

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Издается с января 2002 года
Периодичность издания –
один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 21 / No 4 / 2022

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Строительство

- Леонович С. Н., Шалый Е. Е.,
Литвиновский Д. А., Степанова А. В.**
Долговечность бетона при комбинированном
воздействии окружающей среды
и механической нагрузки:
анализ экспериментальных исследований 269
- Медведева Ю. А., Ивашечкин В. В.,
Сацута Е. С.**
Расчет параметров технологического
оборудования гидроэлеваторной установки
для удаления песчаных пробок из скважин 281
- Козунова О. В.**
Совершенствование методики расчета гибких
ортотропных плит на упругом основании.
Часть 2. Результаты расчета 290
- Зафатаев В. А., Королёва Т. И.**
Термодинамические режимы рекуперативного
теплообменника-утилизатора
в приточно-вытяжной вентиляционной
установке малой производительности 297

CONTENTS

Civil and Industrial Engineering

- Leonovich S. N., Shalyi E. E.,
Litvinovskiy D. A., Stepanova A. V.**
Durability of Concrete under Combined
Impact Environment
and Mechanical Load:
Analysis of Experimental Studies 269
- Medvedeva J. A., Ivashechkin V. V.,
Satsuta E. S.**
Calculation of Parameters of Technological
Equipment of Hydraulic Elevator Installation
for Removing Sand Plugs from Wells 281
- Kozunova O. V.**
Improvement of Calculation Technique
for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base.
Part 2. Calculation Results 290
- Zafatayev V. A., Karaliova T. I.**
Recuperative Heat Exchanger-Utilizer
Thermodynamic Modes
in Low Capacity Supply-and-Exhaust
Ventilation Unit 297

Мирзаев П. Т., Шамансурова З. П.
Железобетонные стойки стенового
безопалубочного формования
для опор воздушных линий 0,4–10 кВ 314

Транспорт

**Капский Д. В., Семченков С. С.,
Ларин О. Н.**
Повышение эффективности применения
информации при организации перевозок
пассажиров в городах 323

Серебряков И. А.
Разработка метода оптимизации алгоритмов
диагностирования двигателей автомобилей 331

Энергетика

**Хрусталеv Б. М., Пехота А. Н., Вострова Р. Н.,
Пехота Е. А.**
Технология производства MSF-топлива –
направление, обеспечивающее переход
к циркулярной экономике 340

Экономика промышленности

Синютич К. В.
Развитие систем оплаты проезда
на общественном транспорте
в Республике Беларусь 349

Mirzaev P. T., Shamansurova Z. P.
Reinforced Concrete Posts Made
by Long-Line Formwork-Free
Shaping for 0.4–10 kV Overhead Line Supports ... 314

Transport

**Kapskiy D. V., Semchenkov S. S.,
Larin O. N.**
Improving the Efficiency of Information
Application in the Organization
of Passenger Transportation in Cities 323

Serebryakov I. A.
Development of Method for Optimization
of Diagnostic Algorithms for Car Engines 331

Power Engineering

**Khrustalev B. M., Pekhota A. N., Vostrova R. N.,
Pekhota E. A.**
Technology for Production of MSF-fuel –
Direction Providing Transition
to Circular Economy 340

Economy in Industry

Siniutsich K. V.
Development of Public Transport
Fare Payment Systems
in the Republic of Belarus 349

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Бельи А. В.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Бисби Л.** (Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),
- Виттманн Ф. Х.** (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация),
- Дидерихс У.** (Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия),
- Дмитриев С. М.** (Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация),
- Згуровский М. З.** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина),
- Кондерс А. Б.** (Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия),
- Косёр-Казберук М.** (Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша),
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Лю Тингуо** (компания «Гаоюань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),
- Макнами Р. Я.** (Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция),
- Максаров В. В.** (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
- Нгуен Тху Нга** (Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- Одиназода Х. О.** (Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан),
- Опяляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Byeli A. V.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Bisby L.** (University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland),
- Wittmann F. H.** (ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation),
- Diederichs U.** (University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany),
- Dmitriev S. M.** (Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation),
- Zgurovsky M. Z.** (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine),
- Koenders A. B.** (Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany),
- Kosior-Kozberuk M.** (Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland),
- Leonovich S. N.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Liu Tingguo** (Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China),
- McNamee R. J.** (Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden),
- Maksarov V. V.** (Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation),
- Nguyen Thu Nga** (Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
- Odinazoda H. O.** (Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan),
- Opielak M.** (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),
- Penyazkov O. G.** (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),
Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),
Романюк Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотины, Греческая Республика),
Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),
Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),
Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижик С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Шелег В. К. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
Ши Ли И (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),
Эберхардштайнер Й. (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),
Янковский А. (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаш

Pimienta P. (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),
Rodrigues J. P. C. (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),
Romaniuk F. A. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Sideris K. (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),
Sobolev K. (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),
Sumrov V. V. (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),
Felicetti R. (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),
Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),
Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
Sheleg V. K. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
Shi Li Yi (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),
Eberhardsteiner J. (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),
Jankowski A. (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 29.07.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2022

Leading Style Editor

V. N. Guryanichyk

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280>

УДК 691.32 (075.4)

Долговечность бетона при комбинированном воздействии окружающей среды и механической нагрузки: анализ экспериментальных исследований

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾, инженеры Е. Е. Шалый²⁾, Д. А. Литвиновский³⁾, А. В. Степанова⁴⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Инженерная школа ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» (Владивосток, Российская Федерация),

³⁾ООО «ИнжСпецСтройПроект» (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Сегодня существует несколько методов прогнозирования долговечности железобетонных конструкций. В большинстве случаев учитывается один из доминирующих процессов разрушения – либо карбонизация, либо проникновение хлоридов. Экспериментальные результаты и натурные наблюдения показывают, что это нереалистичный подход. Поэтому необходимо разработать метод определения долговечности бетона при комбинированных воздействиях, т. е. при проникновении в него хлоридов и механической нагрузке. В статье подробно описан экспериментальный метод исследования влияния механической нагрузки на проникновение хлоридов в поровое пространство материалов на основе цемента. Представлен метод испытаний, который позволяет определить реалистичные коэффициенты диффузии хлорид-ионов в бетоне при сжимающем или растягивающем напряжении. В результате проведенных экспериментов определено, что комбинация механических нагрузок и воздействий окружающей среды может быть намного более значимой, чем просто воздействия окружающей среды без влияния механической нагрузки. На самом деле срок службы железобетонных конструкций зависит от множества возможных сочетаний механических нагрузок и воздействий окружающей среды, в том числе циклов замораживания-оттаивания. Так, трещины, образующиеся во время циклического замораживания-оттаивания, должны быть приняты во внимание в испытаниях комбинированного воздействия окружающей среды и механической нагрузки для лучшего понимания и систематического описания влияния такого воздействия на долговечность бетона. Для надежного прогнозирования срока службы железобетонных конструкций необходимо также учитывать влияние приложенного циклического напряжения.

Ключевые слова: долговечность бетона, прогноз срока службы, диффузия ионов хлора, напряжение сжатия, напряжение растяжения, комбинированное воздействие

Для цитирования: Долговечность бетона при комбинированном воздействии окружающей среды и механической нагрузки: анализ экспериментальных исследований / С. Н. Леонович [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 269–280. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280>

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-61-56
sleonovich@mail.ru

Durability of Concrete under Combined Impact Environment and Mechanical Load: Analysis of Experimental Studies

S. N. Leonovich¹⁾, E. E. Shalyi²⁾, D. A. Litvinovskiy³⁾, A. V. Stepanova⁴⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾School of Engineering Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation),

³⁾JSC “EngSpecStroiProject” (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. Today, there are several methods for predicting the durability of reinforced concrete structures. In most cases, one of the dominant destruction processes is taken into account – either carbonization or chloride penetration. Experimental results and field observations show that this is an unrealistic approach. Therefore, it is necessary to develop a method for determining the durability of concrete under combined impacts, i. e. with the penetration of chlorides into it and mechanical load. The paper describes in detail an experimental method for studying the effect of mechanical load on the penetration of chlorides into the pore space of cement-based materials. A test method is presented that makes it possible to determine realistic diffusion coefficients of chloride ions in concrete under compressive or tensile stress. As a result of the experiments carried out, it has been determined that the combination of mechanical loads and environmental influences can be much more significant than just environmental influence without the influence of mechanical loading. In fact, the service life of reinforced concrete structures depends on many possible combinations of mechanical loads and environmental influences, including freeze-thaw cycles. Thus, cracks formed during freeze-thaw cycling should be taken into account in tests of combined environmental and mechanical stress in order to better understand and systematically describe the effect of such exposure on the durability of concrete. For reliable prediction of the service life of reinforced concrete structures, it is also necessary to take into account the influence of the applied cyclic stress.

Keywords: concrete durability, service life forecast, diffusion of chloride ions, compression stress, tensile stress, combined impact

For citation: Leonovich S. N., Shalyi E. E., Litvinovskiy D. A., Stepanova A. V. (2022) Durability of Concrete under Combined Impact Environment and Mechanical Load: Analysis of Experimental Studies. *Science and Technique*. 21 (4), 269–280. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280> (in Russian)

Введение

Проектирование несущих строительных конструкций имеет долгую историю. В Европе оно основано на Eurocode 2 [1]. Подобные нормы для проектирования конструкций существуют и в других регионах [2–4]. Типовой кодекс для расчета срока службы [5] составлен аналогично Eurocode 2. В [5] напряжение и механическое сопротивление заменены воздействиями окружающей среды, такими как карбонизация, проникновение хлоридов и циклы замораживания-оттаивания. На основе этой концепции можно сформулировать следующие предельные состояния железобетонных конструкций:

- 1 – иницирование коррозии, вызванное проникновением хлоридов или карбонизацией;
- 2 – растрескивание из-за коррозии стали;
- 3 – отслаивание бетонного покрытия из-за коррозии стали;
- 4 – конструкционные разрушения из-за коррозии арматуры.

Типовой кодекс [5] предлагает четыре варианта расчета срока службы железобетонных конструкций:

- 1 – полностью вероятностный подход;
- 2 – полувероятностный подход;
- 3 – считается удовлетворяющим правилам;
- 4 – недопущение износа.

Безопасность конструкций при воздействии окружающей среды может быть выражена через показатель надежности β аналогично тому, как это принято при проектировании. Фактический срок службы железобетонных конструкций во многих случаях значительно короче проектного [6]: более 20 % мостов в США являются конструктивно несовершенными или функционально устаревшими. Аналогичная ситуация наблюдается во многих промышленно развитых странах, и, как следствие, увеличиваются затраты на техническое обслуживание и ремонт устаревающей инфраструктуры.

Типовой кодекс [5] является значительным шагом вперед, так как долговечность и срок службы железобетонных конструкций учиты-

ваются на этапе проектирования. В соответствии с [5], необходимые параметры материала (обратное сопротивление карбонизации или коэффициент миграции хлоридов) должны определяться в строго обозначенных лабораторных условиях. Однако установлено, что эти параметры также зависят от приложенного напряжения. Скорость проникновения хлоридов может быть удвоена [7, 8] под действием растягивающего напряжения. Следовательно, если не учитывать влияние приложенного напряжения, прогнозирование срока службы железобетонных конструкций будет нереалистичным. Исчерпывающая аннотированная библиография [9] послужила отправной точкой для проводимых авторами статьи исследований.

Эксперименты и материалы

• Подготовка образцов

В серии сравнительных испытаний принимали участие исследовательские группы из пяти мировых лабораторий:

- Китайской академии строительных материалов (СВМА);
- Гентского университета (UGent);
- Делфтского технологического университета (TU Delft);
- Мюнхенского технического университета (TUM);
- Даляньского университета (Dalian University).

Бетонные образцы формировали одинаковыми по размерам и геометрии с использованием портландцемента типа I. В свежий бетон добавляли необходимое количество поликарбоксилатного суперпластификатора для осадки конуса 15 см. Для испытаний на сжатие и растяжение изготавливали соответственно призмы размера $100 \times 100 \times 400$ мм и образцы-гантели (рис. 1).

Внутренние поверхности форм покрывали тонкой тефлоновой пленкой, чтобы избежать водоотталкивающего эффекта расплывающегося масла. После изготовления образцы хранили под полиэтиленовой пленкой в течение 24 ч в помещении с температурой 20°C и относительной влажностью около 95 %. Затем образцы извлекали из форм и оставляли в воде при 20°C до проведения испытаний.

Образцы вынимали и свободную воду с поверхностей удаляли сухим полотенцем, после чего поверхность сразу же запечатывали двумя слоями самоклеящейся алюминиевой фольги. Окно размерами 80×160 мм² на одной формованной боковой поверхности оставляли открытым, а свободную поверхность временно предохраняли от высыхания до момента присоединения бака с раствором соли. Пластмассовый бак внутренними размерами $80 \times 160 \times 50$ мм приклеивали или прижимали к образцу, закрывая открытое окно. Как только пластиковый бак был заполнен раствором соли, хлорид мог проникнуть в бетон путем диффузии. Из-за неполного насыщения и дальнейшей гидратации цемента полностью избежать капиллярной абсорбции не удалось. Тем не менее коэффициент диффузии, полученный из профилей хлорида в этом эксперименте, характеризует диффузию хлорида в насыщенный бетон. Для прогнозирования проникновения хлоридов в реальные бетонные конструкции необходимо учитывать климатические условия окружающей среды.

