Braga, A. S. A novel monitoring scheme to detect iron oxide particle deposits on the internal surface of PVC drinking water pipes / A. S. Braga, Y. Filion. – DOI 10.1039/D1EW00614B. – Текст : непосредственный // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2021. – Vol. 7. – No. 11. – P. 2116–2128.
15. Орлов, В. А. Восстановление ветхих трубопроводов предварительно сжатыми полимерными трубами / В. А. Орлов, К. Е. Хренов, И. О. Богомолова. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2014. – № 2. – С. 105–113.
16. Харькин, В. А. Разработка системного подхода и оптимизация эксплуатации безнапорных водоотводящих сетей : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Харькин Владислав Альбертович. – Москва, 2003. – 197 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Prodous, O. A., Yakubchik, P. P., & Shlychkov, D. I. (2023). Osobennosti gidravlicheskogo rascheta vodoprovodov iz metallicheskih, polimernykh i metallopolimernykh trub. Terminologicheskij slovar' po naruzhnym setyam vodosnabzheniya i kanalizatsii. Moscow, "Pero" Publ., 288 p. (In Russian).
2. Prodous, O. A., Shlychkov, D. I., Jakubchik, P. P., & Parkhomenko, S. V. (2022). Influence of the thickness of the layer of internal deposits in pipelines of water supply and discharge systems on their remaining service life. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture], 17(6), pp. 738-746. (In Russian). DOI 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746.
3. Prodous, O. A., & Shlychkov, D. I. (2022). Gidravlicheskiy raschet setey vodootvedeniya s vnutrennimi otlozheniyami. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 120 p. (In Russian).

4. Song, Y. H, Yun, R, Lee, E. H, & Lee, J. H. (2018). Predicting sedimentation in urban sewer conduits. *Water*, 10(4):462. (In English). DOI 10.3390/w10040462.
5. Lange, R. L., & Wichern, M. (2013). Sedimentation dynamics in combined sewer systems. *Water Sci Technol*, 68(4):756-62. (In English). DOI 10.2166/wst.2013.278.
6. Banasiak, R. (2008). Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments. *Water Sci Technol*, 57(11):1743-8. (In English). DOI 10.2166/wst.2008.287.
7. Shevelev, F. A. (1953). Issledovanie osnovnykh gidravlicheskiy zakonov turbulentsy v trubakh. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 207 p. (In Russian).
8. Reyzin, B. L. (1979). Korrozija i zashchita kommunal'nykh vodoprovodov. Moscow, Stroyizdat Publ., 308 p. (In Russian).
9. Shevelev, F. A., & Shevelev, A. F. (2020). Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub. Spravochnoe posobie. Moscow, Izdatel'skiy dom "Bastet", 428 p. (In Russian).
10. Fominykh, A. V., Telminov, A. V., & Kovshova, N. A. (2018). The dependence of the coefficient of friction losses along the length of the pipe in hydraulic systems of the agro-industrial complex. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*, (3(27)), pp. 79-82. (In Russian).
11. Novikov, S. V. (2007). Perspektivy primeneniya stal'nykh trub s polimernym pokrytiem v sistemakh ZhKKh. *Territoriya Neftegaz*, (11), pp. 28-31. (In Russian).
12. Prodous, O. A., Shipilov, A. A., Yakubchik, P. P. (2021). Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub iz stali i serogo chuguna s vnutrennimi otlozheniyami. Spravochnoe posobie. Moscow, Izdatel'stvo "Pero", 238 p. (In Russian).
13. Schwermer, C. U., & Uhl, W. (2021). Calculating expected effects of treatment effectivity and river flow rates on the contribution of WWTP effluent to the ARG load of a receiving river. *Journal of Environmental Management*, (288), P. 112445. (In English). DOI 10.1016/j.jenvman.2021.112445.
14. Braga, A. S., & Fillion, Y. (2021). A novel monitoring scheme to detect iron oxide particle deposits on the internal surface of PVC drinking water pipes. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 7(11), pp. 2116-2128. (In English). DOI 10.1039/D1EW00614B.
15. Orlov, V. A., Chrenov, K. E., & Bogomolova, I. O. (2014). The restoration of the dilapidated pipelines using compressed plastic pipes. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, (2), pp. 105-113. (In Russian).
16. Khar'kin, V. A. (2003). Razrabotka sistemnogo podkhoda i optimizatsiya ekspluatatsii beznapornykh vodootvodyashchikh setey. Diss. dokt. tekhn. nauk. Moscow, 197 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Продоус Олег Александрович, д-р техн. наук, профессор, независимый эксперт по водоснабжению и канализации, e-mail: pro@enco.su. ORCID 0000-0003-0389-3695

Шлычков Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: SHlyichkovDI@mgsu.ru. ORCID 0000-0003-0210-2695

Шестаков Александр Анатольевич, аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: 891032801715321555@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4474-7411

Челоненко Андрей Геннадьевич, магистр кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: andreicelonenco@mail.ru. ORCID 0000-0003-3349-8442

Information about the authors

Oleg A. Prodous, D. Sc. in Engineering, Professor, Independent Expert in Water Supply and Sewerage, e-mail: pro@enco.su. ORCID 0000-0003-0389-3695

Dmitry I. Shlychikov, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Water Supply and Water Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering, e-mail: SHlyichkovDI@mgsu.ru. ORCID 0000-0003-0210-2695

Alexander A. Shestakov, Postgraduate at the Department of Water Supply and Water Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering, e-mail: 891032801715321555@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4474-7411

Andrey G. Chelonenko, Graduate Student at the Department of Water Supply and Water Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering, e-mail: andreicelonenco@mail.ru. ORCID 0000-0003-3349-8442

*Получена 09 ноября 2023 г., одобрена 07 декабря 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 09 November 2023, Approved 07 December 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

УДК 656.01

2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки)

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНОСТЬЮ ПРИ РАЗВИТИИ В ГОРОДАХ СЕРВИСОВ КРАТКОСРОЧНОЙ АРЕНДЫ ЭЛЕКТРОСАМОКАТОВ

Д. А. Захаров, А. А. Фадюшин

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

MOBILITY MANAGEMENT IN THE DEVELOPMENT OF SHORT-TERM ELECTRIC SCOOTER RENTAL SERVICES IN CITIES

Dmitrii A. Zakharov, Alexey A. Fadyushin

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. На основе результатов макромоделирования рассматривается развитие сервисов краткосрочной аренды электросамокатов и их влияние на структуру подвижности населения города. Цель исследования – оценка изменения структуры подвижности населения крупного города, не имеющего внеуличного транспорта, при развитии велодорожек и изменении тарифов на краткосрочную аренду электросамокатов. Исследование показало, что при снижении стоимости аренды электросамоката и увеличении протяженности велодорожек растет число пользователей электросамокатов и снижается количество и доля передвижений на индивидуальном и общественном транспорте. Стоимость аренды электросамокатов влияет также на среднее расстояние поездки, а следовательно, на бизнес-модель данного сервиса. Изменение стоимости аренды электросамокатов является одним из мероприятий по управлению мобильностью жителей городов. Такое мероприятие может изменять нагрузку улично-дорожной сети города и транспорта общего пользования.

Abstract. Article discusses the development of electric scooter short-term rental services and their impact on the structure of the mobility of the urban population based on macrosimulation results. The purpose of the study is to assess changes in the mobility structure of the population of a large city, in which the transport that provides regular passenger transportation on paths isolated from motor roads is absent, with the development of bicycle lanes and changes in tariffs for short-term rental of electric scooters. The study found that when the cost of renting an electric scooter would decrease and the length of bicycle lanes would increase, the number of electric scooter users would increase and the number and proportion of journeys made by individual and public transport would decrease. The cost of renting electric scooters also affects the average travelling distance and therefore the business model of the service. Changing the cost of renting electric scooters is one way to manage the mobility of city dwellers. This could change the loading of the urban street and road network and public transport.

Ключевые слова: структура подвижности населения, средства индивидуальной мобильности, электросамокат, транспортное моделирование

Keywords: structure of population mobility, individual mobility means, electric scooter, transport modeling

Для цитирования: Захаров, Д. А. Управление мобильностью при развитии в городах сервисов краткосрочной аренды электросамокатов / Д. А. Захаров, А. А. Фадюшин. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-71-79. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 71–79.

For citation: Zakharov, D. A., & Fadyushin, A. A. (2023). Mobility management in the development of short-term electric scooter rental services in cities. *Architecture, Construction, Transport*, (4(106)), pp. 71-79. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-71-79.

Введение

В настоящее время на улицах российских городов активно внедряются сервисы байкшеринга (системы краткосрочной аренды велосипедов) и кикшеринга (системы краткосрочной аренды электросамокатов), а в летний период формируется массовый спрос на передвижения с помощью средств индивидуальной мобильности (СИМ). СИМ используются гражданами для передвижения по велодорожкам, тротуарам, дорогам общего пользования, во дворах и на других прилегающих территориях.

В Постановлении Правительства РФ от 23.10.1993 № 1090 «О Правилах дорожного движения»¹ с 2023 г. введено понятие СИМ и разработан раздел «Дополнительные требования к движению велосипедистов, водителей мопедов и лиц, использующих для передвижения средства индивидуальной мобильности». Согласно документу, СИМ – транспортное средство, имеющее одно или несколько колес (роликов), предназначенное для индивидуального передвижения человека посредством использования двигателя (двигателей) (электросамокаты, электроскейтборды, гироскутеры, сигвеи, моноколеса и иные аналогичные средства). Однако многие пользователи СИМ не знают, где и с какой скоростью можно передвигаться, как избежать

столкновений и чем грозит нарушение правил движения.

Опыт классификации СИМ рассмотрен в работах Научно-исследовательского института автомобильного транспорта [1]. Классификационные системы учитывают различные параметры СИМ: International Transport Forum – массу и максимальную скорость, система Евросоюза – мощность, источник питания и габариты, США – мощность и скорость, SAE – массу, ширину, скорость и источник питания, система В. С. Шелмакова – габариты, нагруженную массу, максимальную конструктивную скорость и мощность двигателя.

В 2017 г. был опубликован исследовательский отчет «Правила и безопасность для электрических велосипедов и других маломощных транспортных средств». Документ был подготовлен компанией ViaStrada Limited по заказу транспортного агентства Новой Зеландии. Авторами были проведены исследования 57 моделей электросамокатов и подобных транспортных средств известных брендов, в том числе были рассмотрены их максимальные скорости и мощности двигателей. Согласно результатам исследования, большинство представленных моделей таких транспортных средств имеют мощность более 250 Вт [2], то есть по действующему российско-

¹ О правилах дорожного движения (с изменениями на 2 июня 2023 года) : Постановление Совета министров Правительства Российской Федерации № 1090 : утверждено 23 октября 1993 г. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9004835> (дата обращения: 10.08.2023).

му законодательству и практике его применения они могут быть приравнены к мопедам.

В исследовании также рассматривался вопрос безопасности пешеходов, отмечалось, что пешеходные дорожки должны быть устроены таким образом, чтобы свести к минимуму столкновения СИМ с пешеходами, подъездными путями, а также падения и опрокидывания из-за плохого качества поверхности [2].

В статье [3] авторы провели анализ использования СИМ в разных городах и пришли к выводу, что на сегодняшний день вклад СИМ в передвижения людей неоднозначен и зависит от многих факторов, а поведение пользователей в большей степени зависит не от наличия шеринга СИМ в городе, а от надежности и качества транспортной инфраструктуры.

Исследования также показывают, что в небольших городах, районах с низкой плотностью населения и низкими доходами развитие СИМ затруднено. Так, несмотря на хорошо выстроенную транспортную систему, внедрение СИМ в небольших швейцарских городах проходило неудачно [4].

Оценка факторов, влияющих на выбор СИМ как средства передвижения, а не развлечения, проводилась в работе [5]. На формирование устойчивого спроса влияют не только доступность и безопасность данного транспорта, но и эмоции, связанные с его использованием. Опросы пользователей мобильного электротранспорта во Франции и Северной Америке [6, 7] показали, что люди выбирают этот способ передвижения, так как он доставляет положительные эмоции. К тому же, такой способ передвижения привлекает людей с ограниченными физическими возможностями.

Тем не менее, СИМ могут представлять опасность для пешеходов и других участников дорожного движения из-за высокой скорости, которую способны развивать. Этим обусловлены ограничения на использование пешеходных зон [8]. Решением городских администраций в некоторых районах установлен запрет на парковку и перемещения на данном транспорте или введены ограничения по скорости передвижения. Такие ограничения могут вводиться на открытых

площадках с большим скоплением пешеходов (парках, набережных) [9, 10]. Для разделения пользователей СИМ/велосипедистов и пешеходов создаются велодорожки, за счет разграничения потоков снижаются задержки пользователей городской транспортной системы, уменьшается количество конфликтов среди пользователей СИМ/велосипедистов и пешеходов, повышается уровень безопасности движения [11, 12].

Максимально допустимая скорость движения велотранспорта и СИМ на улицах городов составляет 20–25 км/ч. Однако скорость сообщения на СИМ гораздо ниже и достигает 12–15 км/ч, так как некоторые участки улично-дорожной сети могут быть не обустроены для комфортного, безопасного и быстрого движения. На пути могут встречаться высокие бордюры, искусственные неровности, колеи, некачественное дорожное покрытие и т. д. [13]. В часы пик скорость движения велотранспорта или СИМ может быть больше скорости движения других видов транспорта, что делает его более привлекательным [14].

Цель данного исследования – оценка изменения параметров городской транспортной системы при изменении тарифов и развитии инфраструктуры для передвижения на СИМ.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является структура подвижности в городской транспортной системе. Предметом – структура подвижности населения города при различных тарифах на перемещение с использованием СИМ.

Гипотеза исследования 1 – при снижении стоимости аренды СИМ увеличивается количество пользователей СИМ, снижается число пользователей индивидуального и городского общественного транспорта.

Гипотеза исследования 2 – количество поездок и средняя дальность поездок зависят от тарифа на использование СИМ.

Влияние тарифа на аренду электросамокатов на количество поездок описывается уравнением по формуле (1):

$$N_{СИМ} = a \cdot e^{-bC_{1,мин}} \quad (1)$$

где $N_{СИМ}$ – количество поездок в час пик на СИМ;
 $C_{1мин}$ – стоимость 1 минуты аренды электросамоката, руб.;
 a, b – параметры уравнения.

Для оценки изменения структуры подвижности населения используется моделирование транспортных потоков в г. Тюмени на макроуровне в программном комплексе PTV Visum.

В [15] рассмотрено изменение структуры подвижности при изменении экономических факторов городской транспортной системы (стоимости платной парковки и стоимости проезда в городском транспорте общего пользования). В данном исследовании также используется сопротивление поездки на разных видах транспорта и способах перемещений.

При использовании сервисов кикшеринга (например, от компании Whoosh, Юрент) обычно необходима оплата в начале аренды (при старте) и далее по времени использования СИМ (поминутная, часовая, суточная). Например, при использовании СИМ компании Whoosh необходимо заплатить 50 рублей при старте и оплатить каждую минуту аренды (от 5 рублей за минуту). Стоимость проката СИМ может увеличиваться в зависимости от спроса. Также пользователь имеет возможность оформить месячную, годовую подписку на сервис, при которой стоимость начала аренды СИМ равна нулю.

Сопротивление поездки на СИМ определяется по формуле (2):

$$R_{СИМ} = T_{подх} + T_{СИМ} + (P_{СИМ0} + P_{СИМ} \cdot T_{СИМ}) \cdot k, \quad (2)$$

где $R_{СИМ}$ – сопротивление поездки на СИМ;
 $T_{подх}$ – время подхода к СИМ и оформления аренды через приложение, мин.;

$T_{СИМ}$ – время реализации корреспонденции на СИМ, мин.;

$P_{СИМ0}$ – начальная (стартовая) стоимость аренды СИМ, руб.;

$P_{СИМ}$ – итоговая стоимость аренды СИМ, руб.;

k – переводной коэффициент, мин./руб.

Результаты

По результатам макро моделирования было определено, что при увеличении стоимости проката количество передвижений на СИМ снижается, а посредством остальных способов перемещений увеличивается. Например, при увеличении стоимости проката СИМ с 1 до 10 рублей за одну минуту количество передвижений на городском транспорте общественного пользования увеличивается с 19 до 21 %, а число пользователей индивидуального транспорта повышается с 28 до 30 % (рис. 1, таблицы 1 и 2).

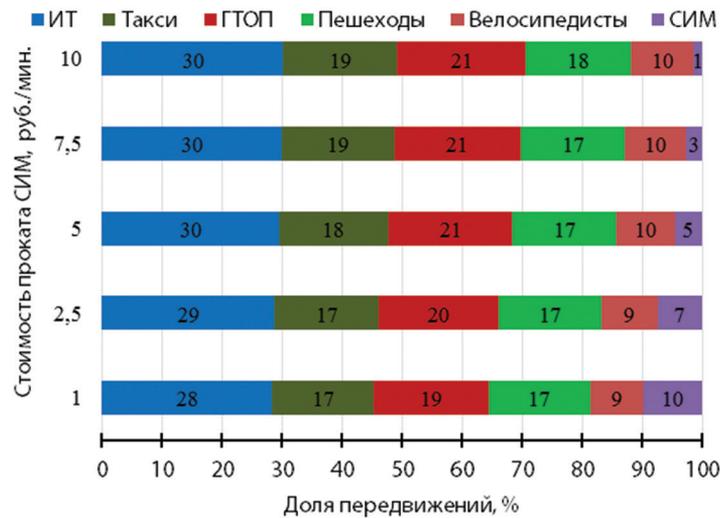


Рис. 1. Изменение структуры подвижности населения при изменении стоимости проката СИМ (протяженность велодорожек 158 км)

Fig. 1. Change in the population mobility structure with changes in the cost of renting individual mobility means (length of bicycle lanes is 158 km)

Таблица 1

Table 1

Влияние стоимости аренды электросамоката на структуру подвижности населения
(протяженность велодорожек 158 км)
Impact of the cost of renting an electric scooter on the mobility structure of the population
(length of bicycle lanes is 158 km)

Стоимость проката СИМ, руб./мин.	Количество передвижений по видам транспорта и способам в утренний час пик в Тюмени, ед.					
	ИТ	Такси	ГТОП	Пешеходы	Велосипедисты	СИМ
1	39 983	23 691	27 111	23 772	12 522	13 757
2.5	40 274	24 222	28 138	24 139	13 075	10 295
5	41 031	25 147	28 898	23 974	13 659	6 268
7.5	41 416	25 891	29 249	24 111	14 046	3 679
10	41 714	26 175	29 521	24 188	14 337	2 008

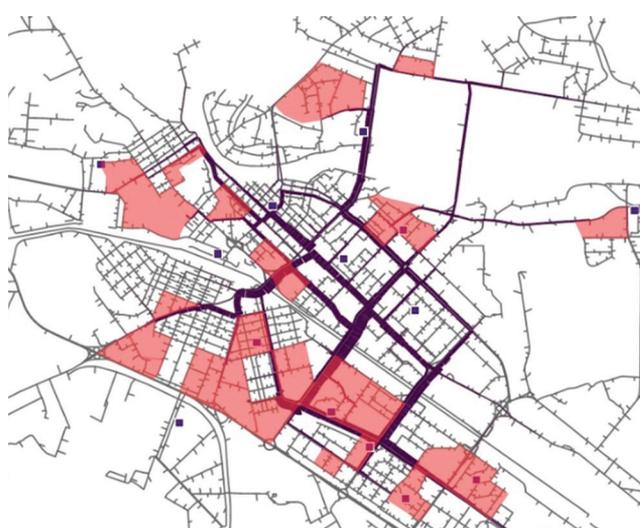
Таблица 2

Table 2

Влияние стоимости аренды электросамоката на структуру подвижности населения
(протяженность велодорожек 38 км)
Impact of the cost of renting an electric scooter on the mobility structure of the population
(length of bicycle lanes is 38 km)

Стоимость проката СИМ, руб./мин.	Количество передвижений по видам транспорта и способам в утренний час пик в Тюмени, ед.					
	ИТ	Такси	ГТОП	Пешеходы	Велосипедисты	СИМ
1	43 174	26 891	32 638	26 310	847	5 281
2.5	43 551	27 154	33 035	26 421	856	3 534
5	43 690	27 232	33 733	26 972	899	1 624
7.5	43 843	27 395	34 257	26 971	908	418
10	44 687	28 609	32 948	25 932	888	145

a)



b)

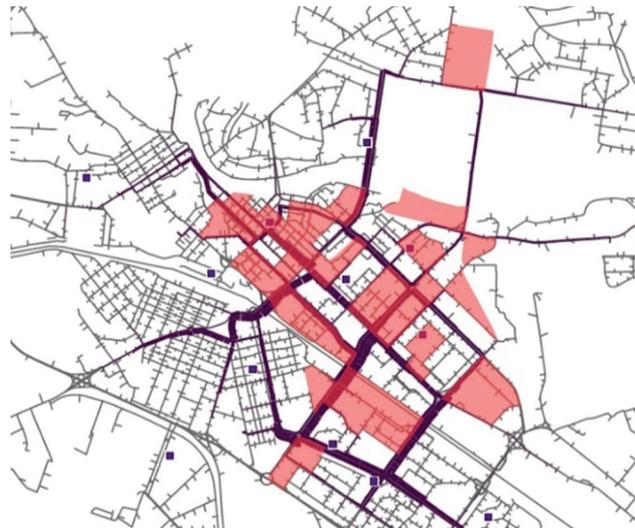


Рис. 2. Основные передвижения на СИМ по городу: а) районы – источники поездки, б) районы – цели
Fig. 2. Main routes by individual mobility means in the city: a) areas as starting points of trip, b) areas as goal of trip

На выбор СИМ или велосипеда существенно влияет наличие велодорожек на пути следования, так как это значительно увеличивает скорость сообщения и снижает количество конфликтов с пешеходами. Основные перемещения на СИМ происходят на участках с обустроенными велодорожками (рис. 2).

Основные перемещения на СИМ совершаются из жилых и плотно заселенных районов (районов – источников) в районы с крупными деловыми центрами, в центральную часть города и в районы, вблизи которых есть велодорожки на магистральных улицах города.

При развитии сети велодорожек (увеличении их протяженности на 120 км) и снижении стоимости проката СИМ с 7 (стандартная стоимость проката) до 1 рубля за минуту количество передвижений на СИМ увеличивается с 1 до 14 тысяч поездок. На городском общественном транспорте количество передвижений снижается с 34 до 27 тысяч поездок, что влияет на наполняемость маршрутных транспортных средств.

На основе результатов моделирования определена зависимость количества перемещений на СИМ от стоимости проката (рис. 3). При снижении стоимости проката и развитии сети велодорожек повышается спрос на использование СИМ и сервисов проката, что позволяет снизить количество передвижений на индивидуальном и городском транспорте общего пользования и тем самым уменьшить загрузку улично-дорожной сети и некоторых городских маршрутов.

При повышении стоимости проката СИМ увеличивается итоговая стоимость аренды, что снижает спрос на дальние или длительные перемещения. Зависимость среднего времени поездки на СИМ от стоимости проката представлена на рис. 4. Наибольшее влияние стоимости проката СИМ на среднее время поездки отмечается в диапазоне от 1 до 4 рублей за 1 минуту аренды электросамоката.

Обсуждение

При снижении стоимости проезда на СИМ и развитии инфраструктуры возможно уменьшение количества поездок на городском и ин-

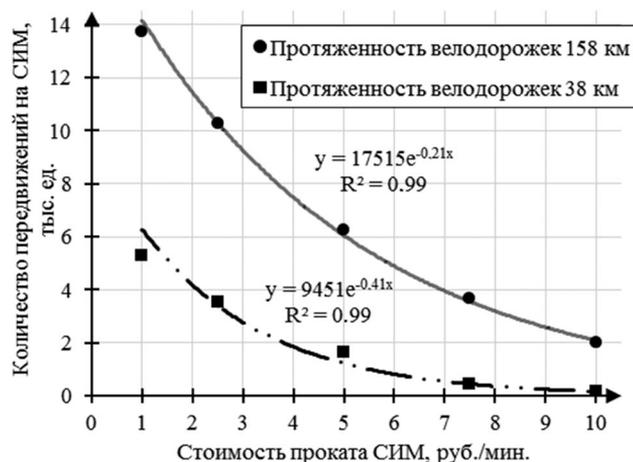


Рис. 3. Изменение количества перемещений на СИМ при изменении стоимости проката электросамоката

Fig. 3. Change in the number of movements by individual mobility means when the cost of electric scooter rent changes

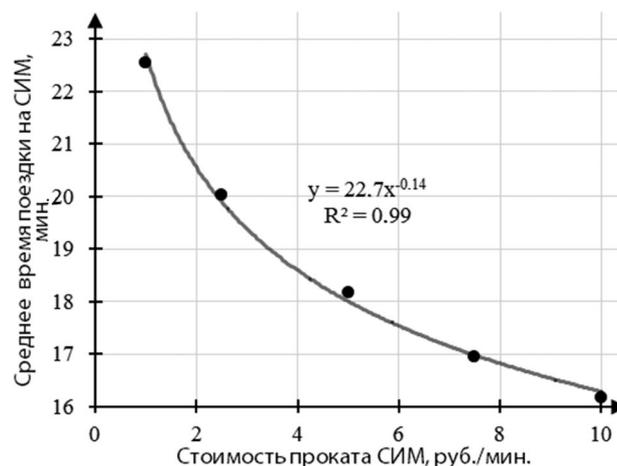


Рис. 4. Изменение средней времени поездки при изменении стоимости проката электросамоката

дивидуальном транспорте и, соответственно, снижение наполняемости в салоне маршрутных транспортных средств и загрузки улично-дорожной сети. Это актуально для перегруженных маршрутов общественного транспорта или в период сезонных пиков вирусных заболеваний и пандемий. Уменьшение загрузки улично-дорожной сети актуально также при уменьшении пропускной способности из-за перекрытия автомобильных дорог и ремонта объектов транс-

портной инфраструктуры (мостов, транспортных развязок).

Муниципальным властям необходимо наладить взаимодействие с предприятиями и сервисами прокатов СИМ и в случае организации минимальной стоимости проката (1 рубль) и повышения спроса жителей на СИМ компенсировать затраты сервисов проката. Например, при организации стоимости проката в 1 рубль за минуту (при базовом тарифе аренды электросамоката 7 рублей) необходима компенсация для сервиса в размере 157 тысяч рублей за один час пик (для двух недель из 10 рабочих дней – более 2 млн рублей). Изменение доходов организаторов проката СИМ при изменении стоимости проката СИМ показано на рис. 5. Установление минимальной стоимости проката СИМ в сервисах возможно при условии компенсации затрат и предоставления субсидий на такие меры.

Выводы

Результаты проведенного исследования с применением транспортных макромоделей (на примере г. Тюмени) свидетельствуют о том, что развитие инфраструктуры для велотранспорта и СИМ, увеличение протяженности велодорожек на 120 км, уменьшение стоимости проката в сервисах аренды с 5–7 до 1 рубля за минуту повышает в утренний час пик спрос на использование СИМ с 900 поездок до 14 тысяч. Количество передвижений на городском транспорте общего пользования снижается с 34 до 27 тысяч, на индивидуальном – с 44 до 40 тысяч.

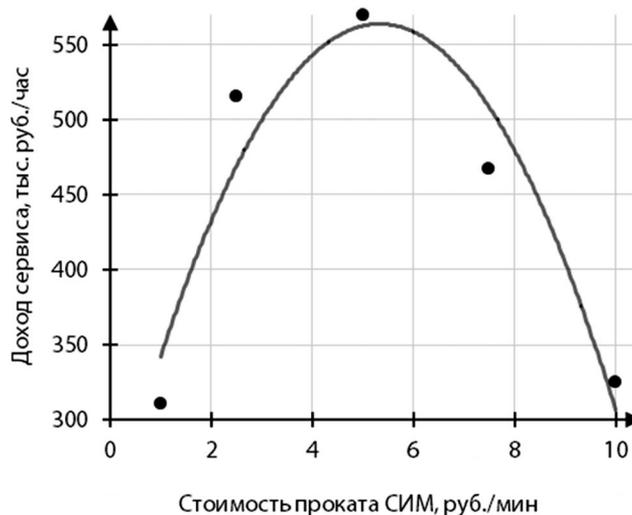


Рис. 5. Изменение доходов сервиса по прокату при изменении стоимости проката
Fig. 5. Change in rental service revenues when the rental price changes

Полученные результаты исследования имеют ярко выраженную сезонность, обусловленную периодом разрешенной эксплуатации электросамокатов и работы сервисов краткосрочной аренды СИМ с апреля – мая по октябрь.

Управление городской мобильностью путем изменения тарифов на аренду электросамокатов целесообразно учитывать в макромоделях при разработке и корректировке документов транспортного планирования (Программы комплексного развития транспортной инфраструктуры и Комплексной схемы организации дорожного движения).

Библиографический список

1. Донченко, В. В. Анализ основных классификационных систем средств индивидуальной мобильности / В. В. Донченко, В. А. Купавцев. – DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-3-525-263. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2021. – Т. 18, № 3 (79). – С. 252–263.
2. Regulations and safety for electric bicycles and other low-powered vehicles. NZ Transport Agency research report 621 / J. Lieswyn, M. Fowler, G. Koorey [et al.]. – Wellington, 2017. – 182 p. – Текст : электронный. – URL: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/621/621-regulations-and-safety-for-electric-bicycles-and-other-low-powered-vehicles.pdf>.
3. Transportation transformation: Is micromobility making a macro impact on sustainability? / M. McQueen, G. Abou-Zeid, J. MacArthur, K. Clifton. – DOI 10.1177/0885412220972696. – Текст : электронный // Journal of Planning Literature. – 2020. – 36(5):088541222097269. – URL: <https://www.researchgate.net/>

- publication/346908241_Transportation_Transformation_Is_Micromobility_Making_a_Macro_Impact_on_Sustainability (date of the application: 01.10.2023).
4. Implementing bikesharing systems in small cities: evidence from the swiss experience / A. Ander, E. Ravalet, V. Baranger, V. Kaufmann. – DOI 10.1016/j.tranpol.2017.01.005. – Текст : непосредственный // Transport Policy. – 2017. – Vol. 55. – P. 18–28.
 5. Schneider, R. J. Theory of routine mode choice decisions: an operational framework to increase sustainable transportation / R. J. Schneider. – DOI 10.1016/j.tranpol.2012.10.007. – Текст : непосредственный // Transport Policy. – 2013. – Vol. 25. – P. 128–137.
 6. Usages et usagers des trottinettes électriques en free-floating en France / 6t-bureau de recherché. – Текст : электронный // lalibrairie.ademe : сайт. – URL: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/synthese-usages-trottinettes-free-floating-france-2019.pdf>/ (date of the application: 17.11.2021).
 7. A North American survey of electric bicycle owners. NITC-RR-1041 / J. MacArthur, M. Harpool, D. Schepke, C. Cherry. – Portland : Transportation Research and Education Center, 2018. – 62 p. – DOI 10.15760/trec.197. – Текст : непосредственный.
 8. Harnessing Shared Mobility for Compact, Sustainable Cities / Institute for Transportation and Development Policy (ITDP). New York, 2015. – 13 p. – Текст : электронный. – URL: <https://itdpdotorg.wpengine.com/wp-content/uploads/2015/08/Harnessing-Shared-Mobility-1.pdf>/ (date of the application: 17.11.2020).
 9. Sharp, S. Did Your Rented E-scooter Suddenly Shut Down? Blame the Invisible Geofence / S. Sharp. – Текст : электронный // Los Angeles Times : сайт. – URL: <https://www.latimes.com/california/story/2019-09-16/geofencing-scooters-westside-bird-lime/> (date of the application: 17.11.2020).
 10. Thomas, K. E-scooters will return to Portland with new rules, enforcement fines, more scooters / K. Thomas. – Текст : электронный // KATU 2. – 2019. – URL: <https://katu.com/news/local/e-scooter-pilot-program-will-return-to-portland-with-new-rules-and-enforcement/> (date of the application: 18.11.2020).
 11. Юнг, А. А. Результат оценки характеристик транспортного потока с учетом движения средств индивидуальной мобильности с помощью моделирования участка дорожного движения / А. А. Юнг, А. Г. Шевцова. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 5 (87). – С. 716–726.
 12. Трофименко, Ю. В. Методика оценки эффективности велотранспортной сети крупного города / Ю. В. Трофименко, А. Б. Галышев. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4–5. – С. 948–958.
 13. Донченко, В. В. Исследование элементов городской инфраструктуры для безопасного передвижения средств индивидуальной мобильности / В. В. Донченко, В. А. Купавцев. – DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-3-338-349. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 3 (91). – С. 338–349.
 14. Шелмаков, С. В. Оценка экономического эффекта, обусловленного сокращением времени передвижения при эксплуатации велотранспортной сети г. Москвы / С. В. Шелмаков, А. Б. Галышев. – Текст : непосредственный // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2015. – № 2 (4). – С. 10.
 15. Фадюшин, А. А. Влияние стоимости проезда в городском общественном транспорте на структуру подвижности населения. – Текст : непосредственный / А. А. Фадюшин, Д. А. Захаров. – DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-4-143-148 // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 4 (87). – С. 143–148.