Прочность бетонных призм на сжатие определяли в возрасте 28 сут. Результаты, приведенные в табл. 1, демонстрируют широкий диапазон значений прочности на сжатие. Прочность на растяжение образцов-гантелей в возрасте 28 сут., определенная в СВМА, составила 3,3 МПа.

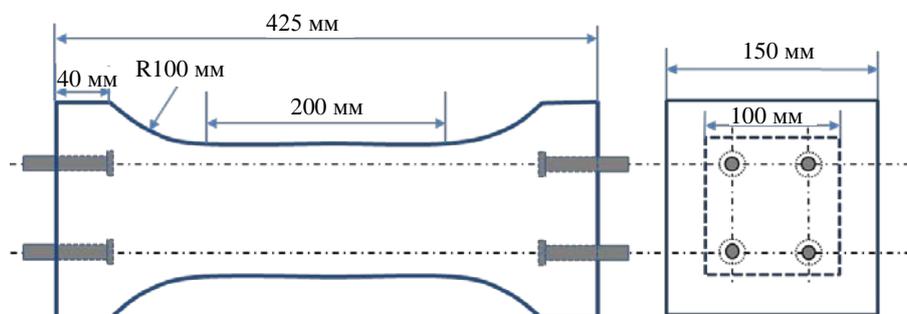


Рис. 1. Форма и размеры образца-гантели для испытаний на растяжение [9]

Fig. 1. Shape and dimensions of sample-dumbbell for tensile testing [9]

Прочность на сжатие бетонных призм, изготовленных в пяти разных лабораториях, в возрасте 28 сут.

Compressive strength of concrete prisms, made in five different laboratories, at the age of 28 days

Лаборатория	CBMA	UGent	TU Delft	TUM	Dalian University
Прочность, МПа	36,6	56,9	40,7	34,0	26,2

Методы испытаний

Образцы при сжатии. К бетонным образцам-призмам прикладывали сжимающее напряжение с помощью испытательного стенда, показанного на рис. 2 [10]. Коэффициент напряжения сжатия (отношение приложенного напряжения к прочности на сжатие) составлял 0, 30 и 60 %. Трехпроцентный водный раствор хлорида натрия циркулировал через прилагаемую пластиковую емкость с заданной скоростью потока (5 ± 1) мл/с. Концентрацию раствора проверяли регулярно – не реже одного раза в неделю в течение всего периода экспозиции. Раствор хлорида изолировали от испарения и загрязнения. Для определения профиля хлоридов образцы разгружались после воздействия в течение 2, 6, 18 и 36 недель.

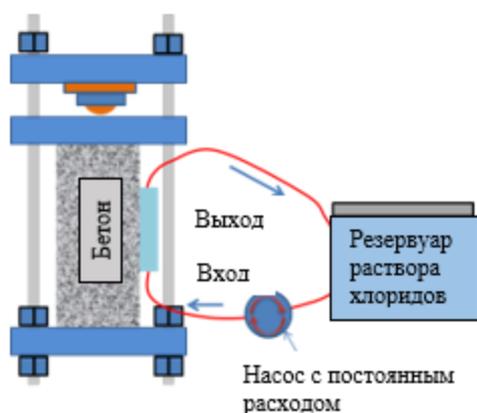


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения диффузии хлоридов в бетон при сжатии [10]

Fig. 2. Scheme of experimental setup to determine diffusion of chlorides into concrete during compression [10]

Образцы под растягивающим напряжением. Для приложения заданного растягивающего напряжения разработана специальная испытательная установка. Чтобы выполнить соединение образцов-гантелей с установкой, до формования на каждом конце формы были закреплены четыре болта (рис. 1). С помощью четырех болтов две стальные соединительные пластины на обоих концах образцов-гантелей скреплялись со сферическими шарнирами испытатель-

ного стенда (рис. 3), что позволило избежать эксцентриситета растянутых образцов (можно использовать аналогичные испытательные стенды, работающие по такому же принципу). Были выбраны следующие отношения приложенного растягивающего напряжения к предельному растягивающему напряжению: 0, 50 и 80 % [11]. Установку для циркуляции раствора хлорида на поверхности бетона, аналогичную приведенной на рис. 2, приставили к открытым окнам гантельных образцов. Скорость потока была такой же, как при испытаниях на сжатие. Циркуляцию солевого раствора остановили, а образцы-гантели разгрузили после выдержки в течение 2, 6, 18 и 36 недель. По истечении данных периодов определяли профили хлоридов в бетонных образцах.

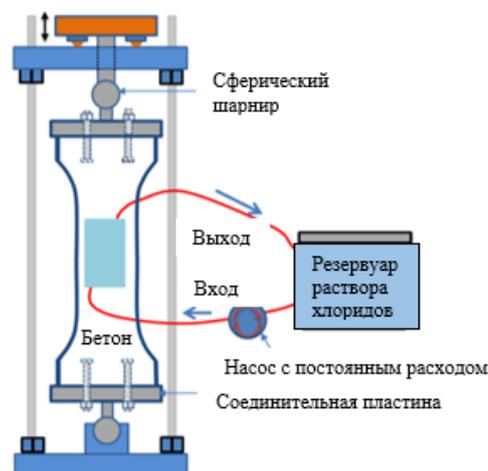


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для испытаний на растяжение [11]

Fig. 3. Scheme of experimental setup for tensile testing [11]

Определение профилей хлоридов

Сначала с разгруженных образцов сняли пластиковый бак. Бетонная поверхность была защищена от высыхания до начала процесса фрезерования, так как высыхание изменило бы профиль хлоридов. Образцы порошка с поверхности экспонирования всех образцов получали ступенчатым фрезерованием слоев толщиной от 1 до 2 мм. Количество и толщину

слоев регулировали в соответствии с ожидаемым профилем содержания хлоридов. На нисходящей ветви профиля должно быть не менее восьми точек измерения. Во избежание краевых эффектов и влияния на результаты испытаний клея самоклеящейся алюминиевой фольги отбор проб производили на участке на расстоянии 10 мм от границы зоны воздействия. Частицы диаметром более 1 мм могут присутствовать в порошке, который получают размалыванием или дроблением с последующим измельчением. В этом случае необходимо обеспечить достаточное время экстракции хлорида из порошка. Содержание хлоридов, растворенных в кислоте, определяли химическим анализом в соответствии с EN 14629 [12]. Рекомендуется проводить испытания не менее трех раз и выбирать средние значения коэффициента диффузии ионов хлора.

Результаты испытаний

• Влияние сжимающих напряжений

Профили хлоридов при коэффициентах сжимающих напряжений 0 и 30 %. Профили хлоридов, составленные в разных лабораториях при коэффициентах напряжений 0 и 30 %,

представлены на рис. 4–7. Результаты, полученные в UGent, показаны отдельно на рис. 4, 5 из-за разного времени экспозиции и большего количества точек для профиля. Последнее важно для длительных периодов диффузии и высоких коэффициентов нагрузки. По рисункам можно оценить разброс значений одной лаборатории, поскольку показаны профили на двух аналогичных образцах.

Как видно из рис. 4, 5, на всех профилях хлоридов наблюдается плавное уменьшение содержания хлоридов по мере удаления от поверхности. Однако вблизи поверхности заметен больший разброс. При достаточно длительном времени экспозиции наблюдается своего рода плато. Это подчеркивает известный факт, что проникновение хлоридов нельзя объяснить чистой диффузией. Ряд различных механизмов переноса, таких как капиллярная абсорбция, химические реакции с пористой матрицей, процессы сорбции на поверхности продуктов гидратации, способствуют переносу ионов в поровое пространство бетона. Согласно рис. 5, под действием приложенного сжимающего напряжения в бетон проникает значительно меньше хлоридов.

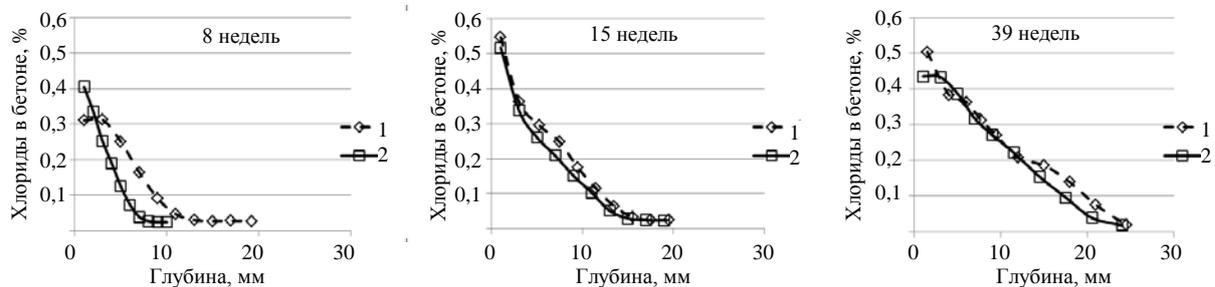


Рис. 4. Профили хлоридов, полученные в UGent, через 8, 15 и 39 недель на образцах бетона 1 и 2 без приложенного напряжения [9]

Fig. 4. UGent chloride profiles at 8, 15 and 39 weeks on concrete samples 1 and 2 without applied voltage [9]

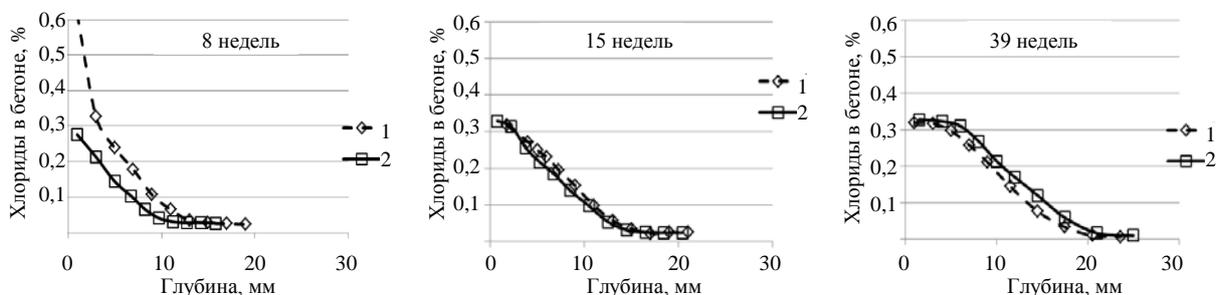


Рис. 5. Профили хлоридов, полученные в UGent, через 8, 15 и 39 недель на образцах бетона 1 и 2 при коэффициенте нагрузки 30 % [9]

Fig. 5. UGent chloride profiles at 8, 15 and 39 weeks on concrete samples 1 and 2 at load factor 30 % [9]

На рис. 6 и 7 показаны профили хлоридов, полученные на ненагруженных образцах и на бетонных призмах при коэффициенте нагрузки 30 % другими четырьмя лабораториями, участвовавшими в серии сравнительных испытаний. Наблюдается большой разброс профилей хлоридов, поскольку прочность на сжатие испытанных образцов бетона различна. Кроме того, значения получены при содержании водораство-

римых хлоридов, в то время как другие значения были получены кислотной экстракцией [9].

Профили хлоридов при коэффициенте сжимающих напряжений 60 %. На рис. 8 показаны типичные профили при напряжении сжатия 60 %. Плато строится на малом расстоянии от поверхности, поэтому не может быть простым диффузионным процессом у поверхности. Значения правее вертикальных линий могут служить мерой функции ошибок.