References

1. Donchenko, V. V., & Kupavtsev, V. A. (2021). Main classification systems of personal mobility equipment analysis. The Russian Automobile and Highway Industry Journal, 18(3(79)), pp. 252–263. (In Russian). DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-3-525-263.
2. Lieswyn, J., Fowler, M., Koorey, G., Wilke, A. & Crimp, S. (2017). Regulations and safety for electric bicycles and other low-powered vehicles. NZ Transport Agency research report 621. Wellington, 182 p. (In English).
3. McQueen, M., Abou-Zeid, G., MacArthur, J., & Clifton, K. (2020). Transportation Transformation: Is Micromobility Making a Macro Impact on Sustainability? Journal of Planning Literature, 36(5):088541222097269. (In English). Available at: https://www.researchgate.net/publication/346908241_Transportation_Transformation_Is_Micromobility_Making_a_Macro_Impact_on_Sustainability (accessed 01.10.2023). DOI 10.1177/0885412220972696.

4. Ander, A., Ravalet, E., Baranger, V., & Kaufmann, V. (2017). Implementing Bikesharing Systems in Small Cities: Evidence from the Swiss Experience. *Transport Policy*, 55, pp. 18-28. (In English). DOI 10.1016/j.tranpol.2017.01.005.
5. Schneider, R. J. (2013). Theory of routine mode choice decisions: an operational framework to increase sustainable transportation. *Transport Policy*, 25, pp. 128-137. (In English). DOI 10.1016/j.tranpol.2012.10.007.
6. 6t-bureau de recherche. (2019). Use and users of free-floating electric scooters in France [Usages et usagers des trottinettes électriques en free-floating en France]. (In French). Available at: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/synthese-usages-trottinettes-free-floating-france-2019.pdf/> (accessed 17.11.2021).
7. MacArthur, J., Harpool, M., Schepke, D., & Cherry, C. (2018). A North American survey of electric bicycle owners. NITC-RR-1041. Portland, Publ. Transportation Research and Education Center, 62 p. (In English). DOI 10.15760/trec.197.
8. Institute for Transportation and Development Policy (ITDP). (2015). *Harnessing Shared Mobility for Compact, Sustainable Cities*. New York, Publ. Institute for Transportation and Development Policy, 13 p. (In English). Available at: <https://itdpdotorg.wpengine.com/wp-content/uploads/2015/08/Harnessing-Shared-Mobility-1.pdf/> (accessed 17.11.2020).
9. Sharp, S. (2019). Did your rented e-scooter suddenly shut down? Blame the Invisible Geofence. *Los Angeles Times*. (In English). Available at: <https://www.latimes.com/california/story/2019-09-16/geofencing-scooters-westside-bird-lime/> (accessed 17.11.2020).
10. Thomas, K. (2019). E-scooters will return to Portland with new rules, enforcement fines, more scooters. *KATU 2*. (In English). Available at: <https://katu.com/news/local/e-scooter-pilot-program-will-return-to-portland-with-new-rules-and-enforcement/> (accessed 18.11.2020).
11. Jung, A. A., & Shevtsova, A. G. (2022). The result of an evaluation for traffic flow characteristics considering the movement of personal mobility equipment by modeling a road traffic section. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 19(5(87)), pp. 716-726. (In Russian). DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726.
12. Trofimenko, Yu., & Galyshev, A. (2016). Technique of quality estimation efficiency's of cycle transport networking the large city. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 18(4-5), pp. 948-958. (In Russian).
13. Donchenko, V. V., & Kupavtsev, V. A. (2023). Main classification systems of personal mobility equipment analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 20, (3(91)), pp. 338-349. (In Russian).
14. Shelmakov, S. V., & Galyshev, A. B. (2015). Assessment of the economic effect caused by reduction of time of movement during the operation of the cycle transport network of the city of Moscow. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, (2(4)). P. 10. (In Russian).
15. Fadyushin, A. A., & Zakharov, D. A. (2021). The influence of the urban public transport fare on the structure of the population's mobility. *Bulletin of Civil Engineers*, (4(87)), pp. 143-148. (In Russian).

Сведения об авторах

Захаров Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта, Тюменский индустриальный университет, e-mail: zaharovda@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-9594-9144

Фадюшин Алексей Александрович, канд. техн. наук, ассистент кафедры эксплуатации автомобильного транспорта, Тюменский индустриальный университет, e-mail: fadjushinaa@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7276-4315

Information about the authors

Dmitrii A. Zakharov, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Head at the Department of Road Transport Operation, Industrial University of Tyumen, e-mail: zaharovda@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-9594-9144

Alexey A. Fadyushin, Cand. Sc. in Engineering, Assistant at the Department of Road Transport Operation, Industrial University of Tyumen, e-mail: fadjushinaa@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7276-4315

*Получена 07 ноября 2023 г., одобрена 15 ноября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 07 November 2023, Approved 15 November 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

DISTRIBUTION OF WEEKLY WORKING HOURS OF TRUCK DRIVERS IN URBAN LOGISTICS

Asen Asenov, Velizara Pencheva, Ivan Georgiev
"Angel Kanchev" University of Ruse, Ruse, Bulgaria

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЖЕНЕДЕЛЬНОГО РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ ВОДИТЕЛЕЙ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В ГОРОДСКОЙ ЛОГИСТИКЕ

А. Асенов, В. Пенчева, И. Георгиев
Русенский университет имени Ангела Кынчева

Abstract. The work deals with the transportation of cargo in small batches in an urban environment. It was found that the weekly workload of truck drivers is not always evenly distributed. This is a prerequisite for dissatisfaction among them, as well as a reason for making mistakes or the occurrence of health problems. A partial integer nonlinear mathematical model is proposed to solve the problem. The solution of the task allows the difference between the driver who has worked the longest and the one who has worked the least to be minimal and the workload of the drivers even.

We offer two possible solutions of this task (the example is based on a real situation from practice). In the first case it is the rotation principle, when three interchangeable workers working three days on three different activities. In the second case, seven workers performing six activities in one week, it is precisely determined which worker must perform activities. As a result of the calculations, the option, where the difference between the minimum and maximum time is 1.7 hours for the five working days, because it varies from 33.7 hours to 35.4 hours. In this variant, the rotation principle can also be applied in order for workers to be loaded equally. These options do not exclude the search for other solutions satisfying the problem.

Аннотация. Рассматриваются перевозки грузов небольшими партиями в городских условиях. Выявлено, что недельная нагрузка водителей грузовых автомобилей не всегда распределяется равномерно. Это становится причиной неудовлетворенности среди водителей, а также может привести к совершению ошибок или возникновению проблем со здоровьем. Для решения проблемы предлагается частично целочисленная нелинейная математическая модель. Ее применение позволяет сделать разницу между временем, затраченным водителем, проработавшим больше всех, и водителем, проработавшим меньше всех, минимальной, а нагрузку на водителей – равномерной. Предлагается два возможных варианта решения этой задачи (пример основан на реальной ситуации из практики). В первом случае это принцип ротации, при котором трое взаимозаменяемых рабочих в течение трех дней меняют виды работ. Во втором случае семь рабочих выполняют шесть видов работ в течение одной недели, при этом точно определено, кто из рабочих какой вид работ должен выполнять. В результате расчетов было найдено решение, при котором разница между минимальным и максимальным временем составляет 1.7 часа за пять рабочих дней (время работы варьируется от 33.7 до 35.4 ч). Здесь также может быть применен принцип ротации, чтобы рабочие были загружены равномерно. Эти варианты не исключают поиска других решений, удовлетворяющих поставленной задаче.

Key words: truck driver, nonlinear mathematical model, transport optimization

Ключевые слова: водитель грузовика, нелинейная математическая модель, оптимизация перевозок

For citation: Asenov, A., Pencheva, V., & Georgiev, I. (2023). Distribution of weekly working hours of truck drivers in urban logistics. *Architecture, Construction, Transport*, (4(106)), pp. 80-89. (In English). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-80-89.

Для цитирования: Асенов, А. Распределение еженедельного рабочего времени водителей грузовых автомобилей в городской логистике / А. Асенов, В. Пенчева, И. Георгиев. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-80-89. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 80–89.

Introduction

The world's population is becoming increasingly concentrated in cities and the urban population is expected to grow from 3.6 billion in 2011 to 6.3 billion by 2050 [1]. The increase in the number of people in the cities leads to an increase in motor vehicles, air pollution, and congestion in the streets, which makes it difficult for drivers who have to perform deliveries on predetermined schedules related to the serviced sites.

This requires optimization of the routes on which the transport is performed and selection of ecological transport means. On the issues of the route optimization and cost reduction in [2] solutions have been proposed that reach almost 30 % savings. With regard to urban pollution, a model has been proposed in [3] for Belgrade, the capital of Serbia, which uses a limited number of electric vehicles and complementary motor vehicles with internal combustion engines to solve this problem.

The distribution of goods to commercial sites in cities has a number of specific features such as: delivery of goods in smaller volumes; sensitivity to the delivery time interval; recurrence of supplies for the day to replenish stocks, due to the small size of most stores in the central parts of the city; repetitive deliveries of certain food products due to the outlet customers' requirement for them to be fresh (e.g. bread and bakery products).

This is a prerequisite for the need of organizing a large number of delivery, collection or delivery/collection routes (a special case of circular routes) for the transport of goods in small batches [4]. Each

of these routes has significant differences in the time for one revolution of the car. Thus, the duration of work for the fulfilment of the order varies for the drivers, which is why some of them are busier, others are dissatisfied, especially if the pay is the same or with bonuses, but also due to difficult driving conditions in cities associated with the chance of traffic accidents and injuries that further increases this stress.

Issues of the impact of fatigue on drivers are discussed in [5]. It is determined that the most common causes of fatigue and dissatisfaction among drivers are related to the management of working hours or opportunities for work and rest. With regard to research on the hazards most strongly associated with driver injuries in [6], it is suggested that risk management efforts in the industry should focus on the organisation of work and vehicle-related hazards, and more specifically, to work practices that cause frequent stress among drivers. Another important reason given by the authors who conducted research in Norway is the speed with which vehicles are driven on road sections under repair with and without workers on them, as well as the influence of road signs [7]. Of the 815 drivers surveyed, it was found that the presence of workers in the section leads to a reduction in the speed of vehicles, in contrast to the cases where there are no workers, due to the risk taken by drivers and their perception of danger.

One of the possible solutions of the above is optimization for the even load of drivers in terms of driving time and downtime for loading and

unloading operations throughout the working week, provided that the time difference between the worker who has worked for the longest period of time and the one who has worked the shortest time is as little as possible.

Results

General characteristics of the routes for transporting goods in small batches and organization of the drivers' work

Delivery of goods in small batches can be done at your own expense or for a fee. In practice, most often this delivery is made for a fee by licensed suppliers or by people who offer their services when the delivery coincides with their route, known as crowd-shipping [8, 9]. The disadvantage of crowd-shipping is that the issue of the responsibility of the provider and the legality of the service in different countries is not well clarified. In this regard, this paper will consider shipments performed by licensed suppliers.

The following types of routes are considered in the literature: delivery, collection and delivery-collection [10]. In the case of a delivery route, the loaded rolling stock at the initial point transports the consignment in batches to the points along the route until it is gradually unloaded. In the collection route, the rolling stock, passing successively through the loading points, is gradually loaded and the cargo is transported to one point (Fig. 1).

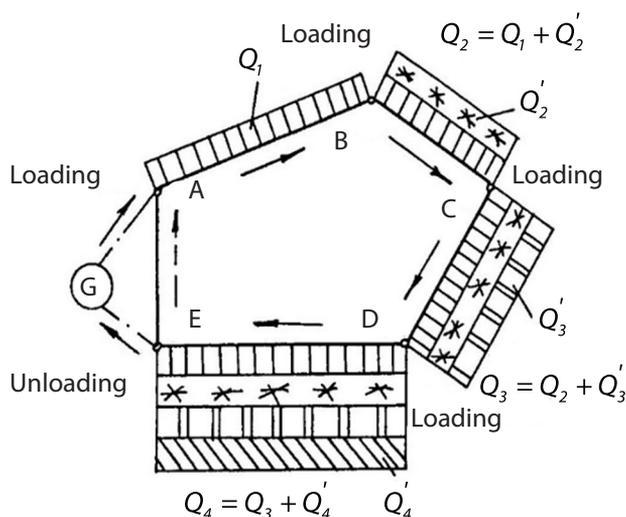


Fig. 1. Diagram of a collection route
Рис. 1. Схема сборного маршрута

Figure 1 shows the route where the vehicle starts from the garage (G) and goes to the first point (A), where the amount of cargo Q_1 is loaded, which is transported to the second point (B). Then, at point (B) is loaded Q'_2 and then the total amount of load in the vehicle becomes Q_2 . The scheme is repeated in the following points, where in point (C) the quantity of cargo loaded is Q'_3 , and up to the last point in the case (D), where Q_4 is loaded. The total quantity of cargo is delivered in point (E). From point (E) to point (A), the vehicle returns empty, without any load and so this route can be repeated until the work is completed. If there is no other work, then from point (E), the vehicle returns to the garage (G).

In the case of collection and delivery routes, the rolling stock simultaneously collects one load and carries another (for example, the delivery of food products with the simultaneous collection of packaging). The following indicators are defined for these routes:

- turnover length for delivery – l_0 . For collection routes it is equal to route length $l_0 = l_M$;
- turnover time – t_0 .

$$t_0 = \frac{l_0}{V_T} + t_{T-R}, \text{ h}, \quad (1)$$

where V_T is the average technical speed of the rolling stock, km / h;

t_{T-R} – the average time for loading and unloading for one course, h.

For collection/delivery routes:

$$t_{T-R} = \sum_{j=1}^k t_{T-R_j}, \text{ h}, \quad (2)$$

where t_{T-R_j} is the loading/unloading time at the j^{th} point of the route, h;

k – the number of points on the route.

Given the planned work, let p routes be organized for each day of the week with a turnaround time of $t_{01}, t_{02}, \dots, t_{0p}$ and a turnaround time of no more than 8 h, i.e. $t_0 \leq 8 \text{ h}$ (Fig. 2).

Moreover $t_{01} \neq t_{02} \neq \dots \neq t_{0p}$.

The organization of drivers' working hours in transport requires careful planning. This is the time from the beginning to the end of the work

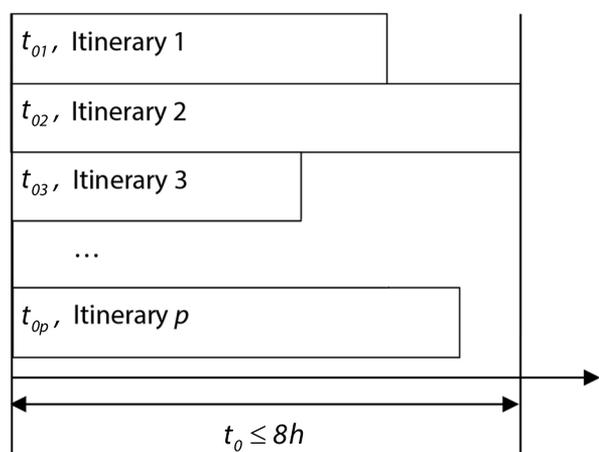


Fig. 2. Period of time for work on the route
Рис. 2. Период времени работы на маршруте

assignment during which the driver is available to the employer and exercises his functions or activities. Conditionally, these activities can be divided into two main groups. The first group includes driving times and loading and unloading times, and the second group includes cleaning, maintenance and any other activities to ensure the safety of the vehicle and its load, or activities to comply with legal or regulatory obligations, as well as appropriate assignment of other tasks.

The first group of activities is in periods related to the times in the car's duty order.

The balance of the total working time T_w for execution of the duty order for one vehicle is:

$$T_w = t_{run} + t_{T-R} + t_p, \quad (3)$$

where $t_{run} = \frac{L}{V_t}$ is the travel time, h, at distance L , km,

for the time of the duty order and technical speed V_t km/h;

t_{T-R} – the total loading and unloading time of the vehicle, h;

t_p – the idle time spent for technical or organizational reasons, h.

For each unit of rolling stock, the vehicle hours (AT_w) in a work day are the sum of all hours of its stay in the line for a given period of time D_w days, determined by the dependence:

$$AT_w = \sum_{i=1}^{D_w} T_{w_i}, \text{ h}, \quad (4)$$

where T_{w_i} are the hours of operation of the one vehicle on the line on the i^{th} day, where $i = \overline{1, D_w}$.

For a group of vehicles, or for the entire fleet, the car hours are AT_w' , in duty order:

$$AT_w' = \sum_{j=1}^{A_n} \sum_{i=1}^{D_w} T_{w_{ij}}, \quad (5)$$

where $T_{w_{ij}}$ is the time in duty order of the j^{th} rolling stock on the i^{th} day of the period D_w , A_n is the number of cars.