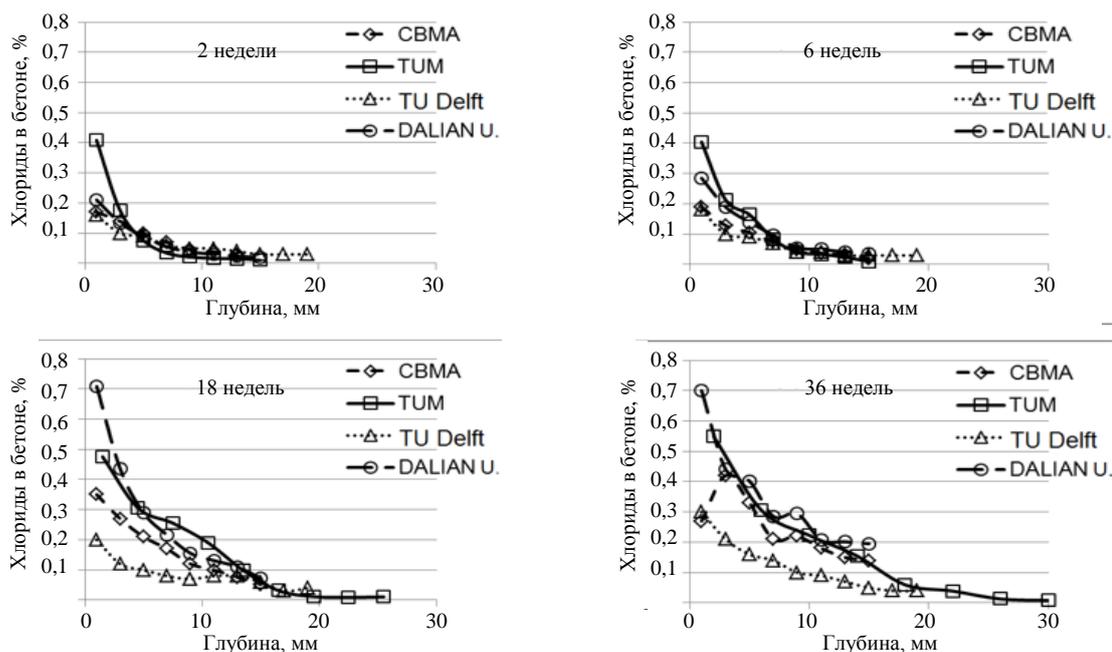


Рис. 6. Профили хлоридов после экспозиции в течение 2, 6, 18 и 36 недель на ненагруженных образцах
 Fig. 6. Chloride profiles after exposure for 2, 6, 18 and 36 weeks on unloaded samples

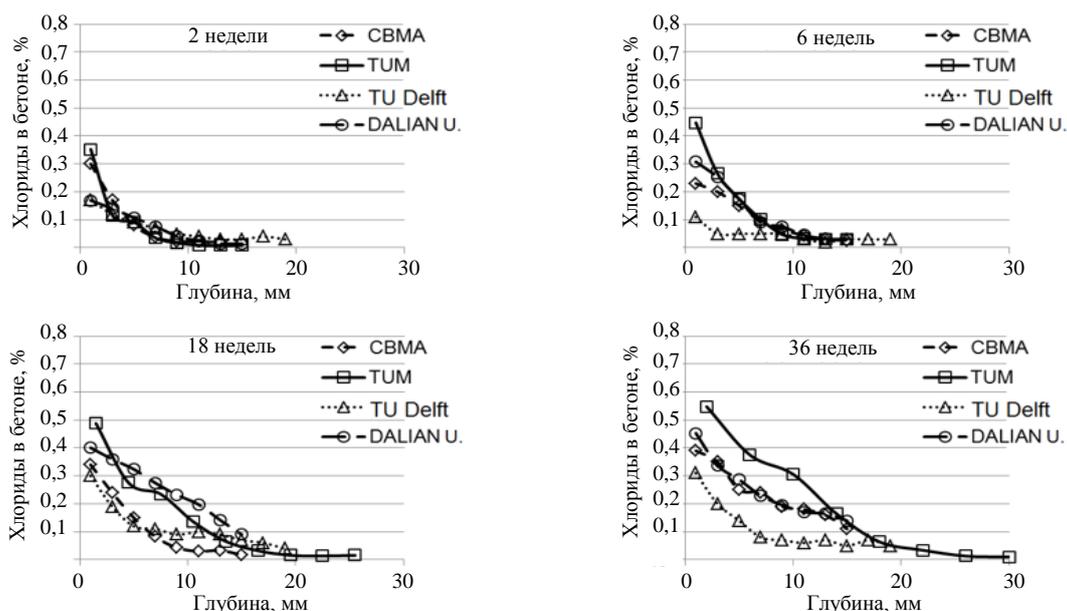


Рис. 7. Профили хлоридов после экспозиции в течение 2, 6, 18 и 36 недель при коэффициенте нагрузки 30 % [9]
 Fig. 7. Chloride profiles after exposure for 2, 6, 18 and 36 weeks at load factor of 30 % [9]

Результаты исследований подтверждают, что проникновение хлоридов не является чисто диффузионным действием. Определение коэффициента диффузии сводится к упрощению сложного процесса, но полученные значения можно использовать для сравнения проникновения хлоридов в различные типы бетона.

Профили хлоридов при коэффициенте нагрузки 60 % показаны на рис. 9 [9], где наблюдается большой разброс в схемах. Среди прочего, это связано с разным качеством испытанных бетонных образцов (табл. 1). Тем не менее подгонку данных под второй закон Фика можно считать разумным приближением. Информация о том, как выполнять процедуру подгонки, приведена в [13]. Рекомендации и оценка профиля хлоридов описаны в [11].

Коэффициенты диффузии и поверхностные концентрации по хлоридным профилям. Расчет этих показателей производили путем подгонки кривой согласно [13]. Большой разброс значений связан с тем, что качество испытуемого бетона было неодинаковым.

В течение экспозиции коэффициенты диффузии уменьшаются, в то время как расчетные поверхностные концентрации увеличиваются. Все значения коэффициентов диффузии имеют тенденцию стабилизироваться на величинах $(3-4) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$ при длительном времени воздействия (36 недель). Расчетная поверхностная концентрация стабилизируется на уровне 0,5 % для 36 недель воздействия.

При приложенном напряжении 30 % от предельной разрушающей нагрузки коэффициенты диффузии были такими же или меньше, чем в ненагруженном состоянии. При напряжении 60 % от предельной разрушающей нагрузки ситуация была неоднозначной, и в разных лабораториях получали либо одинаковые, либо более высокие/низкие коэффициенты диффузии. В некоторых случаях образование зоны конвекции вблизи поверхности было заметным, как показано на рис. 8, 9. Таким образом, полученные данные частично согласуются с утверждением, что диффузия хлоридов при умеренной сжимающей нагрузке замедляется, но увеличивается, если приложенное напряжение превышает половину предельной нагрузки [9].

• Влияние растягивающих напряжений

Профили хлоридов при коэффициентах растягивающих напряжений 0, 50 и 80 %. Профили хлоридов, определенные на образцах бетона при растягивающих напряжениях, показаны на рис. 10. Профили фиксировались после воздействия в течение 2, 6, 10, 18 и 36 недель. Очевидно, что содержание хлоридов неуклонно повышается с увеличением периода выдержки, а также оно становится значительно больше за счет приложенного растягивающего напряжения. Этот результат ожидаем, поскольку поровое пространство (микротрещины) расширяется под действием растягивающего напряжения.

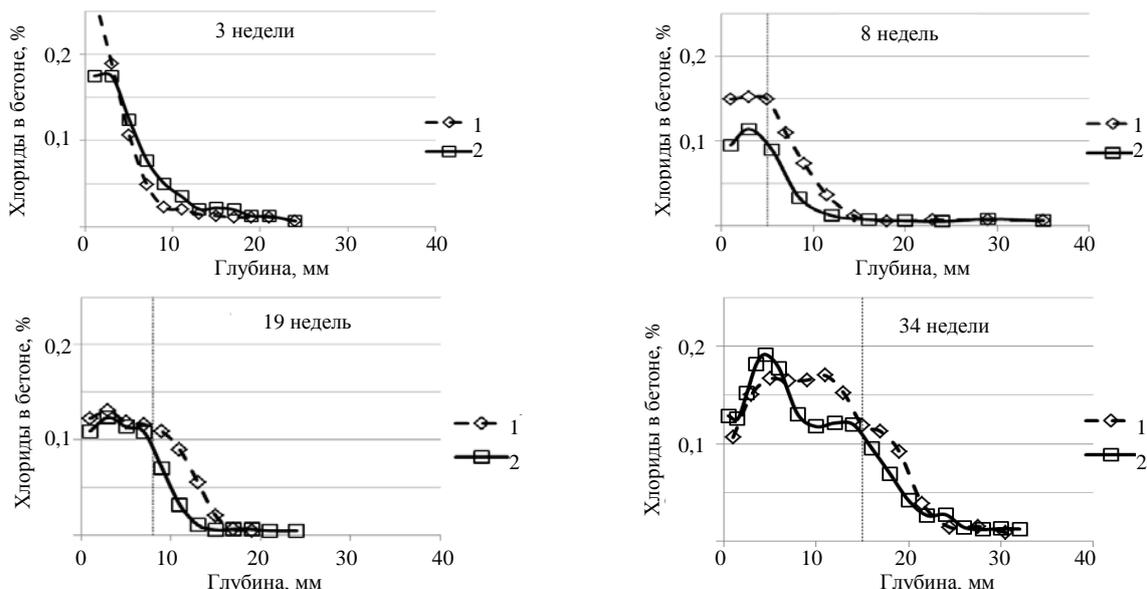


Рис. 8. Профили хлоридов образцов 1 и 2 после экспозиции в течение 3, 8, 19 и 34 недель при коэффициенте нагрузки 60 %

Fig. 8. Chloride profiles of samples 1 and 2 after exposure for 3, 8, 19 and 34 weeks at load factor of 60 %

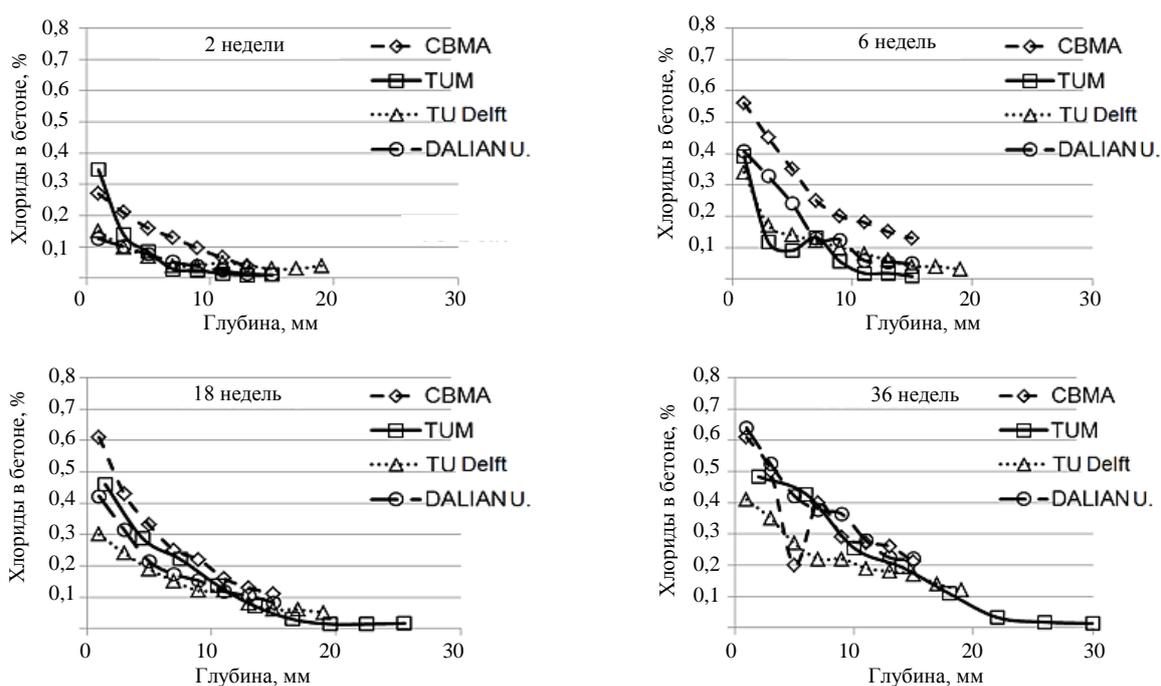


Рис. 9. Профили хлоридов после экспозиции в течение 2, 6, 18 и 36 недель при коэффициенте нагрузки 60 % [9]
 Fig. 9. Chloride profiles after exposure for 2, 6, 18 and 36 weeks at load factor of 60 % [9]

Коэффициенты диффузии и поверхностные концентрации, измеренные при приложенных растягивающих напряжениях. Проникновение хлорида в бетон представляет собой сложный процесс, который моделируется реактивной диффузией и комбинацией нескольких меха-

низмов переноса. Это необходимо иметь в виду при определении коэффициентов диффузии. На рис. 11 показаны коэффициенты диффузии ионов хлора D и расчетные поверхностные концентрации бетона C_s при воздействии растягивающих напряжений.

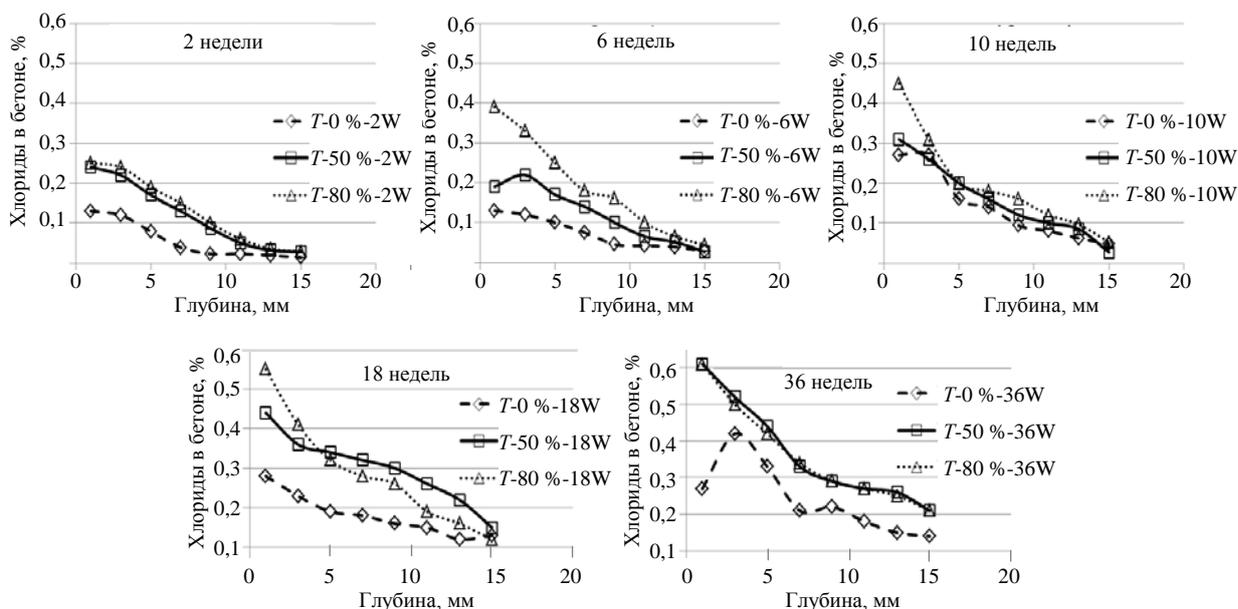


Рис. 10. Профили хлоридов через 2, 6, 10, 18 и 36 недель при коэффициентах растягивающих напряжений T , равных 0, 50 и 80 %
 Fig. 10. Chloride profiles at 2, 6, 10, 18 and 36 weeks at stretch ratios voltages T , equal to 0, 50 and 80 %

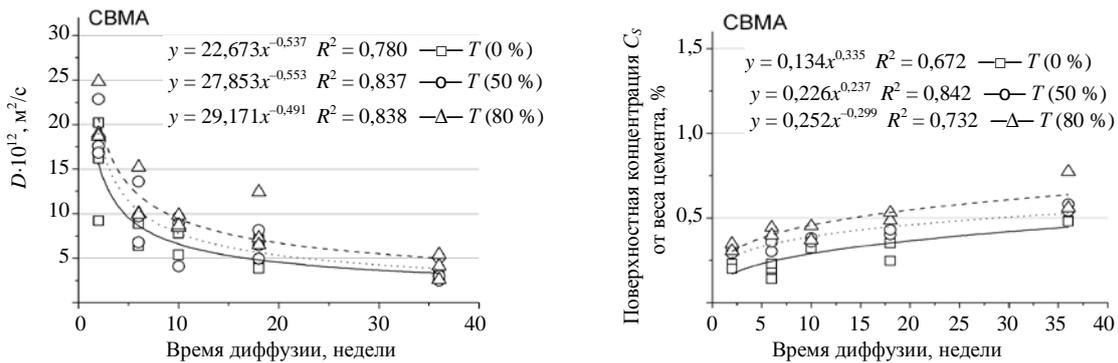


Рис. 11. Коэффициенты диффузии ионов хлора и расчетные поверхностные концентрации бетона при воздействии растягивающих напряжений T , равных 0, 50 и 80 %

(x – время диффузии, недели; y – функция поверхностной концентрации ионов хлора; R^2 – среднее квадратичное отклонение)

Fig. 11. Diffusion coefficients of chlorine ions and calculated surface concentrations of concrete under influence of tensile stresses T , equal to 0, 50 and 80 %

(x – diffusion time, weeks; y – surface concentration function of chloride ions; R^2 – root-mean-square deviation)

Коэффициент диффузии бетона при растяжении увеличивается с повышением коэффициента напряжения, но значительно уменьшается с увеличением времени воздействия. Приложенное растягивающее напряжение ускоряет диффузию хлоридов в бетон. Несмотря на большой разброс, расчетная поверхностная концентрация несколько повышается с увеличением времени экспозиции.

Моделирование и прогноз

• Моделирование

Железобетонные конструкции при воздействии противогололедной соли или морской воды повреждаются в результате коррозии арматуры. В типовом кодексе [5] для расчета срока службы бетона представлена модель проникновения хлоридов с целью прогнозирования вероятности начала коррозии арматуры в зависимости от времени воздействия агрессивной среды. Данная модель учитывает достижение критического содержания хлоридов на глубине армирования в зависимости от характеристик бетона и воздействия хлоридов. Согласно [5] и [14], диффузию хлоридов в бетон можно моделировать с помощью уравнений (1), (2) и (3), приведенных в [14]. Авторы настоящей статьи выражение (2) из [14] дополнили так называемым коэффициентом напряжения k_i , который учитывает напряженное состояние элемента конструкции:

$$C(c_{nom}, t_{SL}) = C_i + (C_s + C_i) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{c}{\sqrt{D_{app,A}(t_0)t}} \right) \right]; \quad (1)$$

$$D_{app,A}(t) = k_e k_i D_{app}(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\alpha_A}, \quad (2)$$

где c_{nom} – номинальный защитный слой бетона; t_{SL} – расчетный срок службы железобетонной конструкции; C_i – исходное содержание хлоридов; C_s – поверхностная концентрация; c – защитный слой бетона; $D_{app,A}$ – кажущийся коэффициент диффузии хлоридов; t_0 – точка отсчета во времени; t – время; α_A – показатель старения конструкции; k_e – передаточный параметр, определяемый по формуле

$$k_e = \exp \left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right), \quad (3)$$

b_e – температурный коэффициент; T_{ref} – эталонная температура; T_{real} – температура элемента конструкции или окружающего воздуха.

В исследованиях авторов срок службы или время до начала коррозии приведены соответственно для бетонных компонентов в ненагруженном состоянии, в отличие от бетонных компонентов, находящихся под сжимающими и растягивающими нагрузками. Пример [14], который в настоящей статье пересчитан для нагруженных бетонных элементов, представляет типичное воздействие XS2 (элемент, погруженный в морскую воду) в Европе (бетон СЕМ I с В/Ц = 0,45, без нагрузки). Большинство входных параметров модели, особенно переменные, характеризующие воздействия на окружающую среду, были взяты из [14]. Однако входные переменные, описывающие бетонный материал ($D_{app(t)}$), получены из опытов, проведенных

авторами. Характеристики материалов, использованных при повторном расчете, – это средние данные всех лабораторий, участвовавших в экспериментальной программе. Средние коэффициенты диффузии, определенные через 6 недель ($t_0 = 0,115$ года) для ненагруженных образцов, считались эталонным значением, составившим $6,52 \cdot 10^{-12}$ м²/с, стандартное отклонение составило $2,88 \cdot 10^{-12}$ м²/с (табл. 2). Все остальные условия нагрузки принимали с учетом значений коэффициента напряжения k_f : 1,00 – для эталона; 0,80 и 1,17 – для отношения напряжений сжатия 0,3 и 0,6 соответственно; 1,25 и 1,53 – для отношения напряжений растяжения 0,5 и 0,8 соответственно.

Таблица 2

Входные параметры для прогноза срока службы железобетонных конструкций
Input parameters for life prediction of reinforced concrete structures

Параметр	Тип распределения	Значение	Средне-квадратичное отклонение	Показатель старения a	Температурный коэффициент b
$D_{app}(t_0) \times 10^{-12}$, м ² /с	Нормальный	6,52	2,88	–	–
α_A	Бета	0,39	0,18	0	1
t_0 , ГОДЫ	Постоянный	0,115	–	–	–
t_s , ГОДЫ		50	–	–	–
T_{ref} , К		293	–	–	–
T_{real} , К	Нормальный	288	5,0	–	–
b_e , К		4800	700	–	–
$C_{S,\Delta}$, % (поверхностная концентрация)	Логнормальный	3,0	1,0	–	–
Δx , мм	Постоянный	0	–	–	–
C_{crit} , % (критическая поверхностная концентрация)	Бета	0,6	0,15	0,2	2,0
c , мм	Нормальный	50	6	–	–

Чтобы определить показатель возраста, период экспозиции должен быть как можно больше, но не менее двух лет. В рассматриваемом исследовании максимальное время воздействия составило 36 недель. Всего было исследовано 15 серий (рис. 10). Расчет выполняли согласно [14], где содержатся общие входные параметры в соответствии с [5].

• Прогноз

Расчетная надежность бетонных элементов, подверженных воздействию хлоридов в ненагруженных условиях при сжимающем и растягивающем напряжениях, представлена на рис. 12 [1].

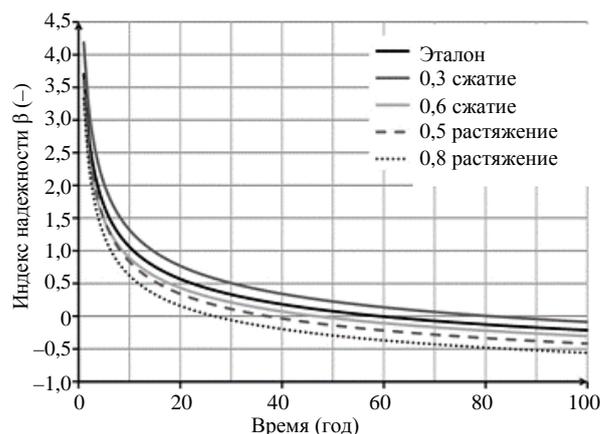


Рис. 12. Расчетная надежность бетонных элементов при воздействии хлоридов без нагрузки при сжатии и растяжении

Fig. 12. Design reliability of concrete elements when exposed to chlorides without load in compression and tension

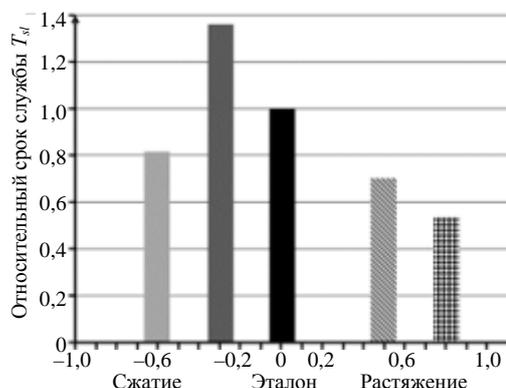


Рис. 13. Относительный срок службы T_{sl} бетонных элементов при воздействии хлоридов без нагрузки (эталон) и с нагрузкой на сжатие и растяжение

Fig. 13. Relative service life (relative to T_{sl}) of concrete elements exposed to chlorides without load (reference) and with load in compression and tension

Чтобы определить численные показатели влияния условий нагружения на срок службы железобетонных элементов (рис. 13), было принято, что конец срока службы достигается при надежности менее минимального значения 0,5. На основании этого срок службы для ненагруженного и нагруженного образцов бетона определен для каждого отдельного расчета, представленного пятью лабораториями. Срок службы элементов с приложенным сжимающим напряжением 30 % увеличился на 36 % по сравнению с эталоном, а с приложенным сжимающим напряжением 60 % сократился на 18 % по сравнению с ненагруженными элементами. Если прикладывалось растягивающее напряжение, срок службы уменьшался по сравнению с эталоном: на 30 % – для элементов с приложенным растягивающим напряжением 50 %

и на 47 % – с приложенным растягивающим напряжением 80 %. Отмечено, что при коэффициенте сжимающего напряжения 60 % только две из пяти лабораторий обнаружили заметное увеличение коэффициента диффузии. Это связано с сокращением срока службы железобетонной конструкции. Другие лаборатории отметили незначительное уменьшение величины коэффициента диффузии. Из представленных в статье данных можно сделать вывод, что потребуются дальнейшие испытания для получения более точной информации о влиянии условий нагружения на срок службы железобетонных элементов.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для обеспечения надежности железобетонных конструкций их напряженное состояние следует учитывать в расчете долговечности и срока службы.

2. С учетом механических нагрузок и агрессивных воздействий обозначена новая область исследований реалистичного и надежного расчета долговечности и срока службы железобетонных конструкций. Отмечено влияние приложенного напряжения на диффузию хлоридов, предложены методы испытаний для определения диффузии хлоридов в бетон. Полученные результаты позволяют оценить влияние приложенной нагрузки на железобетонные элементы, их прочность и срок службы в условиях воздействия хлоридсодержащей среды. Используя предлагаемый метод испытаний, следует учитывать специфическое поведение различных типов бетона под воздействием нагрузки.

3. Подробно описан экспериментальный метод исследования влияния механической нагрузки на проникновение хлоридов в поровое пространство бетонных материалов. На самом деле срок службы железобетонных конструкций зависит от множества возможных сочетаний механических нагрузок и воздействий окружающей среды, в том числе циклов замораживания-оттаивания. Морозостойкость детально изучалась на протяжении четырех последних десятилетий [15, 16]. Трещины, образующиеся во время циклического замораживания-оттаивания, должны быть приняты во внимание в будущих испытаниях комбинированного воздействия окружающей среды и механической нагрузки [17–20] для лучшего понимания и систематического описания влияния комбинированной механической нагрузки с учетом воздействия окружающей среды на долговечность.

4. В дальнейшем потребуются изучение влияния приложенного напряжения на скорость карбонизации и морозостойкость. В данном

случае понадобится провести аналогичную серию испытаний на бетоне при карбонизации для разработки стандартного метода, который позволит определить влияние приложенного растягивающего или сжимающего напряжения на скорость карбонизации.