Mathematical model of the problem for even distribution of total weekly working hours of drivers

The problem of providing even workload for all drivers within one working week is multivariate and requires special methods and means for rational distribution of drivers' work. In order to draw up a model of the problem of evenly distributing the total weekly working hours between drivers, the case is considered in which for p consecutive days (five working days), the same type of activities ("work") must be carried out every day, each of which with a duration $t_j, j = \overline{1, n}$. The everyday activities can be performed by m employees. Each activity must be carried out by one worker every day (one activity cannot be carried out on the same day by two or more workers). A worker cannot take on more than one activity per day, i.e. $m \geq n$.

The goal is as follows: for a period of p days, each worker has worked approximately the same time (all days). Given the nature of the organisation of transport, the probability of achieving this is very small. In order to achieve the formulated goal, a criterion is applied that the time difference between the worker who has worked the longest time and the worker who has worked the shortest time is as small as possible. Decision-making with a clear single criterion (single-criteria tasks) is relatively easy, but with more than two criteria (two goals, multi-criteria tasks [11–13] the decision is complex and sometimes purely subjective factors have to be included to find a solution). Binary variables are involved in the composition of such models, and the following notations are introduced to compile the model:

m is number of workers;

n – number of activities (works);

p – number of days on which these activities are carried out each day;

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{if } i^{\text{th}} \text{ worker performs } j^{\text{th}} \text{ activity in } k^{\text{th}} \text{ day;} \\ 0, & \text{otherwise, } i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, p}; \end{cases}$$

t_j – time to complete an j^{th} activity, $j = \overline{1, n}$.

We are looking for the unknowns x_{ijk} (binary variables) so:

$$Z = \min_x \left\{ \max_i \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p t_j x_{ijk} \right) - \min_i \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p t_j x_{ijk} \right) \right\}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ijk} = 1, \quad \forall j = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, p}; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i = \overline{1, m}, \quad \forall k = \overline{1, p}; \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, p}, \quad (9)$$

where x indicates a vector (column) with all unknown search values x_{ijk} "arranged in a linear manner". Thus, a matrix x_{ijk} is three-dimensional and contains m rows, n columns, and the depth is p . If all elements of are assigned with sequential numbers – starting with the elements from column 1 of the first 2D matrix, then – the elements from column 2 of the first 2D matrix, etc., and when all the columns from the first 2D matrix are numbered in depth, then the same sequential numbering continues in the next 2D matrix. This is how the expression "arranged in a linear manner" should be interpreted.

Let T_i indicate the total work of a i^{th} worker, and let T be a vector (column, shown in formula (11)) with these values. Then:

$$T_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p t_j x_{ijk}; \quad (10)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_m \end{bmatrix}, \quad (11)$$

where $\max_i \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p t_j x_{ijk} \right) = \max(T_i)$ – the work done by the worker who worked the most hours; $\min_i \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p t_j x_{ijk} \right) = \min(T_i)$ – the work done by the worker who worked the least hours.

t will indicate a vector column with a time value element t_j . Condition (6) is the objective function

with which to minimise the difference between the times of the driver who will work the longest time with that of the driver who will work the shortest time for a given period. With the notations (6) thus introduced, it can also be expressed in the following way:

$$Z = \min_x \{ \max_i T - \min_i T \}. \quad (12)$$

Condition (7) corresponds to the fact that each activity on all days must be performed by only one driver.

Condition (8) reflects the fact that on all days, one driver can perform one activity per day at most. A driver may not be employed for a given day (if $m > n$, then $m - n$ is the number of workers per day who are not employed).

Condition (9) is a condition for binary of the variables due to the specifics of the model.

Thus, conditions (6) – (9) represent an optimization mathematical model of the problem posed with objective function (6) and constraints (7) – (9).

The calculations and programs are made using the product MATLAB version R2017b, which is one of the most powerful calculation software tools [14]; these are the so-called CAS systems (Computer Algebra System). MATLAB has a rich palette of optimization tools – linear, nonlinear, one-dimensional, multidimensional, continuous, integer, partially integer, single-criteria, multi-criteria, etc. In MATLAB the embedded optimization functions also have a wide choice of settings, depending on the specific problems [14]. In addition, MATLAB also supports its own programming language, which can be used to make solvers for solving problem (6) – (9) at random data entry m , t and p .

The model (6) – (9) is an integer problem of class NP complete problems (nondeterministic polynomial time). Such tasks are extremely labor intensive as they take up a lot of time and memory resources. For their complete solution, it is sometimes necessary to completely crawl the tree of all possible options, and these options, even with relatively small dimensions, can reach a colossal number of possible options for verification. In the specific problem (6) – (9), this number is 2^{mnp} . If we consider the work of 10 drivers working on 8 routes

per day, then for 7 days, the total number of possible solutions is $2^{10 \cdot 8 \cdot 7} = 3.774 \cdot 10^{168}$, which means that if a software makes one crawl of the decision tree for one millionth of a second, it would take it about

$$\frac{2^{10 \cdot 8 \cdot 7}}{60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365.4 \cdot 1000000} \approx 1.1954 \cdot 10^{155} \text{ years to}$$

complete all the solutions. This requires the use of approximate methods: heuristic, stochastic [15], genetic, and other algorithms [16–18]. With these methods, solutions are obtained that are close to optimal.

The especially built-in ga function of MATLAB makes it possible to solve problems in which it is possible that both the objective and the constraints are nonlinear [13, 14]. This solver is based on genetic algorithms [18–20]. Table 1 shows the main differences between classical and genetic algorithms.

Table 1
Таблица 1

Main differences between classical and genetic algorithms
Основные различия между классическим и генетическим алгоритмами

Classical algorithms	Genetic algorithms
Generate a single point on each iteration. The sequence of points tends to the optimal solution	Generate a population of points on each iteration. The point of the population with the lowest value of fitness function tends to the optimal solution
The choice of the next point is determined	The choice of the next population is random

The solver ga solves the problem to a minimum, i.e. it minimizes the expression:

$$\max_i T - \min_i T, \quad (13)$$

or the expression:

$$\max_i [T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_m] - \min_i [T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_m]. \quad (14)$$

The two components (minuend, subtrahend) of (13) are functions that are in the most general case non-differentiable and discrete in the domain. These assumptions would make it difficult for almost any modern solver, given that it initially

seeks to calculate the gradient of the target function. To avoid this, the functions (14) are expressed by elementary functions and a finite number of arithmetic operations applied to them (including rising to an arbitrary degree). Thus, the non-differentiable functions $\max_i(f_1, f_2, \dots, f_q)$ and $\min_i(f_1, f_2, \dots, f_q)$, will be subject to differentiation, provided that their arguments are continuous, as well as the functions f_i themselves. In this case, the functions f_i are continuous, but the arguments are discrete.

Considering the displayed border crossings (15) and (16):

1) if $f_i \geq 0, r \in \mathbb{R}$, for $\forall i = \overline{1, q}$, then

$$\lim_{r \rightarrow \infty} (f_1^r + f_2^r + \dots + f_q^r)^{\frac{1}{r}} = \max_i f_i, \quad (15)$$

2) if $f_i \geq 0, r \in \mathbb{R}, \forall i = \overline{1, q}$, then

$$\lim_{r \rightarrow \infty} (f_1^{-r} + f_2^{-r} + \dots + f_q^{-r})^{\frac{1}{r}} = \min_i f_i, \quad (16)$$

the objective function (6) can be represented as

$$Z = \min_x \left\{ \lim_{r \rightarrow \infty} (T_1^r + T_2^r + \dots + T_m^r)^{\frac{1}{r}} - \lim_{r \rightarrow \infty} (T_1^{-r} + T_2^{-r} + \dots + T_m^{-r})^{\frac{1}{r}} \right\}. \quad (17)$$

Expressions (15) and (16) are differentiated (with continuous arguments).

In numerical calculations, this boundary transition would take an extremely long time for each iteration. Therefore, a sufficiently large, specific value is set for r . Numerical experiments on test tasks show that it is enough for the parameter r to take values around 30–40, but for this research the value of the parameter has been increased to 100.

Table 2 shows three script files programmed in the MATLAB R2017b environment, solving problem (6) – (9), using the genetic solver ga [19, 20]. For their use, they are in a separate folder, which is "selected" by the user for the current one. This is due to the use of global variables (global variables are listed in the presented script files and functions) in the MATLAB environment. The input variables used in the calculations are number of workers m , a vector with values of the times of activities t and the number of days p .

Table 2
Таблица 2
Script files programmed in MATLAB R2017b environment,
solving problem (6) – (9),
using the genetic solver ga
Файлы сценариев, запрограммированные в среде
MATLAB R2017b, решающие задачу (6) – (9)
с использованием генетического алгоритма

File 1 realizing target function (6)	File 2 realizing target function (17), at $r = 100$	File 3 (named optiProblems – script file) – this is the main file. In it, the user enters the values of the number of workers m , a vector with values of the times of activities t and the number of days p . Then the calculation is started with the Run button (or the optiProblems command is set in the command window). In the specific example, the parameters are as follows: $m = 10; t = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]; p = 7$
--	---	---

In the *optiProblems* script file which solves problem (6) – (9), in the ga server a reference is made to the target function. This function can be set in type (6) or in type (17) to achieve more accurate and faster calculations. In the *optiProblems* script, if the server ga is called with the first function – *myfun1*, then the optimization will be performed with the target function in the form (6), if it is called with the second – *myfun2*, then the optimization will be performed with the target function in the form (17). The output data are p number of matrices, each matrix being responsible for the distribution of activities in one working day. The rows in the matrix correspond to the workers and the columns – to the activities. If an element in the matrix assumes a value of 1, then the worker who corresponds to the order of the matrix for this element performs the activity corresponding to the activity in the given column for this element. The data output is also the value of the objective function (non-negative number, at best equal to zero).

Results of application of the mathematical model for determining the work of drivers

In order to evaluate the performance of the already built solver *optiProblems*, test variants of real tasks have been considered. In this case,

two are provided. In the first option, 3 workers are considered who perform 3 activities for 3 days. The duration of the activities is indicated, respectively, by 1, 2, 3. The input data of the program are: $m = 3; t = [1, 2, 3]; p = 3$.

The results are as follows:

$$T(:, :, 1) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \mathbf{1} \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \end{pmatrix}, T(:, :, 2) = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{1} \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \end{pmatrix},$$

$$T(:, :, 3) = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{1} & 0 \\ \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{1} \end{pmatrix}.$$

The result of the first matrix ($T(:, :, 1)$) shows that the first worker (row one) on the first day will perform a third activity (column three, bold unit), the second worker (row two, bold unit) on the first day will engage in a second activity (column two, bold unit), and the third (row three) – on the first day will perform a first activity (column one). The interpretation of the other matrices is similar. They are for the next two days. The value of the objective function (TZ) is 0, and the problem has a trivially optimal solution. One such solution would be (on a rotating basis) if the first worker performed the first activity on the first day, the second day engaged in the second and the third day the third activity. The ordinance of these activities by days for the first worker would look like (1, 2, 3). The ordinance of the activities for the second worker by days (2, 3, 1) and for the third worker (3, 1, 2). In this way, each worker performed each activity once and the target function has a value of 0 (in the result, this is the value of TZ).

This is a test option and was chosen to have a trivial solution – one such optimal solution is through a cyclic change, i.e. worker 1 performs activity 1 during the first day, activity 2 during the second and activity 3 during the third day. Worker 2 performs activity 2 on day 1, activity 3 on day 2 and activity 1 on day 3. Worker 3 performs activity 3 on day 1, activity 1 on day 2 and activity 2 on day 3.

In the next variant 7 workers for 5 days have to perform 6 activities with duration in hours respec-

tively: 6.6, 7.4, 8, 8.3, 8.7 and 9 hours. The input data are: $m = 7$; $t = [6.6, 7.4, 8, 8.3, 8.7, 9]$; $p = 5$. For convenience, the solution is given in Table 3.

Table 3
Таблица 3

Number of an activity carried out by
a worker on a given day
Работа, выполняемая сотрудниками
в определенные дни

Day Worker	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
Worker 1	2	1	1	1	3
Worker 2	5	0	6	3	4
Worker 3	1	2	2	2	1
Worker 4	4	5	4	0	6
Worker 5	6	6	0	4	2
Worker 6	3	3	5	6	0
Worker 7	0	4	3	5	5

The results in Table 3 mean the following: Worker 1, on the first day performs activity 2 (in bold), on the second, third, and fourth day activity 1 (in bold), and on the fifth – activity 3 (in bold).

Zero in a given row and column means that the respective worker on a given day is not performing any activity and is resting (in grey boxes). For example, Worker 5 does not work on Day 3. The working time of each employee during the week is as follows: Worker 1 – works 35.2 hours; Worker 2 – works 34 hours; Worker 3 – works 35.4 hours; Worker 4 – works 34.3 hours; Worker 5 – works 33.7 hours; Worker 6 – works 33.7 hours and Worker 7 – works 33.7 hours.

The maximum time of work during the week of Worker 1 is 35.4 hours, and the minimum of workers 5, 6 and 7, which is 33.7 hours. Thus, the difference between the minimum and maximum time is 1.7 hours for the five working days. This example is based on a real situation from practice and no optimal solution is known for it. Without an algorithm based on complete exhaustion, this solution can't be claimed to be the optimal. The solution obtained here on the basis of genetic algorithms is completely satisfactory from a practical point of view. If for the person making the decision (the manager of the company), this decision is not satisfactory, the search

for the next solution should be continued, with the idea to find a better solution if there is one.

Conclusion

The paper presents a solution to a problem in which such a distribution of workers' time during the week is sought, where the difference between the time of the worker who has worked the longest hours and the worker with the shortest hours is minimal. For this purpose, a mathematical model has been created which is an integer problem of class NP complete problems (nondeterministic polynomial time). The solution of the model is done by using the built-in ga function of MATLAB, based on genetic algorithms, which allows solving problems in which both the target function and the constraints may be nonlinear. For this purpose, script files have been created, programmed in the MATLAB R2017b environment, solving the task with the help of the genetic ga solver.

The results obtained in the two tests, which seek for the difference between the minimum and maximum working time of workers to be minimal, lead to the following:

In the first case with three workers working three days on three different activities, the most appropriate option is the rotation principle, in which each worker changes his job every day/week, if possible, and the workers are interchangeable.

In the second case with seven workers performing six activities in one week, it is precisely determined which worker must perform which activities, where the difference between the minimum and maximum time is 1.7 hours for the five working days, because it varies from 33.7 hours to 35.4 hours. In this variant, the rotation principle can also be applied in order for workers to be loaded equally. If for the person making the decision (the manager of the company), this decision is not satisfactory, the search for the next solution should be continued until a better solution is found.

The proposed model is suitable in cases where workers are dissatisfied with the fact that they work different amount of time, with uneven workload, are interchangeable, and receive equal remuneration or bonuses for most of the work performed.

Acknowledgements. The research leading to these results has received funding from the Ministry of education and science under the National science program "Intelligent animal husbandry", grant agreement No Д01-62/18.03.2021.

Благодарности. Исследование профинансировано Министерством образования и науки в рамках национальной научной программы «Интеллектуальное животноводство», соглашение о гранте № Д01-62/18.03.2021.