5. Для реалистичного и надежного прогнозирования срока службы необходимо также учитывать влияние приложенного циклического напряжения. Однако пока имеются очень ограниченные данные, относящиеся к этой теме [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings [Electronic Resource]. European Committee for Standardization, 2004. Mode of access: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>.
2. ACI 318–14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [Electronic Resource]. American Concrete Institute, 2014. Mode of access: <http://aghababaie.usc.ac.ir/files/1506505203365.pdf>.
3. Standard Specifications for Concrete Structures – 2007 “Design”. JSCE Guidelines for Concrete No 15 [Electronic Resource]. Japan Society of Civil Engineers, 2007. Mode of Access: https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15_Standard_Specifications_Design_1.0.pdf.
4. GB 50010-2002 Code for Design of Concrete Structures. China Building Science Academy, 2010.
5. Model Code for Service Life Design / P. Schießl [et al.]. International Federation for Structural Concrete, 2006. 116 p. (Fib Bulletin No 34).
6. 2013 Report Card for America’s Infrastructure. ASCE. [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.api.org/~media/energyinfrastructure/images/rail/related-documents/report-card-for-americas-infrastructure.pdf>.
7. Influence of Combined Actions on Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures Exposed to Aggressive Environment / F. H. Wittmann [et al.] // Restoration of Buildings and Monuments. 2012. No 18. P. 105–112. <https://doi.org/10.1515/rbm-2012-6510>.
8. Wan, X. Influence of Mechanical Load on Service Life of Reinforced Concrete Structures under Dominant Influence of Carbonation / X. Wan, F. H. Wittmann, T. Zhao // Restoration of Buildings and Monuments. 2011. No 17. P. 103–110. <https://doi.org/10.1515/rbm-2011-6437>.
9. Yao, Y. Report rep043: Publications on Durability of Reinforced Concrete Structures under Combined Mechanical Loads and Environmental Actions : An Annotated Bibliography [Electronic Resource] / Y. Yao, L. Wang, F. H. Wittmann // RILEM. 2013. Mode of access: <https://www.rilem.net/publication/publication/427>.
10. Measurement of Time-Dependent Strains of Concrete. Materials and Structures: RILEM TC 107-CSP. Recommendation // Materials and Structures. 1998. Vol. 31. P. 507–512.
11. Influence of Applied Stress on Chloride Diffusion. Submitted to Materials and Structures: RILEM TC 246-TDC. Recommendation. Recommendation of RILEM TC 246-TDC: Test Methods to Determine Durability of Concrete Under Combined Environmental Actions and Mechanical Load / Y. Yao [et al.] // Materials and Structures. 2017. Vol. 50. P. 155. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1000-3>.
12. CEN EN 14629 Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Determination of Chloride Content in Hardened Concrete. European Committee for Standardization (CEN), 2007. 14 p.

13. EN 12390-11 Testing Hardened Concrete – Part 11: Determination of the Chloride Resistance of Concrete, Unidirectional Diffusion. Dansk Standardiseringsrad (DS), 2015. 35 p.
14. Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards: Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides / M. Bartholomew [et al.]. International Federation for Structural Concrete, 2015. 191 p. (Fib Bulletin No 76). <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0076>.
15. Setzer M. J. CDF Test – Test Method for the Freeze Thaw and Deicing Resistance of Concrete – Tests with Sodium Chloride (CDF). RILEM TC 117-FDC. Recommendation / M. J. Setzer, G. Fagerlund, D. J. Janssen // *Materials and Structures*. 1996. Vol. 29. P. 523–528.
16. ISO 5725-1. 1994 Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. International Organization for Standardization (ISO), 1998. 28 p.
17. Setzer, M. J. Development of the Micro-Ice-Lens Model / M. J. Setzer, R. Auberg, H.-J. Keck // International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete. RILEM Publications SARL, 2002. P. 133–145.
18. Леонович, С. Н. Практическая методика экспериментального определения остаточной морозостойкости бетона, эксплуатируемых конструкций / С. Н. Леонович, Омар А. М. Аль-Факих // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2004. № 1. С. 125–128.
19. Леонович, С. Н. Оценка остаточной морозостойкости бетона эксплуатируемых конструкций методом отрыва со скалыванием / С. Н. Леонович // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 6. С. 75–82.
20. Леонович, С. Н. Оценка морозостойкости методами механики разрушения / С. Н. Леонович, К. А. Пирадов // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 3. С. 134–136.
- Environment. *Restoration of Buildings and Monuments*, (18), 105–112. <https://doi.org/10.1515/rbm-2012-6510>.
8. Wan X., Wittmann F. H., Zhao T. (2011) Influence of Mechanical Load on Service Life of Reinforced Concrete Structures under Dominant Influence of Carbonation. *Restoration of Buildings and Monuments*, (17), 103–110. <https://doi.org/10.1515/rbm-2011-6437>.
9. Yao Y., Wang L., Wittmann F. H. (2013) Report rep043: Publications on Durability of Reinforced Concrete Structures under Combined Mechanical Loads and Environmental Actions: An Annotated Bibliography. *RILEM*. Available at: <https://www.rilem.net/publication/publication/427>.
10. Measurement of Time-Dependent Strains of Concrete. Materials and Structures: RILEM TC 107-CSP. *Materials and Structures*. 1998, 31, 507–512.
11. Yao Y., Wang L., Wittmann F. H., Schlangen E., Gehlen C., Wang Z., Alava H. E., Cao Y., Yunus B., Li J. (2017) Recommendation of RILEM TC 246-TDC: Test Methods to Determine Durability of Concrete under Combined Environmental Actions and Mechanical Load. *Materials and Structures*, 50, 155. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1000-3>.
12. CEN EN 14629 *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Determination of Chloride Content in Hardened Concrete*. European Committee for Standardization (CEN), 2007. 14.
13. EN 12390-11 Testing Hardened Concrete – Part 11: Determination of the Chloride Resistance of Concrete, Unidirectional Diffusion. Dansk Standardiseringsrad (DS), 2015. 35.
14. Bartholomew M., Edvardsen C., Ferreira M., von Greve-Dierfeld S., Gulikers J., Helland S., Markset G., McKenna P., Papworth F., Pielstick B., Rahimi A. (2015) *Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards: Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides*. *Fib Bulletin No 76*. International Federation for Structural Concrete. 191. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0076>.
15. Setzer M. J., Fagerlund G., Janssen D. J. (1996) CDF Test – Test Method for the Freeze Thaw and Deicing Resistance of Concrete – Tests with Sodium Chloride (CDF). RILEM TC 117-FDC. *Materials and Structures*, 29, 523–528.
16. ISO 5725-1. 1994 Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. International Organization for Standardization (ISO), 1998. 28.
17. Setzer M. J., Auberg R., Keck H.-J. (2002) Development of the Micro-Ice-Lens Model. *International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*. RILEM Publications SARL, 133–145.
18. Leonovich S. N., Al-Fakikh O. A. M. (2004) Residual Frost Resistance of concrete of Operated Structures *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i Arhitektura = Bulletin of the Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture*, (1), 125–128 (in Russian).
19. Leonovich S. N. (2009) Evaluation of the Residual Frost Resistance of Concrete of Operated Structures by the Method of Separation with Chipping. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo = News of Higher Education Institutions. Construction*, (6), 75–82 (in Russian).
20. Leonovich S. N., Piradov K. A. (2009) Evaluation of Frost Resistance by Methods of Fracture Mechanics. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*, (3), 134–136 (in Russian).

Поступила 01.02.2022

Подписана в печать 06.04.2022

Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. EN 1992-1-1 *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization, 2004. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>.
2. ACI 318-14 *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, 2014. Available at: <http://aghababaie.usc.ac.ir/files/1506505203365.pdf>.
3. *Standard Specifications for Concrete Structures – 2007 “Design”*. JSCE Guidelines for Concrete No 15. Japan Society of Civil Engineers, 2007. Available at: https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15_Standard_Specifications_Design_1.0.pdf.
4. GB 50010-2002 *Code for Design of Concrete Structures*. China Building Science Academy, 2010.
5. Schießl P., Bamforth P., Baroghel-Bouny V., Corley G. W., Faber M. H., Forbes J. M., Gehlen C., Helene P., Helland S., Ishida T., Markset G., Nilsson L. O., Rostam S., Siemes A., Walraven J. C. (2006). *Model Code for Service Life Design*. *Fib Bulletin No 34*. International Federation for Structural Concrete. 116.
6. *2013 Report Card for America’s Infrastructure*. ASCE. Available at: <https://www.api.org/~media/energyinfrastructure/images/rail/related-documents/report-card-for-america-infrastructure.pdf>.
7. Wittmann F. H., Zhao T., Jiang F., Wan X. (2012) Influence of Combined Actions on Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures Exposed to Aggressive

Received: 01.02.2022

Accepted: 06.04.2022

Published online: 29.07.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-281-289>

УДК 628.112

Расчет параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин

Инж. Ю. А. Медведева¹⁾, докт. техн. наук, проф. В. В. Ивашечкин¹⁾, студ. Е. С. Сацута¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье рассмотрена технологическая схема гидроэлеваторной установки, согласно которой вода из напорного бака подается рабочим насосом в скважину по двум параллельным трубопроводам: гидромониторному с размывающим насадком для разрушения песчаной пробки и подводящему, который подключен к рабочему соплу гидроэлеватора. Гидроэлеватор содержит всасывающий и подающий трубопроводы для забора гидросмеси и очистки одно- и двухколонных водозаборных скважин от песчаных пробок. Приведена методика расчета и подбора параметров технологического оборудования установки. На основании составленных уравнений движения жидкости по подводящему трубопроводу с активным соплом и гидромониторному трубопроводу с размывающим насадком получены выражения для построения напорных характеристик этих трубопроводов. Предложен графоаналитический метод определения расходов воды в них путем построения характеристик рабочего насоса и трубопроводов и нахождения координат рабочей точки. Варьируя параметры трубопроводов и характеристики рабочего насоса, не изменяя параметры струйного насоса-гидроэлеватора, вычисляли значения полезной высоты подъема гидроэлеватора. Это позволило подобрать два варианта технологического оборудования гидроэлеваторной установки (для полипропиленовых и стальных труб) для удаления песчаных пробок из водозаборных скважин максимальной глубиной 50 и 75 м.

Ключевые слова: водозаборная скважина, пескование, песчаная пробка, капитальный ремонт, гидроэлеватор, насос, водоснабжение

Для цитирования: Медведева, Ю. А. Расчет параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, Е. С. Сацута // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 281–289. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-281-289>

Calculation of Parameters of Technological Equipment of Hydraulic Elevator Installation for Removing Sand Plugs from Wells

J. A. Medvedeva¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, E. S. Satsuta¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers the technological scheme of the hydraulic elevator installation, according to which water from a pressure tank is supplied by a working pump to the well through two parallel pipelines: a hydraulic monitor with a washing nozzle for destroying a sand plug and a supply pipeline that is connected to the working nozzle of a hydraulic elevator containing suction and supply pipelines for taking slurry and cleaning single- and double-column water wells from sand plugs. The methodology for calculation and selection of parameters of technological equipment of the installation is given. Based on the compiled equations of fluid motion along the supply pipeline with an active nozzle and the hydraulic monitoring pipeline with a scouring nozzle, expressions have been obtained for constructing the pressure characteristics of these pipelines. A graphic-analytical method is proposed for determining water flow rates in them by constructing the characteristics of a working pump and

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
ivashechkin_vlad@mail.ru

Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-13
ivashechkin_vlad@mail.ru

pipelines and finding the coordinates of the operating point. By varying the parameters of the pipelines and the characteristics of the working pump, without changing the parameters of the jet pump-hydraulic elevator, the values of the useful lifting height of the hydraulic elevator were calculated, which has made it possible to select two options for the technological equipment of the hydraulic elevator installation (for polypropylene and steel pipes) for removing sand plugs from water wells with a maximum depth of 50 and 75 m.

Keywords: water well, sanding, sand plug, overhaul, hydraulic elevator, pump, water supply

For citation: Medvedeva J. A., Ivashechkin V. V., Satsuta E. S. (2022) Calculation of Parameters of Technological Equipment of Hydraulic Elevator Installation for Removing Sand Plugs from Wells. *Science and Technique*. 21 (4), 281–289. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-281-289> (in Russian)

Введение

В процессе длительной эксплуатации удельный дебит большинства скважин вначале снижается, а затем они могут полностью выйти из строя. Уменьшение и прекращение подачи воды из скважин происходит, как правило, из-за кольматации и пескования. Песок при неправильной эксплуатации скважины либо при наличии дефектов обсадной трубы, сальника или фильтра осажается в стволе скважины и образует песчаную пробку, которая частично или полностью перекрывает фильтр. Для ее извлечения применяют желонирование и эрлифтную прокачку [1]. Желонирование скважины требует значительных трудозатрат, кроме этого, при сбрасывании желонки на песчаную пробку в фильтре возникают растягивающие напряжения, которые при ослаблении коррозией водоприемной поверхности могут привести к ее разрушению. При использовании эрлифтов применяется специальное оборудование, включающее мощные передвижные компрессоры с дизельными двигателями и автокраны для монтажа-демонтажа эрлифта, что не всегда экономично.

Для удаления песчаных пробок из фильтров пескующих скважин можно использовать насосы-гидроэлеваторы, которые способны перекачивать пульпу и загрязненные жидкости [2, 3]. Теоретические основы работы струйных насосов разработаны П. Н. Каменевым, Е. А. Соколовым, Г. Н. Сизовым, Б. Ф. Лямаевым и др. [4–12].

С целью эффективного удаления песчаных пробок гидроэлеваторная установка, кроме рабочего насоса со струйным насосом-гидроэлеватором, должна быть дополнена гидромониторным трубопроводом с насадком, который обеспечивает размыв слежавшейся песчаной пробки. С учетом этого необходимо внести коррективы в методику подбора технологического оборудования для установки. В [13] приведен расчет геометрических размеров гидро-

элеватора (рис. 1) и параметров оборудования гидроэлеваторной установки с гидромониторным трубопроводом для удаления песчаных пробок из одноколонных скважин глубиной до 40 м. Следует отметить, что такие глубины скважин в Республике Беларусь характерны для слабозащищенных с поверхности надморенных отложений сожской морены, в то время как основным водоносным горизонтом для хозяйственно-питьевого водоснабжения является днепровско-сожский горизонт, который сложен рыхлыми водовмещающими породами (песками различного гранулометрического состава) и каптируется скважинами (глубиной установки 50–75 м), оборудованными фильтрами. Помимо одноколонных скважин, представляется перспективным применение на этот водоносный горизонт двухколонных скважин как обладающих наибольшей долговечностью [14, 15]. Поэтому для расширения области использования гидроэлеваторных установок с более глубокими водозаборными скважинами, в том числе двухколонных конструкций, потребовалось уточнение методики расчета параметров гидроэлеваторной установки для работы в таких условиях.