References

1. United Nations. (2012). World Urbanization Prospects. The 2011 Revision. New York, 318 p. Available at: https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/WUP2011_Report.pdf (accessed 01.02.2022). (In English).
2. Hasle, G., Lie, K.-A., & Quak, E. (2007). Geometric modelling, numerical simulation, and optimization: Applied Mathematics at SINTEF. Springer, 558 p. (In English). ISBN 978-3-540-68783-2.
3. Cirovic, G., Pamucar, D., & Božanić, D. (2014). Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. *Expert Systems with Applications*, 41(9), 4245–4258 p. (In English). DOI 10.1016/j.eswa.2014.01.005.
4. Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & Gonzalez-Feliu, J. (2017). Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), pp. 51-79. (In English). DOI 10.1007/s13676-014-0074-0.
5. Friswell, R., & Williamson, A. (2019). Management of heavy truck driver queuing and waiting for loading and unloading at road transport customers' depots. *Safety Science*, (120), pp. 194-205. (In English). DOI 10.1016/j.ssci.2019.06.039.
6. Friswell, R., & Williamson, A. (2010). Work characteristics associated with injury among light/short-haul transport drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), pp. 2068-2074. (In English). DOI 10.1016/j.aap.2010.06.019.
7. Steinbakk, R. T., Ulleberg, P., Sagberg, F., & Fostervold, K. I. (2017). Analysing the influence of visible roadwork activity on drivers' speed choice at work zones using a video-based experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 44, pp. 53-62. (In English). DOI 10.1016/j.trf.2016.10.003.
8. Gatta, V., Marcucci, E., Nigro, M., & Serafini, S. (2019). Sustainable urban freight transport adopting public transport-based crowdshipping for B2C deliveries. *European Transport Research Review*, 11(1), 14 p. (In English). DOI 10.1186/s12544-019-0352-x.
9. Mak, Ho-Yin (2018). Peer-to-peer crowdshipping as an omnichannel retail strategy. Available at: <https://www.readcube.com/articles/10.2139/ssrn.3119687>. (In English). DOI 10.2139/ssrn.3119687.
10. Simeonov, D., & Pencheva, V. (2001). Interaction between modes of transport [Взаимодействие между видовете транспорт]. Ruse, Publ. Printing base of "Angel Kanchev" University of Ruse, 308 p. (In Bulgarian). ISBN 954-712-145-6.
11. Conn, A. R., Gould, N. I. M., & Toint, Ph. L. (1991). A globally convergent augmented lagrangian algorithm for optimization with general constraints and simple bounds. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 28(2), pp. 545-572. DOI 10.1137/0728030.
12. Conn, A. R., Gould, N., & Toint, Ph. L. (1997). A globally convergent augmented lagrangian barrier algorithm for optimization with general inequality constraints and simple bounds. *Mathematics of Computation*, 66(217), pp. 261-288. (In English). DOI 10.1090/S0025-5718-97-00777-1.
13. Tonchev, J., & Vitliemov, V. (2013). Optimization with MATLAB. Pragmatic approach [Оптимизация с MATLAB. Прагматичен подход]. Ruse, Publ. Printing base of "Angel Kanchev" University of Ruse, 250 p. (In Bulgarian). ISBN 978-954-712-593-3.
14. Dimov, I., & Todorov, V. (2016). Error analysis of biased stochastic algorithms for the second kind fredholm integral equation. In: Margenov, S., Angelova, G., Agre, G. (eds.) *Innovative Approaches and Solutions in Advanced Intelligent Systems. Studies in Computational Intelligence*, Vol. 648. Publ. Springer, pp. 3-16. (In English). DOI 10.1007/978-3-319-32207-0.
15. Dimitrov, Yu., Miryanov, R., & Todorov, V. (2018). Asymptotic expansions and approximations for the Caputo derivative. *Computational and Applied Mathematics*, 37(5), 5476-5499. (In English). DOI 10.1007/s40314-018-0641-3.
16. Pillay, N., & Qu, R. (2018). *Hyper-heuristics: theory and applications*. Cham, Switzerland, Publ. Springer, 134 p. (In English). DOI 10.1007/978-3-319-96514-7.

17. Thampi, S. M., Piramuthu, S., Li, K., Berretti, S., Wozniak, M., & Singh, D. (2021). Machine learning and metaheuristics algorithms, and applications second symposium, SoMMA 2020, Chennai, India, October 14-17. Revised Selected Papers, 256 p. (In English). DOI 10.1007/978-981-16-0419-5.
18. Web page of the Mathworks. Help for function ga. Available at: https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html#mw_4a8bfdb9-7c4c-4302-8f47-d260b7a43e26 (accessed 01.02.2022). (In English).
19. Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization & machine learning. Publ. Addison-Wesley publishing company, Inc., 412 p. (In English). ISBN: 9780201157673.
20. Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). Introduction to genetic algorithms. Berlin, Heidelberg, Publ. Springer, 442 p. (In English). DOI 10.1007/978-3-540-73190-0.

Information about the authors

Asen Asenov, PhD, Associate Professor, Dean of the Faculty of Transport, "Angel Kanchev" University of Ruse, e-mail: asasenov@uni-ruse.bg

Velizara Pencheva, PhD, Professor at the Department of Transport, "Angel Kanchev" University of Ruse, e-mail: vpencheva@uni-ruse.bg

Ivan Georgiev, Associate Professor at the Applied Mathematics and Statistics Department, "Angel Kanchev" University of Ruse, e-mail: irgeorgiev@uni-ruse.bg

Сведения об авторах

Асенов Асен, д-р техн. наук, доцент, декан транспортного факультета, Русенский университет имени Ангела Кынчева, e-mail: asasenov@uni-ruse.bg

Пенчева Велизара, д-р техн. наук., профессор кафедры транспорта, Русенский университет имени Ангела Кынчева, e-mail: vpencheva@uni-ruse.bg

Георгиев Иван, доцент кафедры прикладной математики и статистики, Русенский университет имени Ангела Кынчева, e-mail: irgeorgiev@uni-ruse.bg

*Получена 13 октября 2023 г., одобрена 10 ноября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 13 October 2023, Approved 10 November 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

УДК 625.08

2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЛЕЗВИЯ НОЖА БУЛЬДОЗЕРА В НАЧАЛЕ ПРОХОДА

В. А. Николаев

Ярославский технический университет, Ярославль, Россия

DETERMINATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR MOVING THE BULLDOZER KNIFE AT THE BEGINNING OF THE PASSAGE

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University, Yaroslavl, Russia

Аннотация. Для удаления камней, кустов, деревьев с полосы отвода будущей дороги целесообразно использовать агрегаты с бульдозерным оборудованием. Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств. Не зная величины частных затрат энергии при работе каждого элемента рабочего органа, осмысленно его совершенствовать не представляется возможным. Целью предлагаемого теоретического исследования является подробный анализ взаимодействия с грунтом лезвия ножа существующего бульдозерного отвала для последующего совершенствования бульдозерного оборудования, объект исследования – процесс взаимодействия с грунтом лезвия ножа.

В предлагаемой схеме резание грунта осуществляется с микросдвигами. В зависимости от свойств грунта и скорости агрегата в грунте будет преобладать деформация псевдосдвига, объемного сжатия, смятия. Для определения силы, необходимой для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, используем условный обобщенный предел прочности грун-

Abstract. To remove stones, bushes, trees from the right-of-way of the future road it is advisable to use machines with bulldozer equipment. Theoretical basis for excavation has been considered in detail, however, based on it, it is difficult to identify and compare the partial energy costs of the impact on the ground by the elements of equipment. Without knowing the value of partial energy consumption during the operation of each element of the work tool, it is impossible to improve it in a reasonable way. The purpose of the proposed theoretical study is a detailed analysis of the interaction of the soil and the knife of the bulldozer blade for the subsequent improvement of bulldozer equipment. The object of the study is the process of interaction between the soil and the knife.

In the proposed scheme, soil cutting is carried out with micro-shiftings. Depending on soil properties and machine velocity, deformations of pseudo-displacement, volume compression, crumpling will predominate in the soil. To determine the force required for crumpling, compression and pseudo-displacement of the soil in a sloping surface, we use the conditional generalized limit of soil crumpling strength. After determining, the force required for pseudo-displacement the soil in a sloping surface,

та на смятие. Определив силу, необходимую для псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, определяем затраты энергии на первичное смятие и псевдосдвиг одного кубического метра грунта. Затем определяем усилие первичного сдвига грунта краем ножа бульдозера и соответствующие затраты энергии. Вычисляем общие затраты энергии, мощность на перемещение лезвия ножа бульдозера.

На основе разработанной методики определены затраты энергии: на первичное смятие и псевдосдвиг одного кубического метра грунта, на сдвиг грунта в продольно-вертикальной плоскости краем ножа, общие затраты энергии, мощность на перемещение лезвия ножа бульдозера при различном его заглублении. Построены и аппроксимированы соответствующие зависимости. Расчет затрат энергии на перемещение лезвия ножа бульдозера позволит в дальнейшем определить общие затраты энергии с целью модернизации бульдозерного оборудования, направленной на уменьшение этих затрат.

Ключевые слова: бульдозерное оборудование, нож бульдозера, резание грунта, анализ процесса резания, затраты энергии на псевдосдвиг, затраты энергии на сдвиг краем ножа, общие затраты энергии

Для цитирования: Николаев, В. А. Определение затрат энергии на перемещение лезвия ножа бульдозера в начале прохода / В. А. Николаев. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-90-103. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 90–103.

For citation: Nikolayev, V. A. (2023). Determination of energy consumption for moving the bulldozer knife at the beginning of the passage. Architecture, Construction, Transport, (4(106)), pp. 90-103. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-90-103.

Введение

Для удаления камней, кустов, деревьев с полосы отвода будущей дороги, обнажения подстилающего слоя используют агрегаты с бульдозерным оборудованием. Существующие агрегаты малопроизводительны, поэтому часто они ограничивают темп строительства. Для разработки грунта, перемещения призмы волочения необ-

ходимы большие затраты энергии. В связи этим существует необходимость совершенствования бульдозерного оборудования.

Теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены. Сформулированы общие подходы к проблеме [1, 2], в частности исследовано влияние на затраты энергии трения грунта о нож [3, 4]. В. И. Баловнев [5, 6] оценивает

we identify the energy consumption for the initial crumpling and pseudo-displacement of one cubic meter of soil. Then we determine the primary shear strength of the soil by edge of the bulldozer knife and the corresponding energy consumption; calculate the total energy costs and power to move the bulldozer knife. Based on the developed methodology, has been determined the energy consumption for primary crumpling and pseudo-displacement of one cubic meter of soil, for shifting the soil in the longitudinal-vertical plane by the knife edge, the total energy consumption, power to move the knife of the bulldozer blade at different depths. The corresponding functions are constructed and approximated. Calculation of energy consumption for moving the bulldozer knife will allow to determine the total energy consumption in order to upgrade the bulldozer equipment for reducing the costs in the future.

Key words: bulldozer equipment, bulldozer knife, soil cutting, cutting process analysis, energy consumption for pseudo-displacement, energy consumption for shifting with knife edge, total energy costs

взаимодействие рабочих органов с грунтом по интегральному показателю прочности. Кроме этого, рассмотрено влияние скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта при свободном резании [7, 8], взаимодействие с грунтом рабочих органов землеройных машин непрерывного действия [9], в том числе с активными рабочими органами [10, 11]. Однако в исследованиях резания грунта авторы применяют преимущественно синтезный метод, рассматривая рабочий орган в целом. Недостаток этого метода заключен в сложности оценки частных затрат энергии при работе каждого элемента рабочего органа. Чтобы выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств, следует применить аналитический метод. Целью предлагаемого теоретического исследования является подробный анализ взаимодействия с грунтом лезвия ножа существующего бульдозерного оборудования [12, 13] для его последующего совершенствования.

Лезвие ножа совершает [14] (рис. 1а):

- смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта по наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении АН;
- сдвиг грунта в условной плоскости АВСН краем ножа;
- создание щели в массиве грунта с одного края прохода ножа при полузажатом резании или по краям прохода при зажатом резании;
- подъем края массива грунта с одного края прохода ножа при полузажатом резании или по краям прохода при зажатом резании;
- преодоление силы инерции разрабатываемого грунта;
- преодоление силы трения грунта о лезвие.

Во-первых, явный сдвиг грунта в наклонной плоскости, след которой в продольно-вертикальном сечении АН, маловероятен в связи с большой длиной следа поверхности сдвига. Поэтому назовем это явление псевдосдвигом. Во-вторых, в сравнении с затратами энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта в плоскости, след которой в продольно-вертикальном

сечении АН, а также сдвиг грунта краем ножа в условной плоскости АВСН остальные затраты энергии незначительны. Их вычисление весьма трудоемко. Поэтому целесообразно рассчитать затраты энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта, сдвиг грунта краем ножа, а прочие затраты энергии: на создание щели в массиве грунта с одного края прохода ножа, подъем края массива грунта, преодоление силы инерции разрабатываемого грунта, преодоление силы трения грунта о лезвие, – учесть поправочным коэффициентом $k_{сд+}=1.1$.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является процесс взаимодействия с грунтом лезвия ножа. Общие затраты энергии на этот процесс включают частные затраты энергии.

Затраты энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта по наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении АН (рис. 1а)

В предлагаемой схеме резание грунта осуществляется с микросдвигами. Между микросдвигами грунт неподвижен на лезвии. В момент микросдвига грунт резко перемещается по лезвию на расстояние микросдвига. Накопленный в грунте от воздействия лезвия ножа упругий потенциал реализуется через смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта [9, 10]. В зависимости от свойств грунта и скорости агрегата будет преобладать в грунте деформация сдвига, объемного сжатия, смятия. Применение условного обобщенного предела прочности $\sigma_{см\text{ усл}}^B$ на смятие удобно для расчетов, так как в расчетной схеме можно выявить поверхность смятия. Выявить поликриволинейную поверхность псевдосдвига грунта значительно сложнее. Еще сложнее выявить области объемного сжатия грунта от воздействия лезвия ножа бульдозера. Поэтому для определения силы, необходимой для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта в наклонной плоскости, след которой в продольно-вертикальном сечении АН, используем условный обобщенный предел прочности грунта на смятие:

$$F_c = \sigma_{см\text{ усл}}^B S_c. \quad (1)$$

Площадь смятия грунта:

$$S_c = B l_{мсд}, \quad (2)$$

где B – ширина захвата бульдозера;

$l_{мсд}$ – расстояние микросдвига.

Условный обобщенный предел прочности грунта на смятие не является постоянным при различном заглублении ножа. С одной стороны, учитывая влияние псевдосдвига грунта, он зависит от длины $l_{сд}$ следа AH в продольно-вертикальном сечении (рис. 1а). Чем больше длина следа AH в продольно-вертикальном сечении, тем больше

предел прочности грунта на смятие. Для суглинков примем допущение: условный обобщенный предел прочности грунта на смятие $\sigma_{см\text{ усл}}^B$ прямо пропорционален длине следа плоскости псевдосдвига. При разработке других типов грунтов изменение условного обобщенного предела прочности грунта на смятие по мере заглубления ножа следует принять другим, основываясь на экспериментальных данных. Из опытных данных примем начальный предел прочности грунта на смятие $\sigma_{см\text{ нач}}^B$, когда нож бульдозера заглублен на 50 мм. Тогда условный обобщенный предел прочности грунта на смятие при i глубине хода ножа:

$$\sigma_{см\text{ усл}}^B = \sigma_{см\text{ нач}\text{ усл}}^B \frac{l_{сд\text{ и}}}{l_{сд-50}}, \quad (3)$$

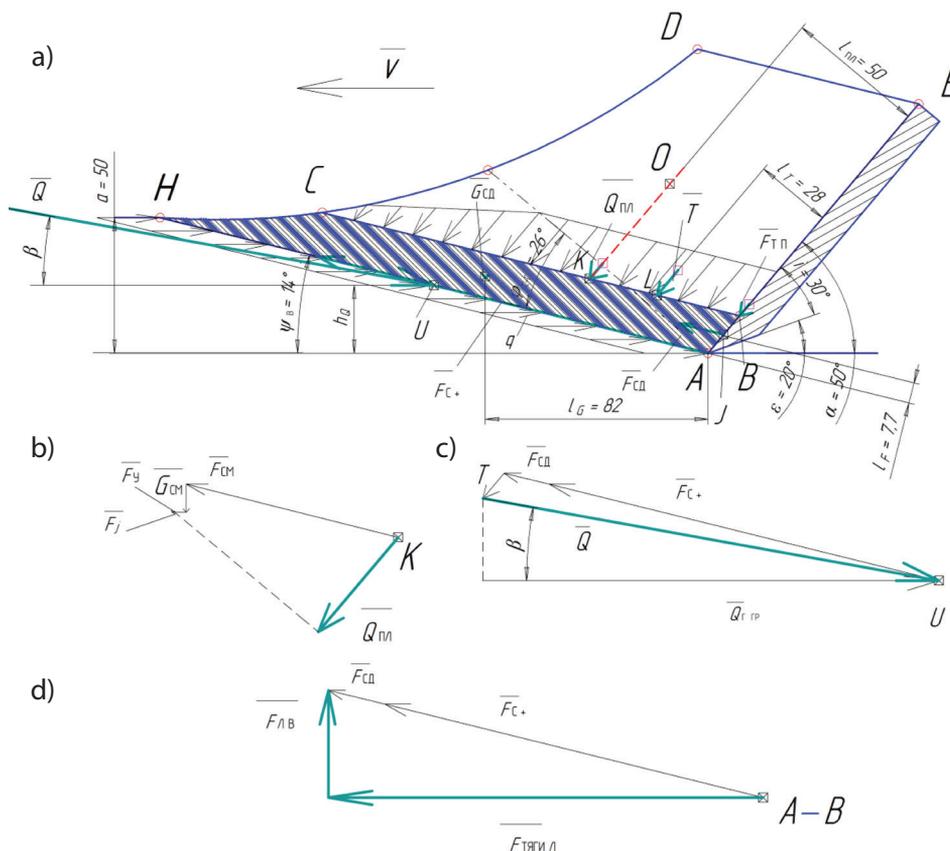


Рис. 1. Псевдосдвиг пласта грунта от воздействия лезвия ножа бульдозера: а) схема сил, приложенных к участку псевдосдвига; б) схема определения силы воздействия смещаемого участка на участок псевдосдвига; в) схема определения силы сопротивления Q массива грунта перемещению лезвия ножа; д) схема определения силы тяги

Fig. 1. Pseudo-displacement of the soil layer after impact of the bulldozer knife: а) scheme of forces applied to the pseudo-displacement section; б) scheme for determining the strength of the influence of the displaced section on the section of pseudo-displacement; в) scheme for determining the force of resistance Q of the soil body to the movement of the knife blade; д) scheme for determining the traction force

где l_{cd-50} – длина следа $АН$ в продольно-вертикальном сечении (рис. 1а) при глубине хода ножа $a = 0.05$ м;

$l_{cd i}$ – длина следа $АН$ в продольно-вертикальном сечении при i глубине хода ножа бульдозера.