В БНТУ для удаления песчаных пробок при текущем ремонте водозаборных скважин предложено применять гидроэлеваторную установку, имеющую несложное технологическое обо-

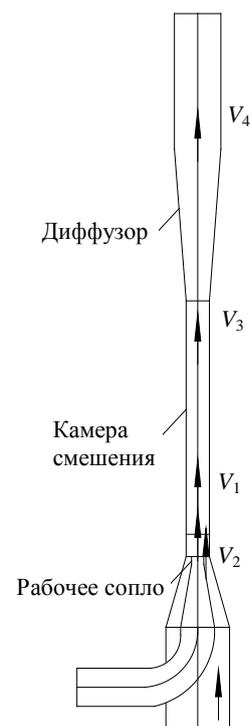


Рис. 1. Схема насоса-гидроэлеватора
Fig. 1. Scheme of hydraulic elevator pump

Из (4) скорость инжектируемого потока

$$v_2 = \sqrt{\frac{h_{п.д} 2g}{1 + \zeta_2}}. \quad (5)$$

Суммарный расход гидроэлеватора запишем в виде

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = Q_1 + u'Q_1, \quad (6)$$

где Q_1 – расход рабочей жидкости.

Диаметр смесительной камеры $d_3 = \sqrt{\frac{4\omega_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q_3}{\pi v_3}}$. Скорость в подающем трубопроводе

де $v_4 = \frac{Q_3}{\omega_4}$, где ω_4 – площадь поперечного сечения подающего трубопровода.

Полезную высоту подъема воды определяем по формуле [4]

$$H_{\text{под}} = p - \sum h_{w_4} = (1 - \zeta_3) \frac{v_3^2}{2g} - h_{п.д} - \sum h_{w_4}, \quad (7)$$

где p – напор, создаваемый гидроэлеватором; $\sum h_{w_4}$ – потери напора в подающем трубопроводе; ζ_3 – коэффициент, учитывающий потери энергии в смесительной камере и диффузоре, $\zeta_3 = 0,3$ [4].

По статическому уровню воды в скважине проведем плоскость сравнения 0–0 (рис. 2), а через тройник – сечение 1'–1'. Тогда давление в этом сечении будет одинаковым на входе в гидромониторный и подводящий трубопроводы. Сечение 1–1 возьмем на выходе из активного сопла (рис. 2). Соединив уравнением Бернулли сечения 1'–1' и 1–1, составим уравнение движения жидкости по подводящему трубопроводу

$$z_{1'} + \frac{p_{1'}}{\rho_j g} + \frac{\alpha v_{1'}^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho_j g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} + \sum h_{w_{п}}, \quad (8)$$

где z_i, p_i, v_i – геометрическая высота, пьезометрическое давление и скорость движения жидкости в i -м сечении соответственно; $\sum h_{w_{п}}$ – потери напора в подводящем трубопроводе.

Относительно плоскости сравнения 0–0 получим:

$$z_{1'} = H; \quad z_1 = -h_{\text{загл}}; \quad p_{1'} = p_{1'п.треб};$$

$$v_1 = v_c = \frac{Q_{п.}}{\omega_c}; \quad v_{1'} = v_{п.} = \frac{Q_{п.}}{\omega_{п.}}, \quad (9)$$

где $h_{\text{загл}}$ – заглубление сопла под уровень воды в скважине; $p_{1'п.треб}$ – требуемое давление в подводящем трубопроводе; v_c – скорость в выходном сечении сопла диаметром d_c и площадью ω_c ; $v_{п.}, Q_{п.}, \omega_{п.}$ – скорость, расход и площадь живого сечения в подводящем трубопроводе соответственно.

Пьезометрическое давление в сечении 1–1

$$p_1 = \rho_j g (h_{\text{загл}} - h_{п.д}), \quad (10)$$

где $h_{п.д}$ – понижение давления относительно гидростатического во всасывающей патрубке камеры смешения насоса-гидроэлеватора при его работе.

Введем обозначение $\frac{p_{п.треб}}{\rho_j g} = H_{п.треб}$ и под-

ставим (9) и (10) в (8). Тогда выражение для характеристики подводящего трубопровода примет вид

$$H_{п.треб} = \frac{\alpha v_c^2}{2g} - \frac{\alpha v_{п.}^2}{2g} - H - h_{п.д} + \sum h_{w_{п.}}. \quad (11)$$

Потери напора в подводящем трубопроводе определим по формуле

$$\sum h_{w_{п.}} = h_{w_{п.м}} + h_{w_{п.дл}} = (2h_{пов} + h_{п.суж} + h_{соп}) +$$

$$+ h_{w_{п.дл}} = \frac{v_{п.}^2}{2g} \left(2\zeta_{пов} + \zeta_{п.суж} \frac{\omega_{п.}^2}{\omega_{сж}^2} + \zeta_{соп} \frac{\omega_{п.}^2}{\omega_c^2} \right) +$$

$$+ k_{п.} A_{п.} l_{п.} Q_{п.}^2 = \sum \zeta_{п.} \frac{v_{п.}^2}{2g} + k_{п.} A_{п.} l_{п.} Q_{п.}^2,$$

где $h_{w_{п.м}}, h_{w_{п.дл}}$ – потеря напора на местных сопротивлениях и по длине соответственно; $h_{пов}, h_{п.суж}, h_{соп}$ и $\zeta_{пов}, \zeta_{п.суж}, \zeta_{соп}$ – местные потери напора и коэффициенты сопротивлений при повороте трубопровода на 90° , при постепенном сужении трубопровода на подходе к соплу, при выходе потока из сопла соответственно;

$\omega_{сж}$ – площадь входного сечения сопла; A_n – удельное сопротивление подводящего трубопровода [17]; k_n – поправочный коэффициент, на который при $v \neq 1$ м/с следует умножать значения A_n ; l_n – длина подводящего трубопровода, м; ζ_n – коэффициент сопротивления подводящего трубопровода.

Соединив уравнением Бернулли вида (8) сечения 1'-1' и 1''-1'', составим уравнение движения жидкости по гидромониторному трубопроводу. Относительно плоскости сравнения 0-0 (рис. 2) имеем

$$z_{1'} = H; z_{1''} = -h_{загл}; p_{1'} = p_{1г.треб};$$

$$v_{1''} = v_{нас} = \frac{Q_{г}}{\omega_{нас}}; v_{1'} = v_{г} = \frac{Q_{г}}{\omega_{г}}, \quad (13)$$

где $p_{1г.треб}$ – требуемое давление в гидромониторном трубопроводе; $v_{нас}$ – скорость в выходном сечении размывающего насадка площадью $\omega_{нас}$; $v_{г}$, $Q_{г}$, $\omega_{г}$ – скорость, расход и площадь сечения в гидромониторном трубопроводе.

Принимаем пьезометрическое давление в сечении 1''-1'' $p_{1''} = \rho_{ж} g h_{загл}$. Получим требуемый напор в сечении 1'-1' и выражение для характеристики гидромониторного трубопровода, подставив параметры в уравнение Бернулли:

$$H_{г.треб} = \frac{\alpha v_{нас}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{г}^2}{2g} - H + \sum h_{w_r}. \quad (14)$$

Потери напора в гидромониторном трубопроводе определим по формуле

$$\sum h_{w_r} = h_{w_r,м} + h_{w_r,дл} = (h_k + h_{нас}) + h_{w_r,дл} =$$

$$= \frac{v_{г}^2}{2g} \left(\zeta_k + \zeta_{нас} \frac{\omega_{г}^2}{\omega_{нас}^2} \right) + k_{г} A_{г} l_{г} Q_{г}^2 = \quad (15)$$

$$= \sum \zeta_{г} \frac{v_{г}^2}{2g} + k_{г} A_{г} l_{г} Q_{г}^2,$$

где $h_{w_r,м}$, $h_{w_r,дл}$ – потери напора в местных сопротивлениях и по длине; h_k , $h_{нас}$, ζ_k , $\zeta_{нас}$ – потери напора и коэффициенты сопротивления в пробковом кране и при выходе из насадка; $l_{г}$ – длина гидромониторного трубопровода; $A_{г}$, $k_{г}$ – удельное сопротивление и поправочный коэффициент гидромониторного трубопровода;

$\zeta_{г}$ – коэффициент сопротивления гидромониторного трубопровода.

Определим расходы в гидромониторном и подводящем трубопроводах графически, так как они подключены параллельно. Пренебрегаем потерями напора в напорном патрубке рабочего насоса из-за их малости. По формулам (11), (14) строим характеристики указанных трубопроводов, задавая произвольно расходы, и, суммируя их по правилам сложения характеристик параллельных трубопроводов, строим суммарную характеристику. В месте ее пересечения с характеристикой погружного насоса $H_n = f(Q)$ находим рабочую точку *A* (рис. 3).

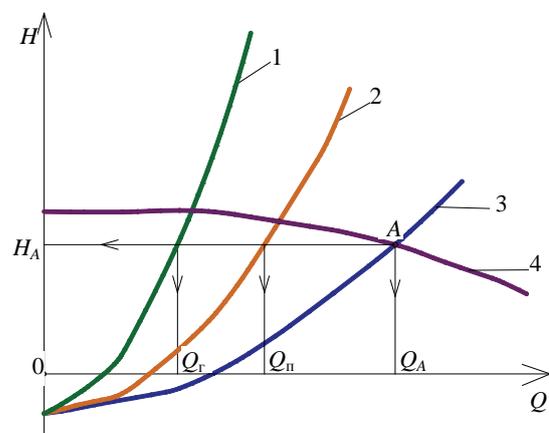


Рис. 3. Характеристики совместной работы рабочего насоса и трубопроводов: 1 – гидромониторного, $H_{г.треб} = f(Q)$; 2 – подводящего, $H_{п.треб} = f(Q)$; 3 – суммарная характеристика трубопроводов; 4 – характеристика насоса $H_n = f(Q)$

Fig. 3. Characteristics of joint operation of working pump and pipelines: 1 – hydraulic monitoring pump, $H_{г.треб} = f(Q)$; 2 – supply pipeline, $H_{п.треб} = f(Q)$; 3 – total characteristics of pipelines; 4 – characteristics of pump $H_n = f(Q)$

Пример расчета параметров гидроэлеваторной установки

1. Исходные данные: $d_c = 6,8$ мм; $H_{ст} = 23,0$ м; $H_б = 2,0$ м. Рассмотрим возможность применения полипропиленовых труб, поставляемых в бухтах по 100 м, в качестве материала для трубопроводов.

Построение характеристики подводящего трубопровода. Параметры подводящего трубопровода: труба ПП-100 SDR 11 32×3,4, внутренний диаметр $d_n = 0,0262$ м, длина $l_n = 60$ м. Коэффициент сопротивления плавного сужения подводящего трубопровода при подходе к соплу [18]

$$\zeta_{п.суж} = k \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = 0,25 \left(\frac{1}{0,615} - 1 \right)^2 = 0,098, \quad (16)$$

где k – коэффициент смягчения при постепенном сужении, $k = 0,25$ при угле конусности 20° ; ε – коэффициент сжатия струи при постепенном сужении подводящего трубопровода при подходе к соплу, $\varepsilon \approx 0,615$ при $d_n = 0,026$ м и $d_{суж} = 0,010$ м.

Для сопла, выполненного в виде конически сходящегося насадка при углах конусности $\beta = 12^\circ - 15^\circ$, принимали $\zeta_{соп} = 0,09$. Принимаем $\zeta_{пов} = 0,28$ – для плавного поворота на 90° при отношении радиуса закругления к диаметру $R/d = 2$ шероховатого трубопровода [18]. Тогда суммарный коэффициент сопротивления подводящего трубопровода

$$\sum \zeta_{п} = 2\zeta_{пов} + \zeta_{п.суж} \frac{\omega_n^2}{\omega_{сж}^2} + \zeta_{соп} \frac{\omega_n^2}{\omega_c^2} = 2 \cdot 0,28 + 0,098 \frac{0,026^4}{0,010^4} + 0,09 \frac{0,026^4}{0,0068^4} = 24,3. \quad (17)$$

Для определения потерь напора в трубопроводах использовали таблицы Ф. А. Шевелева [17]. Требуемый напор для построения характеристики трубопровода вычисляли по формуле (11).