С другой стороны, следует учесть влияние объемного сжатия грунта. Приложим силы, вызывающие объемное сжатие, по направлению, параллельному передней поверхности лезвия ножа (рис. 1а). На участок $АВСН$ первичного псевдосдвига сверху действует распределенная нагрузка, вызванная действием проекций совокупности сил [13]: смещения грунта $F_{cm'}$ тяжести смещаемого грунта $G_{cm'}$ противодействия инерции грунта F_j . Сила ускорения смещаемого грунта F_y увеличивает объемное сжатие грунта на участке $АВСН$. Сложив эти силы (рис. 1b), определим сосредоточенную силу воздействия пласта $Q_{nl'}$ которой заменим распределенную нагрузку. Перенесем в соответствующем масштабе силу $Q_{nl'}$ на рис. 1а. Направление этой силы параллельно поверхности ножа, а точка K ее приложения расположена на следе центра масс смещаемого грунта. Сложив ее с силой преодоления трения грунта F_{mn} о поверхность ножа и нижней части отвала, приложенной к точке B , получим суммарную силу воздействия грунта T на участок $АВСН$ первичного псевдосдвига со стороны участка $BCDE$ смещаемого грунта.

Точку L приложения силы T определим из пропорции (рис. 1):

$$l_T = l_{nl} \frac{Q_{nl'}}{T}. \quad (4)$$

Определив силу F_c , необходимую для псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении $АН$, по формуле (1), учитывающей длину следа псевдосдвига грунта, и сопоставив ее с силой T , определим степень влияния объемного сжатия на силу, необходимую для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта по наклонной поверхности $АН$. Предположим, сила, необходимая для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта по наклонной поверхности $АН$:

$$F_{c+} = k_{ock} F_c, \quad (5)$$

где k_{ock} – коэффициент учета объемного сжатия пласта грунта.

$$k_{ock} = 1 + \frac{T}{F_c}. \quad (6)$$

Горизонтальная сила:

$$F_{c+zop} = F_{c+} \cos \psi_B, \quad (7)$$

где угол $\psi_B = 14^\circ$ получен из рис. 1а.

Затраты энергии на первичное смятие и псевдосдвиг одного кубического метра грунта по поверхности сдвига, след которой в продольно-вертикальном сечении $АН$:

$$u_{cd AN} = F_{c+zop} s, \quad (8)$$

где s – путь агрегата, необходимый для разработки одного кубического метра грунта.

Затраты энергии на сдвиг грунта в продольно-вертикальной плоскости $АВСН$ краем ножа (рис. 1а)

Так как сдвиг пласта состоит из периодических микросдвигов, при вычислении затрат энергии на сдвиг грунта следует сделать поправку на коэффициент микросдвигов $k_{мcd} \approx 1.5$ [9]. Коэффициент микросдвигов учитывает затраты энергии на накопление в грунте упругого потенциала. Проявления этой энергии визуальным образом не выражаются, так как энергия рассеивается в грунте, то есть происходит ее диссипация.

Усилие первичного сдвига грунта краем ножа бульдозера:

$$F_{cd} = k_{мcd} \tau_{cd}^B S_{cdKH}, \quad (9)$$

где S_{cdKH} – площадь сдвига грунта кромкой ножа, τ_{cd}^B – предел прочности грунта на сдвиг.

Горизонтальная сила:

$$F_{cd zop} = F_{cd} \cos \psi_B, \quad (10)$$

где угол $\psi_B = 14^\circ$, получен из рис. 1а.

Затраты энергии на первичный сдвиг грунта краем ножа объемом один кубический метр в плоскости $АВСН$:

$$u_{cd АВСН} = F_{cd zop} s, \quad (11)$$

где s – путь агрегата, необходимый для разработки одного кубического метра грунта.

Общие затраты энергии, мощность, сила тяги

Общие затраты энергии, необходимой для первичного смятия, псевдосдвига и сдвига одного кубического метра грунта лезвием бульдозера:

$$u_{\Sigma cд} = k_{cд+} (u_{cдAH} + u_{cдABCH}), \quad (12)$$

где $k_{cд+}$ – поправочный коэффициент учета прочих затрат энергии: на создание щели в массиве грунта с одного края прохода ножа, подъем края массива грунта, преодоление силы инерции разрабатываемого грунта, преодоление силы трения грунта о лезвие ножа.

Мощность, затрачиваемая трактором на резание грунта ножом:

$$N_{cд} = \frac{u_{\Sigma cд}}{\tau}, \quad (13)$$

где время τ , необходимое для разработки одного кубического метра грунта бульдозером, определяется делением пути s , необходимого для разработки одного кубического метра грунта, на скорость агрегата v_a :

$$\tau = \frac{s}{v_a}. \quad (14)$$

На рис. 1а силу F_{c+} , необходимую для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта, направим по следу псевдосдвига AH . Силу первичного сдвига грунта $F_{cд}$ краем ножа бульдозера направим параллельно следу псевдосдвига AH из точки J , делящей проекцию лезвия ножа AB пополам. Эти силы в совокупности с силой T вызывают распределенную нагрузку q противодействия массива грунта перемещению лезвия ножа, которую приведем к сосредоточенной силе $Q_{z зр}$. Сложив на рис. 1с силы F_{c+} , $F_{cд}$ и T , получим силу $Q_{z зр}$. Силу тяги трактора $F_{тяги л зр}$ для осуществления первичного смятия, псевдосдвига и сдвига грунта лезвием ножа бульдозера получим сложением сил F_{c+} и $F_{cд}$ (рис. 1d) и проецированием на горизонталь.

Полученные из построений силы $Q_{z зр}$, $F_{тяги л зр}$, $F_{л в зр}$ следует увеличить, умножив на поправочный коэффициент учета прочих затрат энергии $k_{cд+}$:

$$Q_{z зр}, F_{тяги л зр}, F_{л в зр} = k_{cд+} (Q_{z зр}, F_{тяги л зр}, F_{л в зр}), \quad (15)$$

где $(Q_{z зр}, F_{тяги л зр}, F_{л в зр})$ – значения соответствующих сил, полученные графическим путем. Точку

U приложения горизонтальной силы $Q_{z зр}$ противодействия массива грунта перемещению лезвия ножа вычислим из условия равновесия моментов относительно точки A :

$$h_Q = \frac{T \cdot l_T + F_{cд} \cdot l_F + G_{cд} \cdot l_G}{Q_{z зр}}, \quad (16)$$

где $G_{cд}$ – сила тяжести участка грунта, площадь сечения которого в продольно-вертикальной плоскости $ABCH$:

$$G_{cд} = g \rho B S_{ABCH}. \quad (17)$$

Сила сопротивления Q массива грунта перемещению лезвия ножа направлена не горизонтально, а отклонена на угол β (рис. 1с). Вертикальная сила воздействия лезвия на грунт $F_{л в зр}$ направлена вверх (рис. 1d). Равная ей сила воздействия грунта на лезвие направлена вниз.

Результаты

Для расчета примем следующие исходные данные. Грунт – суглинки плотностью $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Движение агрегата со скоростью $v_a = 1 \text{ м/с}$. Ширина отвала $B = 2.5 \text{ м}$. Примем начальный условный предел прочности грунта на смятие с учетом напряжений псевдосдвига $\sigma_{см нач усл}^B = 0.6 \text{ МПа}$ при заглублении ножа $a = 50 \text{ мм}$; предел прочности грунта на первичный сдвиг лезвием ножа бульдозера при полузажатом резании $\tau_{cд}^B = 0.8 \text{ МПа}$. Расстояние микросдвига 18 мм . Коэффициент микросдвигов $k_{мcд} = 1.5$. Поправочный коэффициент учета прочих затрат энергии $k_{cд+} = 1.1$. Глубина разработки грунта $a = 0.05 \text{ м}$.

Затраты энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта по наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении AH

Площадь смятия пласта грунта ножом бульдозера на расстоянии микросдвига (2):

$$S_c = 2500 \cdot 18 = 45000 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Сила, необходимая для смятия с учетом псевдосдвига грунта в наклонной поверхности, след которой в продольно-вертикальном сечении AH (1):

$$F_c = 0.6 \cdot 45000 = 27000 \text{ (Н)}.$$

Сложив силы смещения грунта F_{cm} (рис. 1b), тяжести смещаемого грунта G_{cm} , противодействия ножа инерции грунта F_j , ускорения смещаемого грунта F_y , определим сосредоточенную силу воздействия смещаемого пласта Q_{nl} [10] на пласт грунта, подвергающийся псевдосдвигу. Сосредоточенной силой Q_{nl} заменим распределенную нагрузку. Перенесем в соответствующем масштабе силу Q_{nl} на рис. 1а, направив ее на след луча ОК, параллельного передней поверхности ножа и проходящего через центр масс участка смещаемого грунта. Сила $Q_{nl} = 1\,336\text{ Н}$. Сложив силу Q_{nl} с силой $F_{mn} = 1\,033\text{ Н}$ [10] преодоления трения грунта о поверхность ножа и нижнюю часть отвала, получим суммарную силу воздействия грунта T на участок ABCN первичного псевдосдвига со стороны участка BCDE смещения грунта:

$$T = 1\,336 + 1\,033 = 2\,369\text{ (Н)}.$$

Из рис. 1а плечо силы Q_{nl} : $l_{nl} = 50\text{ мм}$. Точку L приложения силы T определим из пропорции (4):

$$l_T = 50 \cdot \frac{1\,336}{2\,369} = 28\text{ (мм)}.$$

Коэффициент учета объемного сжатия пласта грунта (6):

$$k_{ож} = 1 + \frac{2\,369}{27\,000} = 1.088.$$

Сила, необходимая для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта по наклонной поверхности АН (5):

$$F_{c+} = 1.088 \cdot 27\,000 = 29\,369\text{ (Н)}.$$

Горизонтальная сила (7):

$$F_{c+гор} = 29\,369 \cdot \cos 14^\circ = 28\,497\text{ (Н)}.$$

Путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта:

$$s = \frac{V}{B \cdot a} = \frac{1}{2.5 \cdot 0.05} = 8\text{ (м)}.$$

Затраты энергии на первичный сдвиг грунта объемом один кубический метр в поверхности сдвига, наклоненной к горизонтали под углом (8):

$$u_{сдАН} = 28\,497 \cdot 8 = 227\,969\text{ (Дж / м}^3\text{)}.$$

Затраты энергии на сдвиг грунта в продольно-вертикальной плоскости ABCN краем ножа

Площадь сечения S_{ABCN} сдвига грунта правой или левой кромкой ножа возьмем из рис. 1а. Если

заглубление ножа 50 мм, площадь поверхности сдвига грунта кромкой ножа $S_{сдкН} = 2\,882\text{ мм}^2$. Предел прочности грунта на первичный сдвиг лезвием ножа бульдозера при полузажатом резании $\tau_{сд}^B = 0.8\text{ МПа}$. Коэффициент микросдвигов $k_{мсд} = 1.5$. Усилие первичного сдвига грунта в продольно-вертикальной поверхности сдвига краем ножа (9):

$$F_{сд} = 1.5 \cdot 0.8 \cdot 2\,882 = 3\,458\text{ (Н)}.$$

Горизонтальная сила (10):

$$F_{сдгор} = 3\,458 \cdot \cos 14^\circ = 3\,355\text{ (Н)}.$$

Путь, необходимый для разработки одного кубического метра грунта, $s = 8\text{ м}$. Затраты энергии на первичный сдвиг грунта в продольно-вертикальной поверхности (11):

$$u_{сдABCN} = 3\,355 \cdot 8 = 26\,845\text{ (Дж / м}^3\text{)}.$$

Общие затраты энергии, мощность, сила тяги

Поправочный коэффициент учета прочих затрат энергии, кроме энергии на первичный сдвиг грунта, $k_{сд+} = 1.1$. Общие затраты энергии, необходимой для первичного смятия, псевдосдвига, объемного сжатия и сдвига одного кубического метра грунта лезвием бульдозера (12):

$$u_{\Sigma сд} = 1.1 \cdot (227\,969 + 26\,845) = 280\,296\text{ (Дж / м}^3\text{)}.$$

Время, необходимое для разработки одного кубического метра грунта бульдозером (14):

$$\tau = \frac{8}{1} = 8\text{ (с)}.$$

Мощность, затрачиваемая трактором на резание грунта лезвием ножа (13):

$$N_{сд} = \frac{280\,296}{8} = 35\,037\text{ (Вт)} \approx 35\text{ (кВт)}.$$

Силу F_{c+} , необходимую для смятия, сжатия и псевдосдвига грунта, направим по следу псевдосдвига АН (рис. 1а). Силу $F_{сд}$ первичного сдвига грунта краем ножа бульдозера направим параллельно следу псевдосдвига АН из точки J, делящей проекцию лезвия ножа АВ пополам. Сложив эти силы и силу T , графическим путем получим горизонтальную силу сопротивления массива грунта $Q_{сдзр} = 33\,374\text{ Н}$ (рис. 1с). Поправочный коэффициент $k_{сд+} = 1.1$. Горизонтальная сила (15):

$$Q_2 = 1.1 \cdot 33\,374 = 36\,711 \text{ (H)}.$$

Силу тяги трактора $F_{\text{тяги л гр}}$ (рис. 1d) для осуществления первичного смятия, псевдосдвига и сдвига грунта лезвием ножа бульдозера получим графическим сложением сил $F_{\text{с+}}$ и $F_{\text{сд}}$ и проецированием на горизонталь: $F_{\text{тяги л гр}} = 31\,832 \text{ H}$. С учетом поправочного коэффициента (15):

$$F_{\text{тяги л}} = 1.1 \cdot 31\,832 = 35\,015 \text{ (H)}.$$

Вертикальная сила воздействия лезвия на грунт: $F_{\text{л в гр}} = 7\,908 \text{ H}$. Получена графическим путем. С учетом поправочного коэффициента (15):

$$F_{\text{л в гр}} = 1.1 \cdot 7\,908 = 8\,699 \text{ (H)}.$$

Сила тяжести подвергающегося псевдосдвигу участка грунта, площадь сечения которого в продольно-вертикальной плоскости $ABCH$ (17):

$$G_{\text{сд}} = 9.8 \cdot 1600 \cdot 2.5 \cdot 3458 \cdot 10^{-6} = 113 \text{ (H)}.$$

Из рис. 1а плечи сил относительно точки A : $l_T = 28 \text{ мм}$; $l_F = 7.7 \text{ мм}$; $l_G = 82 \text{ мм}$. Точку U приложения горизонтальной силы противодействия массива грунта Q_2 перемещению лезвия ножа вычислим из условия равновесия моментов относительно точки A (16):

$$h_Q = \frac{2369 \cdot 28 + 3458 \cdot 7.7 + 133 \cdot 82}{36711} = 3.1 \text{ (мм)}.$$

Сила сопротивления массива грунта Q перемещению лезвия ножа будет направлена не горизонтально (рис. 1а), а отклонена на угол $\beta = 10.3^\circ$.

Выполнив аналогичные построения и расчеты, определим параметры при различном заглублении ножа. Они даны в таблицах 1–6.

Таблица 1

Table 1

Суммарная сила воздействия грунта T на участок $ABCH$ первичного псевдосдвига со стороны участка $BCDE$ смещения грунта и ее плечо относительно точки A

Total force T of ground effect on the $ABCH$ section of primary pseudo-displacement from the side of the $BCDE$ section of ground displacement and its shoulder relative to the point A

Глубина, a , м	Сила воздействия смещаемого пласта, $Q_{\text{нр}}$, Н	Сила трения пласта о поверхность ножа и нижней части отвала, $F_{\text{нр}}$, Н	Суммарная сила воздействия на псевдосдвигаемый участок грунта, T , Н	Плечо $l_{\text{нр}}$, мм	Плечо l_T силы T , мм
0.05	1 336	1 033	2 369	50	28
0.1	2 950	2 646	5 596	122	64
0.15	6 806	6 128	12 934	182	96
0.2	12 252	12 020	24 272	248	125
0.25	19 500	19 200	38 700	317	160
0.3	27 820	27 331	55 151	381	192

Таблица 2

Table 2

Затраты энергии на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта ножом
Energy costs for crumpling, volume compression and pseudo-displacement of soil with a knife

Глубина, a , м	Напряжение в грунте, Н/мм ²	Сила смятия и псевдосдвига, Н	Сила воздействия смещаемого грунта, Н	Коэффициент учета объемного сжатия	Сила, необходимая для смятия, сжатия и псевдосдвига, Н	Путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта, s , м	Объемные затраты энергии на смятие, сжатие и псевдосдвиг грунта, Дж/м ³
0.05	0.6	27 000	2 369	1.088	29 369	8	227 969
0.1	1.2	54 000	5 596	1.104	59 596	4	209 580
0.15	1.797	80 870	12 934	1.16	93 804	2.67	209 243
0.2	2.397	107 870	24 272	1.225	132 142	2	209 327
0.25	2.997	134 870	38 700	1.287	173 570	1.6	209 378
0.3	3.597	161 870	55 151	1.34	217 021	1.33	209 412

Таблица 3
Table 3

Затраты энергии на сдвиг грунта краем ножа
Energy costs for soil displacement by the knife edge

Глубина a , м	Напряже-ние сдвига грунта, МПа	Площадь сдвига грунта краем ножа, мм ²	Коэффициент микро-сдвигов	Сила, необ-ходимая для сдвига грунта, Н	Путь бульдозера, необходи-мый для разработки одного кубического метра грунта, s , м	Объемные затраты энергии, Дж/м ³
0.05	0.8	2 882	0.5	3 458	8	26 845
0.1	0.8	6 293	0.5	7 552	4	29 309
0.15	0.8	9 590	0.5	11 508	2.67	29 776
0.2	0.8	12 924	0.5	15 509	2	30 096
0.25	0.8	16 271	0.5	19 525	1.6	30 312
0.3	0.8	19 618	0.5	23 542	1.33	30 456

Таблица 4
Table 4

Мощность, затрачиваемая на резание грунта ножом бульдозера
Power used to cut the soil with the bulldozer knife

Глуби-на a , м	Коэффици-ент $k_{сд+}$	Общие затраты энергии на резание одного кубического метра грунта, Дж/м ³	Время разработки одного кубического метра грунта, с	Мощность, затрачи-ваемая на резание грунта ножом, Вт	Мощность, кВт
0.05	1.1	280 296	8	35 037	35
0.1	1.1	262 778	4	65 694	65.7
0.15	1.1	262 921	2.67	98 595	98.6
0.2	1.1	263 365	2	131 683	131.7
0.25	1.1	263 659	1.6	164 787	164.8
0.3	1.1	263 854	1.33	197 891	197.9

Таблица 5
Table 5

Силы воздействия лезвия ножа на грунт и сила противодействия массива грунта перемещению лезвия ножа
Forces of the knife edge impact on the soil and the force of the soil mass counteracting the movement of the knife edge

Глуби-на a , м	Сила Q_{zpp} , Н	Сила тяги, кН	Вертикаль-ная сила, Н	Коэффициент $k_{сд+}$	Сила Q_{z} , Н	Сила тяги, кН	Вертикальная сила, Н
0.05	33 374	31.8	7 908	1.1	36 711	35.0	8 699
0.1	68 731	65	16 187	1.1	75 604	71.5	17 806
0.15	110 470	102	25 509	1.1	121 517	112.4	28 060
0.2	158 739	143	35 660	1.1	174 613	157.4	39 226
0.25	212 142	187	46 848	1.1	233 356	206.1	51 533
0.3	268 816	233	58 316	1.1	295 698	256.7	64 148

Таблица 6
Table 6

Сила сдвига грунта лезвием ножа и отклонение силы Q от горизонтали
Force of soil displacement by the knife edge and deviation of force Q from horizontal

Глубина а, м	Плечо силы $F_{сд}$, мм	Сила $F_{сд}$, Н	Плечо силы $G_{сд}$, мм	Сила $G_{сд}$, Н	Сила $Q_{2зр}$, Н	Плечо силы $Q_{2зр}$, мм	Сила тяги, Н	Косинус угла отклонения силы Q от горизонтали	Угол отклонения силы Q от горизонтали
0.05	7.7	3 458	82	113	33 374	3.1	31 832	0.954	10.3
0.1	7.7	7 552	183	247	68 731	6.7	65 011	0.946	9.8
0.15	7.7	11 508	282	376	110 470	13	102 220	0.925	8.1
0.2	7.7	15 509	385	507	158 739	21	143 120	0.902	6.2
0.25	7.7	19 525	482	638	212 142	31	187 340	0.883	4.6
0.3	7.7	23 542	769	769	268 816	42	233 334	0.868	3.4

Для вычисления предела прочности грунта на смятие с учетом напряжений псевдосдвига при другом заглублении ножа бульдозера следует использовать формулу (3).

Зависимости параметров от заглубления ножа даны на рис. 2–9. Результаты аппроксимации представлены на графиках.

Зависимости силы смятия грунта лезвием с учетом его псевдосдвига, силы тяжести грунта,

подверженного смятию, объемному сжатию и псевдосдвигу лезвием ножа, силы сдвига грунта краем лезвия ножа, мощности на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа, мощности, необходимой для сдвига грунта краем лезвия ножа в начале прохода бульдозера, от заглубления ножа имеют линейный вид. Эти параметры монотонно возрастают по мере заглубления ножа.

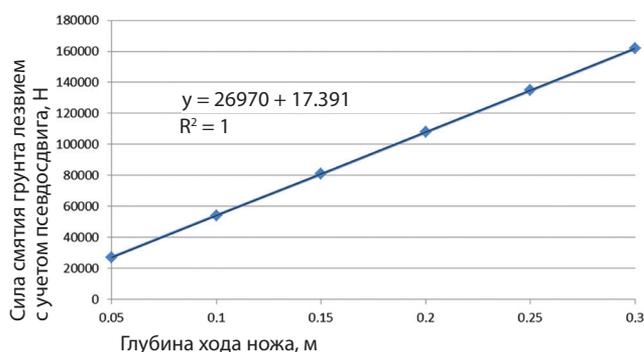


Рис. 2. Зависимость силы смятия грунта лезвием с учетом его псевдосдвига в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 2. Dependence of soil crumpling force by the knife on the knife depth, taking into account pseudo-displacement of the soil at the beginning of the bulldozer passage

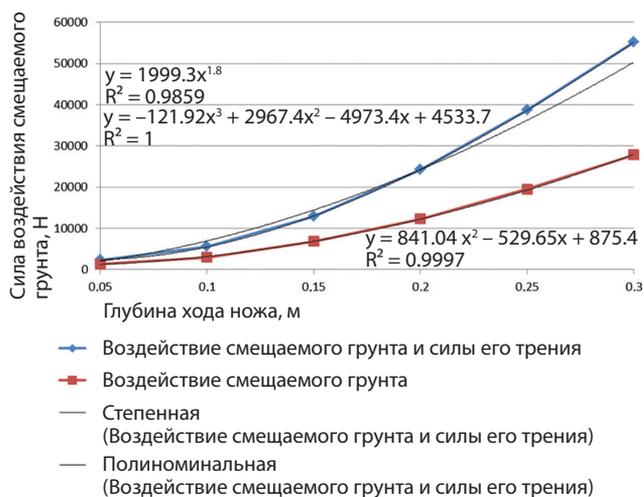


Рис. 3. Зависимость силы воздействия смещаемого грунта на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 3. Dependence between the knife depth and the force of the displaced soil impact on crumpling, volume compression and pseudo-displacement of the soil by the knife edge at the beginning of the bulldozer passage

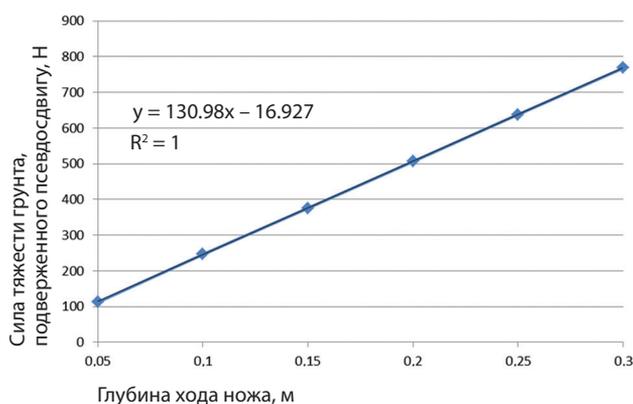


Рис. 4. Зависимость силы тяжести грунта, подверженного смятию, объемному сжатию и псевдосдвигу лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 4. Dependence between the knife depth and the gravity force of the soil affected by crumpling, volume compression and pseudo-displacement by the knife at the beginning of the bulldozer passage

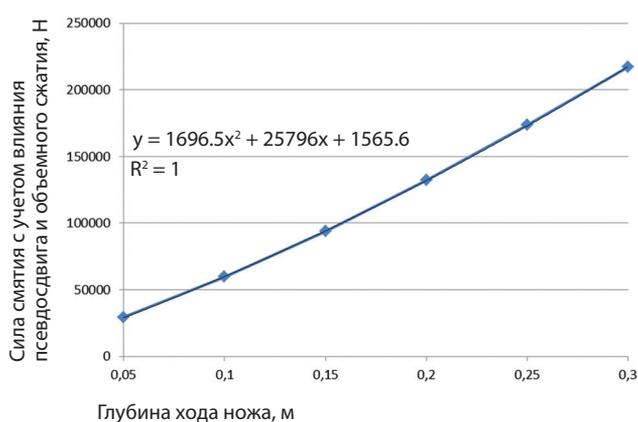


Рис. 5. Зависимость силы смятия с учетом псевдосдвига и объемного сжатия грунта лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 5. Dependence of soil crumpling force on the knife depth taking into account pseudo-displacement and volume compression of the soil by the knife at the beginning of the bulldozer passage

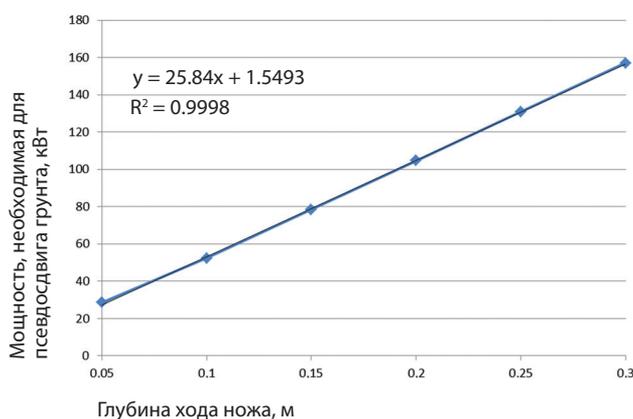


Рис. 6. Зависимость мощности на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 6. Dependence between the knife depth and power for crumpling, volume compression and pseudo-displacement of soil by the knife at the beginning of the bulldozer passage

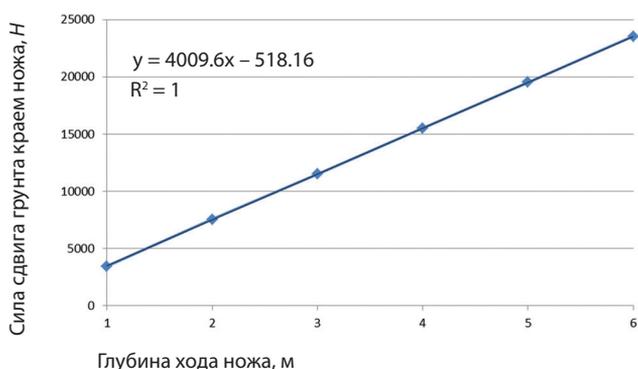


Рис. 7. Зависимость силы сдвига грунта краем лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 7. Dependence of soil displacement force by the knife edge at the beginning of the bulldozer passage on the knife depth

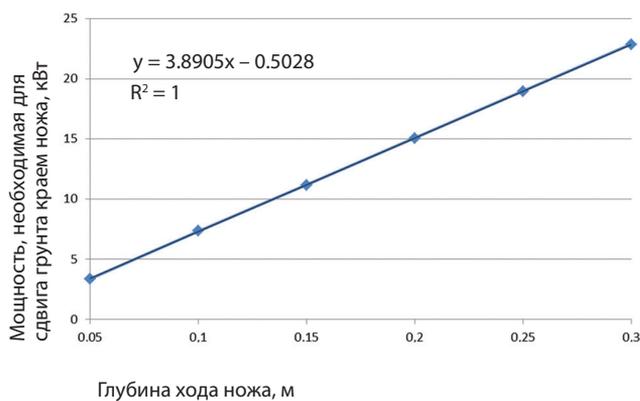


Рис. 8. Зависимость мощности, необходимой для сдвига грунта краем лезвия ножа в начале прохода бульдозера, от заглубления ножа

Fig. 8. Dependence between the power required to displace the soil by the knife edge at the beginning of the bulldozer passage and the knife depth

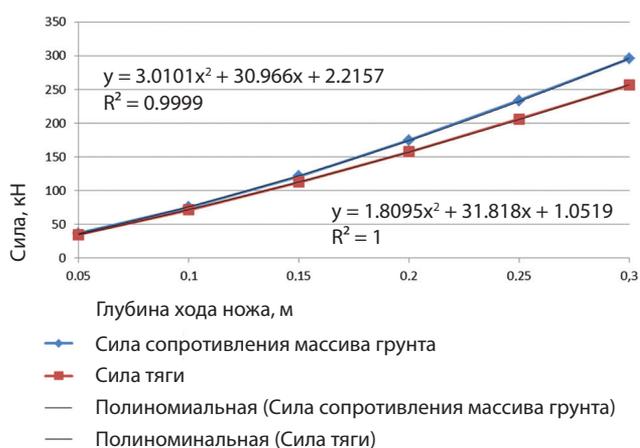


Рис. 9. Зависимость силы тяги и силы сопротивления грунта перемещению лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа

Fig. 9. Dependence between tractive power and soil resistance to knife edge movement at the beginning of the bulldozer passage and knife depth

Зависимость силы воздействия смещаемого грунта на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа (рис. 3) имеет более сложный вид. В частности, зависимость воздействия смещаемого грунта и силы его трения можно аппроксимировать с высокой точностью как полиномом третьей степени, так и степенной функцией. Зависимость силы тяги и силы сопротивления грунта перемещению лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа можно аппроксимировать с высокой точностью полиномом второй степени. Эти параметры также монотонно возрастают по мере заглубления ножа.

Выводы

1. Зависимости мощности на смятие, объемное сжатие и псевдосдвиг грунта лезвием ножа и мощности, необходимой для сдвига грунта

краем лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа имеют линейный вид. Мощность, затрачиваемая на перемещение лезвия ножа бульдозера, очень велика, существенно увеличивается по мере заглубления ножа. Зависимости силы тяги и силы сопротивления грунта перемещению лезвия ножа в начале прохода бульдозера от заглубления ножа близки к линейным.

2. Средние затраты энергии на резание ножом бульдозера одного кубического метра грунта очень велики: $u_{\Sigma \text{сд ср}} = 266\,145 \text{ Дж} / \text{м}^3$. Выявление затрат энергии на перемещение лезвия ножа бульдозера позволит в дальнейшем определить общие затраты энергии с целью модернизации бульдозерного оборудования, направленной на уменьшение этих затрат [15].

Полученные в ходе исследования зависимости необходимы для сопоставления параметров,

полученных из взаимодействия лезвия ножа с грунтом, существующего и усовершенствованного [15] бульдозерного оборудования. Статья обладает научной новизной, так как в литературных источниках полного анализа взаимодействия бульдозерного оборудования с грунтом нет,

встречаются лишь частные попытки. Приведенные результаты могут иметь практическое значение как для анализа работы технических средств, так и для усовершенствования бульдозерного оборудования с целью осуществления рабочего процесса с меньшими затратами энергии.

Библиографический список

1. Зыков, Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин / Б. И. Зыков. – Ярославль : Издательство ЯГТУ, 2003. – 114 с. – Текст : непосредственный.
2. Карасев, Г. Н. Определение силы резания грунта с учетом упругих деформаций при разрушении / Г. Н. Карасев. – Текст : электронный // Строительные дорожные машины и техника : сайт. – 2010. – 05 января. – URL: <https://sdm.str-t.ru/publics/51/> (дата обращения: 11.10.2023).
3. Кириллов, Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезвьевых рабочих органов землеройных машин / Ф. Ф. Кириллов. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 11. – С. 44–48.
4. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию / Е. И. Берестов, А. П. Смоляр, А. Х. Афхами Алишах, Э. Х. Джалилванд. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 11. – С. 34–38.
5. Баловнев, В. И. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности / В. И. Баловнев, З. Ш. Нгуен. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2005. – № 3. – С. 38–40.
6. Баловнев, В. И. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин / В. И. Баловнев, Р. Г. Данилов, О. Ю. Улитич. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 2. – С. 12–15.
7. Нилов, В. А. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания / В. А. Нилов, Е. В. Федоров. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2016. – № 2. – С. 7–10.
8. Семкин, Д. С. О влиянии скорости рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию / Д. С. Семкин. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2017. – № 1 (53). – С. 37–43.
9. Исследования рабочих органов землеройных машин непрерывного действия : обзор / З. Е. Гарбузов, Г. А. Матушев, Г. Б. Нарет, Л. Н. Смирнов ; Под общ. ред. канд. техн. наук З. Е. Гарбузова. – Москва : [б. и.], 1966. – 89 с.
10. Константинов, Ю. В. Методика расчета сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы / Ю. В. Константинов. – DOI 10.31992/0321-4443-2019-5-31-39. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 5. – С. 31–39.
11. Пархоменко, Г. Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории / Г. Г. Пархоменко, С. Г. Пархоменко. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 1. – С. 47–54.
12. Николаев, В. А. Машины для обработки почвы. Теория и расчет / В. А. Николаев. – Ярославль : Ярославская ГСХА, 2014. – 358 с. – ISBN 978-5-98914-132-6. – Текст непосредственный.
13. Николаев, В. А. Резание грунта пассивными рабочими органами. Теория и расчет / В. А. Николаев. – Ярославль : Издательство ЯГТУ, 2022. – 388 с. – Текст непосредственный.
14. Николаев, В. А. Взаимодействие с грунтом ножа и нижней части отвала бульдозера в начале прохода / В. А. Николаев. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-3-330-342. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 3 (85). – С. 330–342.
15. Патент № 2770854 С1 Российская Федерация, МПК E02F 3/76. Оборудование бульдозера : № 2021130731 : заявл. 20.10.2021 : опубл. 22.04.2022 / В. А. Николаев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет» (ФГБОУВО «ЯГТУ»). Текст : непосредственный.

References

1. Zikov, B. I. (2003). Teoriya rabochikh protsessov stroitel'nykh mashin. Yaroslavl, YSTU Publ., 114 p. (In Russian).
2. Karasev, G. N. (2010). Opredelenie sily rezaniya grunta s uchetom uprugikh deformatsiy pri razrushenii. Available at: <https://sdm.str-t.ru/publics/51/> (accessed 11.10.2023). (In Russian).
3. Kirillov, F. F. (2010). Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogoreztsovykh rabochikh organov zemleroynykh mashin. Construction and road building machinery, (11), pp. 44-48. (In Russian).
4. Berestov, E. I., Smolyar, A. P., Afkhami Alishakh, A. Kh., & Dzhililvand, E. Kh. (2010). Vliyanie treniya grunta po poverkhnosti nozha na soprotivlenie rezaniyu. Construction and road building machinery, (11), pp. 34-38. (In Russian).
5. Balovnev, V. I., & Nguen, Z. Sh. (2005). Opredelenie soprotivleniy pri razrabotke gruntov rykhlytelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti. Construction and road building machinery, (3), pp. 38-40. (In Russian).
6. Balovnev, V. I., Danilov, R. G., & Ulitich, O. Yu. (2017). The study of controlled knife systems earth-moving machines. Construction and road building machinery, (2), pp. 12-15. (In Russian).
7. Nilov, V. A., & Fedorov, E. V. (2016). Excavation by scraper in conditions free cutting. Construction and road building machinery, (2), pp. 7-10. (In Russian).
8. Semkin, D. S. (2017). About influence of speed working bodies of digging machines on the resistance force of soil cutting. The Russian automobile and highway industry journal, (1(53)), pp. 37-43. (In Russian).
9. Garbuzov, Z. E., Matushev, G. A., Naret, G. B., & Smirnov, L. N. (1966). Issledovaniya rabochikh organov zemleroynykh mashin nepreryvnogo deystviya : obzor. Moscow, 89 p.
10. Konstantinov, Yu. V. (2019). Methods of calculating the resistance and the moment of resistance to cutting the soil with a straight blade knife cutters. Traktory i sel'khoz mashiny, (5), pp. 31-39. (In Russian). DOI 10.31992/0321-4443-2019-5-31-39.
11. Parkhomenko, G. G., & Parkhomenko, S. G. (2018). Force analysis of the mechanisms of tillage machines working elements following a specified path. Traktory i sel'khoz mashiny, (1), pp. 47-54. (In Russian).
12. Nikolaev, V. A. (2014). Mashiny dlya obrabotki pochvy. Teoriya i raschet. Yaroslavl, Yaroslavskaya GSKhA Publ., 358 p. (In Russian). ISBN 978-5-98914-132-6.
13. Nikolaev, V. A. (2022). Yaroslavskaya GSKhA Rezanie grunta passivnymi rabochimi organami. Teoriya i raschet. Yaroslavl, YSTU Publ., 388 p. (In Russian).
14. Nikolayev, V. A. (2022). Knife and bulldozer bottom blade interaction with soil at the beginning of a pass. The Russian automobile and highway industry journal, 19(3(85)), pp. 330-342. (In Russian). DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-3-330-342.
15. Nikolayev, V. A. Bulldozer equipment. Patent na izobretenie CPC E02F 3/76; E02F 3/7609. No 2021130731. Applied: 20.10.2021. Published: 22.04.2022. (In Russian).

Сведения об авторе

Николаев Владимир Анатольевич, д-р техн. наук, профессор кафедры строительных и дорожных машин, Ярославский технический университет, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru. ORCID 0000-0001-7503-6612

Information about the author

Vladimir A. Nikolaev, D. Sc. in Engineering, Professor at the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl Technical University, e-mail: Nikolaev53@inbox.ru. ORCID 0000-0001-7503-6612

*Получена 19 сентября 2023 г., одобрена 20 октября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 19 September 2023, Approved 20 October 2023, Accepted for publication 15 December 2023*

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ

1. К предоставляемой рукописи должны быть приложены следующие документы:
 - сопроводительное письмо автора на имя главного редактора журнала, подтверждающее, что статья нигде ранее не была опубликована;
 - экспертное заключение организации, откуда исходит рукопись, о возможности открытого опубликования.

В случае принятия положительного решения о публикации рукописи в журнале автор должен предоставить в редакцию подписанный вариант рукописи (или ее скан).

2. Все поступающие в редакцию журнала рукописи статьи проходят проверку на наличие заимствований. Статьи, содержащие менее 75 % оригинального текста, в журнале не публикуются (проверка уникальности текста осуществляется без учета метаданных и библиографического списка).

3. Рукописи, соответствующие тематике журнала, проходят процедуру двойного слепого рецензирования с целью их экспертной оценки. Рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

4. Технические требования к тексту.

Формат файлов для текста – Microsoft Word (*.docx). Название файла должно включать фамилию и инициалы автора статьи (например: Иванов_ИИ.docx) Статьи, содержащие формулы, помимо word-файла необходимо продублировать pdf-файлом во избежание искажения формул, которые следует набирать в MathType 4.0 Equation.

Объем статьи – не менее 5 и не более 15 страниц (не включая библиографический список). Размер шрифта 12 пт (Times New Roman), межстрочный интервал одинарный, абзац 0,5 см. Поля страниц: верхнее 20 мм, нижнее 20 мм, левое 20 мм, правое 20 мм.

Все графические объекты должны быть предоставлены отдельными файлами: один рисунок – один файл графического формата. Растровые рисунки (фото) предоставляются в формате JPG с разрешением не менее 300 dpi. Каждый рисунок должен быть помещен в текст и сопровождаться нумерованной подрисуночной подписью. Ссылки на рисунки в тексте обязательны.

Таблицы следует помещать в текст статьи, они должны иметь нумерацию, заголовок и четко обозначенные графы, удобные и понятные для чтения. Ссылки на таблицы в тексте обязательны.

Объем иллюстративных материалов (таблиц и графических материалов) не должен превышать 1/3 общего объема рукописи.

Библиографический список (не менее 15 источников) должен содержать ссылки на актуальные научные работы отечественных и зарубежных специалистов. Объем самоцитирования – не более 30 % от общего числа ссылок.

Нумерация использованных источников в списке дается в порядке последовательности ссылок. На все источники должны быть ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. В списке не должно быть «неавторизованных» источников (СП, СНиПов, ГОСТов и т. п.) – на них ссылки даются непосредственно в тексте статьи.

Библиографический список на русском языке должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018.

5. Рукопись статьи должна включать:

- индекс УДК;
- название статьи на русском языке;
- инициалы и фамилию автора на русском языке (если авторов несколько, они работают в разных организациях, то после фамилии ставится верхний индекс (1, 2 и т.д.), соответствующий органи-

зации, откуда исходит рукопись, указанной ниже под тем же номером, следом необходимо указать город и страну. Если автор один или все авторы работают в одной организации, то индексы не ставятся);

- аннотация на русском языке (общий объем аннотации – не более 500 знаков);
 - ключевые слова на русском языке (до 10 слов и (или) словосочетаний);
- Пункты 2–5 необходимо продублировать ниже на английском языке*
- основной текст статьи на языке оригинала;
 - библиографический список на русском языке;
 - сведения об авторах (Information about the authors): полные Ф.И.О., должность, ученая степень, звание, место работы, телефон, e-mail – на русском и английском языках.

6. Структура основного текста статьи должна включать следующие рубрики, согласно стандарту IMRAD: введение, объект и методы исследования, экспериментальная часть/постановка эксперимента, результаты, обсуждение, выводы, приложения.

- **Введение.** Включает актуальность исследования, обзор литературы по теме исследования, постановку проблемы, формулирование цели и задач исследования.
- **Объект и методы исследования.** Данный раздел включает детальное описание методов и схемы экспериментов/наблюдений, позволяющих воспроизвести их результаты, пользуясь только текстом статьи; материалы, приборы, оборудование и другие условия проведения экспериментов/наблюдений.
- **Экспериментальная часть/постановка эксперимента.** Необязательный раздел. Может включать подробную информацию о стадиях реализации эксперимента, включающую графические материалы для наиболее полного раскрытия методики и условий проведения опытов.
- **Результаты.** Результаты рекомендуется представлять преимущественно в виде таблиц, графиков и иных наглядных формах. Этот раздел включает анализ полученных результатов, их интерпретацию, сравнение с результатами других авторов.
- **Обсуждение.** Содержит интерпретацию полученных результатов исследования; ограничения исследования и обобщения его результатов; предложения по практическому применению; предложения по направлению будущих исследований.
- **Выводы.** Подводятся итоги научного исследования. Заключение содержит выводы, кратко формулирующие основные научные результаты статьи. Выводы должны логически соответствовать поставленным в начале статьи задачам, содержать краткие итоги разделов статьи без повторения формулировок, приведенных в них.
- **Приложения.** Необязательный раздел. Может включать информацию о грантовой поддержке, при которой было реализовано исследование, а также содержать благодарности в адрес других ученых и/или предприятий, оказавших содействие в реализации исследования.

7. Рукопись, допущенная к публикации, проходит принятый редакцией процесс допечатной подготовки, включающий редактирование, корректуру, верстку.

8. Исправленные статьи авторам не предоставляются. Рукописи, не удовлетворяющие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и авторам не возвращаются.

9. Плата за опубликование рукописей **не взимается.**

Перепечатка материалов или их фрагментов возможна только с письменного разрешения редакции. Ссылка на научно-информационный журнал «Архитектура, строительство, транспорт» **обязательна!**

MANUSCRIPT PREPARATION GUIDELINES

1. The following documents must be attached to the submitted manuscript:
 - a cover letter from the author addressed to the editor-in-chief of the journal, confirming that the article has not been published anywhere else;
 - expert evaluation of the organization where the manuscript comes from on the possibility of open publication.

If a positive decision is made to publish the manuscript in the journal, the author must submit to the editor a signed version of the manuscript (or its scan).

2. All manuscripts submitted to the journal are checked for plagiarism. Articles containing less than 75% of the original text are not accepted for publication in the journal (verification of the uniqueness of the text is carried out without taking into account metadata and bibliographic list).

3. Manuscripts corresponding to the subject matter of the journal undergo a double-blind peer review procedure for the purpose of their expert evaluation. The reviewers are recognized experts in the subject matter of the reviewed material. The reviews are kept in the editorial office for 5 years.

4. Article format requirements

The file format for the text is Microsoft Word (* .docx). The file name must include the surname and initials of the author of the article (for example Ivanov_AA.doc) Articles containing formulas, in addition to the word file, must be duplicated with a pdf file in order to avoid distorting the formulas that should be typed in MathType 4.0 Equation.

The article should be no less than 5 and no more than 15 pages (not including the reference list). Use 12 pt Times New Roman, single line spacing, paragraph 0.5 cm. Page margins: top 20 mm, bottom 20 mm, left 20 mm, right 20 mm.

All graphic objects must be submitted in separate files: one figure – one graphic format file. Raster images (photos) are submitted in JPG format with a resolution of at least 300 dpi. Each figure should be placed in the text and accompanied by a numbered figure caption. References to figures in the text are required.

Tables should be placed in the text of the article, they should have a numbering, heading and clearly marked columns, convenient and easy to read. References to tables in the text are required.

The volume of illustrative materials (tables and graphic materials) should not exceed 1/3 of the total volume of the manuscript.

The list of references (at least 15 sources) should contain links to current scientific works of national and foreign specialists. Self-citations should not exceed 30 % of the total number of links.

The numbering of the sources used in the list is given in the order of the sequence of references. All sources should be referenced in the text of the article in square brackets. The list should not contain "unauthorized" sources (SP, SNIps, GOSTs, etc.) – links to them are given directly in the text of the article.

The list of references in Russian must be drawn up in accordance with GOST R 7.0.100–2018 (in English – with APA 6th Edition).

5. The manuscript of the article should include:

- UDC index;
- title of the article;
- initials and surname of the author (if there are several authors, and they work in different organizations, then a superscript (1, 2, etc.) is put after the surname, corresponding to the organization which the

manuscript comes from, indicated below under the same number, followed by the city and country. If there is one author or all authors work in one organization, then the superscripts are not used);

- abstract (no more than 500 characters);
- key words (up to 10 words and (or) phrases);
- main text of the article in the original language;
- references;
- information about the authors: full name, position, academic degree, title, place of work, telephone, e-mail.

6. The structure of the main body of the article should include the following sections, according to the IMRAD structure: introduction, object and methods of research, experimental part/experiment, results, discussion, conclusions, applications.

- **Introduction.** It includes the relevance of the research, literature review on the research topic, problem statement, formulation of the goal and objectives of the research.
- **Object and methods** of research. This section includes a detailed description of the methods and schemes of experiments/observations that make it possible to reproduce their results using only the text of the article, as well as materials, devices, equipment, and other conditions for conducting experiments/observations.
- **Experimental part/experiment.** It is an optional section. It may include detailed information about the stages of the experiment, including graphic materials for the most complete disclosure of the methodology and conditions of the experiment.
- **Results.** It is recommended to present the results mainly in the form of tables, graphs, and other visual forms. This section includes the analysis of the results obtained, their interpretation, comparison with the results of other authors.
- **Discussion.** It contains the interpretation of the obtained research results, limitations of research and generalization of its results, suggestions for practical application, suggestions for future research.
- **Conclusions.** Here the results of the research are summed up. Conclusions summarize the main scientific results of the article. Conclusions should logically correspond to the objectives set at the beginning of the article, contain brief summaries of the sections of the article without repeating the formulations given in them.
- **Applications.** It is an optional section. It may include information about grant support under which the research was carried out, and also gratitude to other scientists and/or enterprises who contributed to the implementation of the research.

7. The manuscript, admitted for publication, goes through the prepress process adopted by the editors, including editing, proofreading, and layout.

8. Corrected articles will not be provided to authors. Manuscripts that do not meet the listed requirements will not be accepted for consideration and will not be returned to authors.

9. There is no fee for the publication of manuscripts.

Reprinting of materials or their fragments is possible only with the written permission of the publisher.

A link to the scientific and reference journal "Arhitektura, stroitel'stvo, transport" ["Architecture, Construction, Transport"] **is required!**

АСТ

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

Уважаемые авторы и читатели!

Вы можете оформить подписку на журнал
«Архитектура, строительство, транспорт»
любым удобным для Вас способом:

- через электронный каталог «Пресса России» на сайте www.pressa-rf.ru
- через интернет-магазин «Пресса по подписке» на сайте www.akc.ru



Адрес редакции:
625001, г. Тюмень,
ул. Луначарского, 2,
каб. 117
Тел.: (3452) 28-37-50
e-mail: ast@tyuiu.ru

Подписной индекс
журнала 79619