Построение характеристики гидромониторного трубопровода. Параметры гидромониторного трубопровода: труба ПП-100 SDR 11 20×2,4, внутренний диаметр $d_r = 0,0162$ м, длина $l_r = 60$ м. Трубопровод снабжен размывающим насадком диаметром $d_{нас} = 7$ мм на выходе и пробковым краном на входе. В этом случае $\zeta_k = 0,05$ – для полностью открытого пробкового крана [18], $\zeta_{нас} = 0,09$ – для конически сходящегося насадка при углах конусности $\beta = 12^\circ - 15^\circ$. Тогда суммарный коэффициент сопротивления гидромониторного трубопровода

$$\sum \zeta_r = \zeta_k + \zeta_{нас} \frac{\omega_r^2}{\omega_{нас}^2} =$$

$$= 0,05 + 0,09 \frac{0,0162^4}{0,007^4} = 2,51. \quad (18)$$

Требуемый напор вычисляем по (14). Строим характеристики (рис. 4) гидромониторного (кривая 1) и подводящего (кривая 2) трубопроводов. По характеристике совместной работы трубопроводов (кривая 3) подбираем погружной насос ЭЦВ 6-10-160 с напорной характеристикой (кривая 4), находим рабочую точку A – при работе насоса на два трубопровода: $H_A = 163$ м; $Q_A = 2,84$ л/с; $Q_r = 0,95$ л/с; $Q_n = 1,89$ л/с.

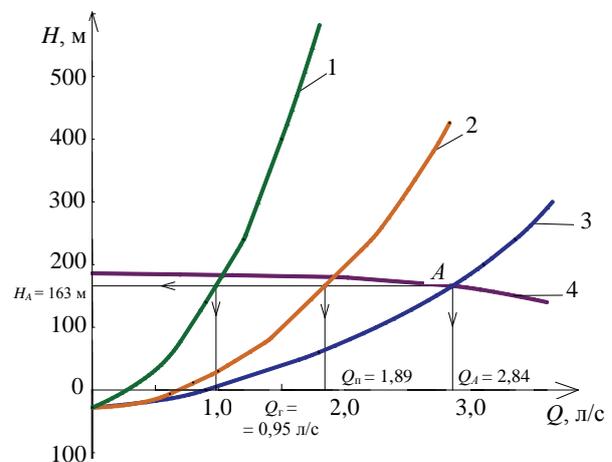


Рис. 4. Характеристики совместной работы рабочего насоса и трубопроводов (полипропиленовые трубы): 1 – $H_{г.треб} = f(Q)$; 2 – $H_{п.треб} = f(Q)$; 3 – характеристика совместной работы трубопроводов; 4 – $H_n = f(Q)$ насоса ЭЦВ 6-10-160

Fig. 4. Characteristics of joint operation of working pump and pipelines (polypropylene pipes): 1 – $H_{г.треб} = f(Q)$; 2 – $H_{п.треб} = f(Q)$; 3 – characteristics of joint work of pipelines; 4 – $H_n = f(Q)$ of ЭЦВ 6-10-160-pump

Анализ эффективности работы установки и расчет геометрических размеров гидроэлеватора. Рассмотрим самый неблагоприятный расчетный случай: пробковый кран полностью открыт. Согласно рис. 4, расход в подводящем трубопроводе $Q_1 = Q_n = 1,89$ л/с. Ориентировочно принимаем $h_{п.д} \approx 1,0$ м, $\zeta_2 = 0,1$, $u' = 0,27$ [16]. Параметры подающего трубопровода: труба ПП-100 SDR 11 50×4,6, диаметр $d_4 = 0,0408$ м, длина $l_{под} = 60$ м, $H = 25$ м. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Так как $H_{под} = 54,7$ м $>$ $H_{скв} = 50,0$ м, то гидроэлеватор, работая в самом неблагоприятном режиме, способен поднять песок на поверхность.

Гидравлические характеристики гидроэлеватора при полипропиленовых трубах
Hydraulic characteristics of hydraulic elevator with polypropylene pipes

v_2 , м/с	u	v_3 , м/с	v_1 , м/с	Q_3 , м ³ /с	d_3 , м	v_4 , м/с	$H_{\text{под}}$, м
4,2	0,28	41,6	52,1	0,0024	0,0086	1,87	54,7

Определим геометрические размеры насоса-гидроэлеватора исходя из рекомендуемых соотношений [4]:

– длина смесительной камеры $l_k = 8d_3 = 8 \cdot 0,086 \approx 0,1$ м;

– расстояние до плоскости среза насадки от начала смесительной камеры $l' = 1,5d_1 = 1,5d_c = 1,5 \cdot 0,0068 = 0,01$ м, где $d_1 = d_c$, d_c – диаметр сопла;

– длина диффузора $l_d = 7(d_4 - d_3) = 7 \times (0,0408 - 0,0086) = 0,23$ м, d_4 – диаметр подающего трубопровода.

Анализ результатов расчета показал, что при глубине скважин до 50 м давление рабочего насоса не превышает предельное давление, на которое рассчитаны полипропиленовые трубы (1,6 МПа). Следовательно, при глубинах скважин более 50 м требуется замена этих труб на стальные.

2. Аналогично рассчитаем параметры гидроэлеваторной установки с применением стальных труб с соединительными муфтами.

Построение характеристики подводящего трубопровода. Исходные данные: $d_c = 6,8$ мм; $H_{\text{ст}} = 23,0$ м; $H_6 = 2,0$ м; $\zeta_{\text{п.суж}} = 0,098$. Параметры подводящего трубопровода: длина $l_{\text{п}} = 80$ м; внутренний диаметр $d_{\text{п}} = 0,032$ м.

Суммарный коэффициент сопротивления подводящего трубопровода

$$\sum \zeta_{\text{п}} = 2\zeta_{\text{пов}} + \zeta_{\text{п.суж}} \frac{\omega_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{сж}}^2} + \zeta_{\text{соп}} \frac{\omega_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{с}}^2} = 2 \cdot 0,28 + 0,098 \frac{0,032^4}{0,010^4} + 0,09 \frac{0,032^4}{0,0068^4} = 55. \quad (19)$$

Требуемый напор для построения $H_{\text{п.треб}} = f(Q)$ вычисляли по формуле (11).

Построение характеристики гидромониторного трубопровода. Параметры гидромониторного трубопровода: длина $l_{\text{г}} = 80$ м; внутренний диаметр $d_{\text{г}} = 0,02$ м, диаметр насадка $d_{\text{нас}} = 7$ мм.

Суммарный коэффициент сопротивления гидромониторного трубопровода

$$\sum \zeta_{\text{г}} = \zeta_{\text{пов}} + \zeta_{\text{нас}} \frac{\omega_{\text{г}}^2}{\omega_{\text{нас}}^2} = 0,05 + 0,09 \frac{0,02^4}{0,007^4} = 6,05. \quad (20)$$

Требуемый напор $H_{\text{г.треб}} = f(Q)$ вычисляем по (14). Строим характеристики трубопроводов (рис. 5). По характеристике совместной работы трубопроводов (кривая 3) подбираем погружной насос ЭЦВ 6-10-235 с напорной характеристикой (кривая 4), находим рабочую точку A : $H_A = 199$ м; $Q_A = 3,62$ л/с; $Q_{\text{г}} = 1,43$ л/с; $Q_{\text{п}} = 2,19$ л/с.

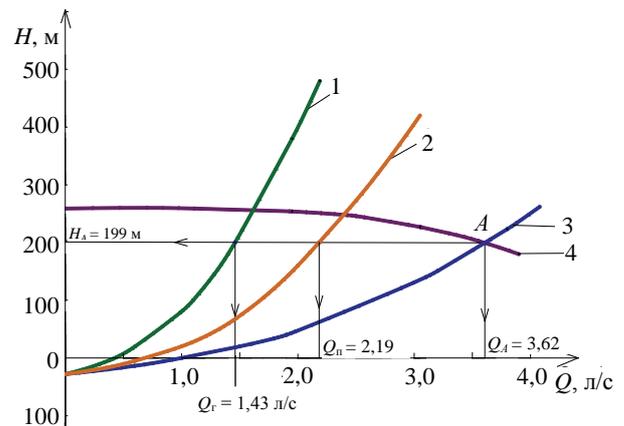


Рис. 5. Характеристики совместной работы рабочего насоса и трубопроводов (стальные трубы): 1 – $H_{\text{г.треб}} = f(Q)$; 2 – $H_{\text{п.треб}} = f(Q)$; 3 – характеристика совместной работы трубопроводов; 4 – $H_{\text{н}} = f(Q)$ насоса ЭЦВ 6-10-235

Fig. 5. Characteristics of joint operation of working pump and pipelines (steel pipes): 1 – $H_{\text{г.треб}} = f(Q)$; 2 – $H_{\text{п.треб}} = f(Q)$; 3 – characteristics of joint work of pipelines; 4 – $H_{\text{н}} = f(Q)$ of ЭЦВ 6-10-235-pump

Анализ эффективности работы установки и расчет геометрических размеров гидроэлеватора. При полностью открытом пробковом кране расход в подводящем трубопроводе (рис. 5) $Q_1 = Q_{\text{п}} = 2,19$ л/с. Параметры подающего трубопровода: труба стальная внутренним диаметром $d_4 = 0,05$ м, длина $l_{\text{под}} = 80$ м, $H = 25$ м. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Гидравлические характеристики гидроэлеватора при стальных трубах
Hydraulic characteristics of hydraulic elevator with steel pipes

v_2 , м/с	u	v_3 , м/с	v_1 , м/с	Q_3 , м ³ /с	d_3 , м	v_4 , м/с	$H_{\text{под}}$, м
4,2	0,28	48,05	60,3	0,00278	0,0086	1,42	76,5

Так как $H_{\text{под}} = 76,5 \text{ м} > H_{\text{скв}} = 75,0 \text{ м}$, то гидроэлеватор, работая в самом неблагоприятном режиме, способен поднять песок на поверхность. Геометрические размеры насоса-гидроэлеватора: $l_k = 8d_3 = 8 \cdot 0,086 \approx 0,1 \text{ м}$; $l' = 1,5d_1 = 1,5d_c = 1,5 \cdot 0,0068 = 0,01 \text{ м}$; $l_d = 7(d_4 - d_3) = 7 \cdot (0,05 - 0,0086) = 0,29 \text{ м}$.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета и подбора параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки, которая позволяет графоаналитическим методом подобрать рабочий насос, диаметры подводящего и гидромониторного трубопроводов при заданной глубине скважины, а затем, выполнив анализ эффективности работы установки, произвести корректировку размеров струйного насоса-гидроэлеватора и подающего трубопровода.

2. Приведены примеры расчета параметров установки, содержащей струйный насос-гидроэлеватор, подающий, подводящий и гидромониторный трубопроводы. Подобраны два варианта технологического оборудования (полипропиленовые и стальные трубы) для скважин глубиной 50 и 75 м. Полипропиленовые трубы в бухтах могут применяться при глубинах ремонтируемых скважин до 50 м, так как рассчитаны на предельное давление 1,6 МПа, создаваемое в рабочей точке А ($H_A = 163 \text{ м}$) погружным насосом ЭЦВ 6-10-160. Для скважин глубиной 75 м необходимо использовать более высоконапорный погружной насос ЭЦВ 6-10-235 и стальные составные трубы, которые обеспечат надежность конструкции при большем давлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду / Д. Н. Башкатов [и др.]. М.: Недра, 1988. 268 с.

2. Гидроэлеватор: а. с. СССР № 1173076 / В. А. Романов, Н. А. Богомолов. Оpubл. 15.08.1985.
3. Лабораторные испытания гидроэлеватора для извлечения песчаных пробок из скважин / В. В. Ивашечкин [и др.] // Наука – образованию, производству, экономике: матер. 11-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т. / редкол.: Б. М. Хрусталев [и др.]. Минск: БНТУ, 2013. Т. 2. С. 109.
4. Каменев, П. Н. Гидроэлеваторы в строительстве / П. Н. Каменев. М.: Стройиздат, 1964. 403 с.
5. Соколов, Е. А. Струйные аппараты / Е. А. Соколов, Н. М. Зингер. 2-е изд. М.: Энергия, 1970. 288 с.
6. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта [и др.], 2-е изд. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
7. Сизов, Г. Н. Гидравлические расчеты специальных систем речных танкеров / Г. Н. Сизов. Л.: Судостроение, 1976. 288 с.
8. Лямаев, Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Ф. Лямаев. Л.: Машиностроение, 1988. 268 с.
9. Murzakhmetov, V. Методика расчетного моделирования режимов работы струйного насоса для транспортировки продуктивных растворов урана / В. Murzakhmetov, S. Toktamissova, A. Sladkowski // Transport Problems 2020: Proceedings XII International Scientific Conference IX International Symposium of Young Researchers / ed. of Chief A. Sladkowski. Gliwice: Silesian University of Technology, 2020. С. 528–538.
10. Калачев, В. В. Струйные насосы. Теория, расчет и проектирование / В. В. Калачев. М.: Филинь, Омега-Л, 2017. 418 с.
11. Паневник, Д. А. Повышение энергоэффективности использования скважинных струйных насосов / Д. А. Паневник, А. В. Паневник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 5. С. 462–471. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-462-471>.
12. Carpenter, C. Surface Jet Pumps Enhance Production and Processing / C. Carpenter // Journal of Petroleum Technology. 2014. Vol. 66, No 11. P. 134–136. <https://doi.org/10.2118/1114-0134-jpt>.
13. Ивашечкин, В. В. Расчет гидроэлеваторной установки для очистки водозаборных скважин от песчаных пробок / В. В. Ивашечкин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 1. С. 79–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-79-90>.
14. Медведева, Ю. А. Двухуровневая скважина для забора подземных вод / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, Е. С. Сацута // Вода. Газ. Тепло 2020: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Белор. нац. техн. ун-та, 100-летию каф. «Гидротехнич. и энергетическое стр-во, водный транспорт и гидравлика», 90-летию каф. «Теплогасоснаб. и вентиляция» /

- редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. Минск: БНТУ, 2020. С. 188–192.
15. Водозаборная скважина: пат. ВУ 23608 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. Опубл. 30.12.2021.
 16. Медведева, Ю. А. Определение КПД насоса-гидроэлеватора / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Респуб. науч.-техн. конф. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. С. 91–95.
 17. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. 11-е изд., доп. М.: Бастет, 2016. 428 с.
 18. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под. ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 238 с.
- Поступила 22.03.2022
Подписана в печать 24.05.2022
Опубликована онлайн 29.07.2022
- REFERENCES
1. Bashkatov D. N., Drakhlis S. L., Safonov V. V., Kvashnin G. P. (1988) Special Works in Drilling and Equipment of Water Wells. Moscow, Nedra Publ. 268 (in Russian).
 2. Romanov V. A., Bogomolov N. A. (1985) *Hydraulic Elevator*. USSR Inventor's Certificate No 1173076 (in Russian).
 3. Ivashechkin V. V., Avtushko P. A., Kurch A. N., Antipova A. A., Rud'man N. A., Bobkova Yu. A. (2013) Laboratory Tests of a Hydraulic Elevator for Extracting Sand Plugs From Wells. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Mater. 11-i Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 2* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 109 (in Russian).
 4. Kamenev P. N. (1964) *Hydraulic Elevators in Construction*. Moscow, Stroyizdat Publ. 403 (in Russian).
 5. Sokolov E. A., Zinger N. M. (1970) Inkjet Devices. 2nd ed. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
 6. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B., Baibakov O. V., Kirillovskii Yu. L. (1982) *Hydraulics, Hydraulic Machines and Hydraulic Drives*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ. 423 (in Russian).
 7. Sizov G. N. (1976) *Hydraulic Calculations of Special Systems of River Tankers*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 288 (in Russian).
 8. Lyamaev B. F. (1988) *Hydrojet Pumps and Installations*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 268 (in Russian).
 9. Myrzakhmetov B., Toktamissova S., Sładkowski A. (2020) Method for Computational Modeling of Jet Pump Operation Modes for Transport of Productive Uranium Solutions. *Transport Problems 2020: Proceedings XII International Scientific Conference IX International Symposium of Young Researchers*. Gliwice, Silesian University of Technology, 528–538 (in Russian).
 10. Kalachev V. V. (2017) *Jet Pumps. Theory, Calculation and Design*. Moscow, Filin, Omega-L Publ. 418 (in Russian).
 11. Panevnyk D. A., Panevnyk A. V. (2020) Improving the Energy Efficiency of the Use of Borehole Jet Pumps. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (5), 462–471. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-462-471> (in Russian).
 12. Carpenter C. (2014) Surface Jet Pumps Enhance Production and Processing. *Journal of Petroleum Technology*, 66 (11), 134–136. <https://doi.org/10.2118/1114-0134-jpt>.
 13. Ivashechkin V. V. (2016) Hydraulic Elevator Installation Estimation for the Water Source Well Sand-Pack Cleaning-Up. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (1), 79–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-79-90> (in Russian).
 14. Medvedeva Yu. A., Ivashechkin V. V., Satsuta E. S. (2020) Two-Level Well for Groundwater Intake. *Voda. Gaz. Teplo 2020: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posvyashch. 100-Letiyyu Belor. Nats. Tekhn. Un-ta, 100-Letiyyu Kaf. «Gidrotekhnich. i Energeticheskoe Str-vo, Vodnyi Transport i Gidravlika», 90-Letiyyu Kaf. «Teplogazosnab. i Ventilyatsiya»* [Water. Gas. Heat 2020: Proceedings of Scientific and Technical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of the Belarusian National Technical University, 100th Anniversary of the Department of Hydrotechnical and Energy Construction, Water Transport and Hydraulics”, 90th Anniversary of the Department – “Heat and Gas Supply and Ventilation”]. Minsk, Belarusian National Technical University, 188–192 (in Russian).
 15. Ivashechkin V. V., Medvedeva Yu. A. (2021) *Water Well*. Patent BY No 23608 (in Russian).
 16. Medvedeva Yu. A., Ivashechkin V. V., Sheyko A. M. (2021) Determination of the Efficiency of the Pump-Hydroelevator. *Innovatsionnye Tekhnologii v Vodnom, Kommunal'nom Khozyaistve i Vodnom Transporte: Materialy Respub. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Innovative Technologies in Water, Utilities and Water Transport: Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 91–95 (in Russian).
 17. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2016) Tables for Hydraulic Calculation of Water Pipes. 11th ed. Moscow, Bastet Publ. 428 (in Russian).
 18. Kiselev P. G., Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Slisskii S. M. *Handbook of Hydraulic Calculations*. Moscow, Energiya Publ. 238 (in Russian).
- Received: 22.03.2022
Accepted: 24.05.2022
Published online: 29.07.2022

Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании

Часть 2. Результаты расчета

Канд. техн. наук, доц. О. В. Козунова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Предлагаемая статья является продолжением представленной ранее публикации автора в развитие теории и методики расчета гибких ортотропных железобетонных плит на упругом основании с учетом физической нелинейности материала плит. В статье приводятся численные результаты упругого и нелинейного расчетов изолированной прямоугольной ортотропной плиты на упругом основании (под действием внешней статической нагрузки с учетом собственного веса железобетонной плиты), моделируемом упругим однородным изотропным слоем, жестко соединенным с недеформируемым основанием. В расчете исследуемой конструкции учитывалось изменение ее жесткости в момент трещинообразования и дальнейшего активного раскрытия трещин. Расчет гибкой ортотропной плиты на упругом основании в нелинейной постановке выполнялся итерационным путем методом Б. Н. Жемочкина. Для определения коэффициентов канонических уравнений и свободных членов был использован смешанный метод строительной механики. На первой итерации железобетонная плита рассчитывалась как линейно-упругая, однородная и ортотропная, на последующих – как линейно-упругая, неоднородная и ортотропная на каждом участке Жемочкина. Прогибы плиты с защемленной нормалью в основной системе смешанного метода от действия сосредоточенной силы определялись методом Ритца при представлении прогибов в виде степенного полинома в новом оригинальном выражении, которое автор предложил впервые в части 1 статьи. Алгоритм решения реализован при помощи компьютерной программы Wolfram Mathematica 11.3. Приведены численные и графические результаты упругого и нелинейного расчетов осадок дорожной железобетонной плиты, контактных напряжений и эпюры изгибающих моментов в плите.

Ключевые слова: гибкая ортотропная железобетонная плита, метод Жемочкина, упругий слой, нелинейный расчет, зависимость «жесткость – кривизна», метод Ритца, трещинообразование, дорожная железобетонная плита, осадки, контактные напряжения, изгибающие моменты

Для цитирования: Козунова, О. В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 2: Результаты расчета / О. В. Козунова // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 290–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-290-296>

Improvement of Calculation Technique for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base

Part 2. Calculation Results

O. V. Kozunova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The proposed paper is a continuation of the author's theoretical work presented earlier in the development of the theory and methodology for calculating flexible orthotropic reinforced concrete plates on an elastic foundation, taking into account the physical nonlinearity of the plate material. The paper presents numerical results of elastic and nonlinear calculations of an isolated rectangular orthotropic plate on an elastic foundation, modeled by an elastic homogeneous isotropic layer

Адрес для переписки

Козунова Оксана Васильевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-04
kozunova@gmail.com

Address for correspondence

Kozunova Oksana V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-04
kozunova@gmail.com

rigidly connected to a non-deformable foundation under the action of an external static load, taking into account the own weight of the reinforced concrete plate. The change in its stiffness at the time of cracking and further active opening of cracks has been taken into account in the calculation of the structure under study. The nonlinear calculation of the studied structure takes into account the change in its rigidity at the time of cracking and further active crack opening. The calculation of a flexible orthotropic plate on an elastic foundation in a nonlinear formulation is performed iteratively by the method of B. N. Zhemochkin. A mixed method of structural mechanics has been used to determine the coefficients of canonical equations and free terms. At the first iteration, the reinforced concrete plate is calculated as linearly elastic, homogeneous, and orthotropic; at the subsequent ones – as linearly elastic, inhomogeneous, and orthotropic at each Zhemochkin site. Camber plates with a clamped normal in the primary system of mixed method due to the action of a concentrated force are determined by the Ritz method when the deflections were represented as a power polynomial in a new original expression that has been proposed for the first time in the Part 1 of the paper. The solution algorithm has been implemented using the Wolfram Mathematica 11.3 computer program. Numerical and graphical results of elastic and non-linear calculations of sediment concrete road plate, contact stresses and bending moment diagrams on the plate are presented in the paper.

Keywords: flexible orthotropic reinforced concrete plate, Zhemochkin's method, elastic layer, nonlinear calculation, “stiffness – curvature” dependence, Ritz method, cracking, reinforced concrete road plate, settlements, contact stresses, bending moments

For citation: Kozunova O. V. (2022) Improvement of Calculation Technique for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base. *Science and Technique*. 21 (4), 290–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-290-296> (in Russian)

Общая постановка задач расчета ортотропных плит на упругом основании и алгоритм их расчета с учетом трещинообразования

В предлагаемой статье, являющейся продолжением представленной ранее публикации автора [1] в развитие теории и методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании с учетом физической нелинейности материала плит, рассматривается прямоугольная железобетонная плита под действием статической поверхностной нагрузки ([1], рис. 4). При моделировании основание заменялось упругим изотропным слоем, соединенным жестко с несжимаемым слоем. Принимались следующие гипотезы и допущения:

- в контактной зоне отсутствуют касательные напряжения;
- для гибкой плиты справедливы гипотезы технической теории изгиба [2].

Расчет прямоугольной ортотропной плиты автор предлагает вести смешанным методом строительной механики [3] с использованием способа Б. Н. Жемочкина [4], приняв за неизвестные силы в вертикальных связях Жемочкина, а также два угловых и линейное перемещение введенного защемления нормали в центре плиты. Для описания контакта плиты с упругим основанием после того, как плита разбивается на одинаковые прямоугольные участки размерами $\Delta x \times \Delta y$, в центре каждого участка размещается вертикальная связь. Считается, что усилие в связи вызывает равномерное распределе-

ние контактных напряжений при определении перемещений центра участка.

Для сформулированной в [1] задачи в нелинейной постановке, т. е. с учетом трещинообразования в железобетонной плите со слабо выраженной ортотропией, предлагается итерационный алгоритм способа Б. Н. Жемочкина с использованием зависимости «жесткость – кривизна» [5]. На первой итерации плита рассчитывается как линейно-упругая, ортотропная и однородная [1], на последующих – как линейно-упругая, ортотропная и неоднородная на каждом участке Жемочкина. Вертикальные перемещения поверхности упругого слоя от сосредоточенной силы P определены из соотношения, приведенного в статье С. В. Босакова [6], и представлены в теоретической части данной публикации. Прогибы плиты с защемленной нормалью в основной системе смешанного метода от действия сосредоточенной силы ([1], рис. 5) определены методом Ритца [7] при представлении прогибов в виде степенного полинома в новом оригинальном выражении, которое впервые предложено в [1].

Функционал полной энергии гибкой железобетонной пластинки с защемленной нормалью определен как квадратичная функция коэффициентов $A_{i,k}$ [1], что позволяет из системы линейных алгебраических уравнений найти эти коэффициенты и таким образом вычислить прогибы плиты с защемленной нормалью. Так формируется система уравнений способа Жемочкина на каждой итерации.

Последовательность нелинейного расчета в соответствии с требованиями нормативных документов

Значения нелинейных жесткостей железобетонных элементов следует устанавливать в зависимости от стадии расчета, требований к расчету и характера напряженно-деформированного состояния элемента. На первой стадии расчета конструктивной системы, характеризуемой тем, что армирование железобетонных элементов неизвестно, нелинейную работу элементов рекомендуется учитывать путем понижения их жесткостей с помощью условных обобщенных коэффициентов ([8], п. 6.2.5). На последующих стадиях расчета конструктивной системы, когда известно армирование железобетонных элементов, в расчет следует вводить уточненные значения жесткостей элементов, определяемые с учетом армирования, образования трещин и развития неупругих деформаций в бетоне и арматуре согласно указаниям действующих нормативов по проектированию железобетонных конструкций ([9], главы 5.3, 5.4, п. 5.5.3).

В [10] моделирование железобетонной плиты в линейной постановке выполняется для решения задач, характеризующих работу материала такой несущей конструкции до достижения предела упругости (величина напряжений, при которых не возникает остаточных деформаций), а также в качестве первой стадии расчета с целью получения данных для дальнейшего нелинейного расчета. Неупругую работу (физическую нелинейность) рекомендуется учитывать косвенно с помощью пониженных значений модуля упругости материалов в соответствии с СП 52-103-2007 [8]. Модуль упругости для конечного элемента (КЭ) плит принимается пониженным с коэффициентом 0,3 (0,2), учитывающим ползучесть бетона и наличие трещин. Следует отметить, что в модуле упругости при построении точки 3 (рис. 1) на диаграммах «момент – кривизна», «жесткость – кривизна» по В. И. Соломину [5] для элемента прямоугольного сечения из бетона класса С20/25 (В25) использовался понижающий коэффициент 0,3, точки 4 – 0,2, что отражено на рис. 1.

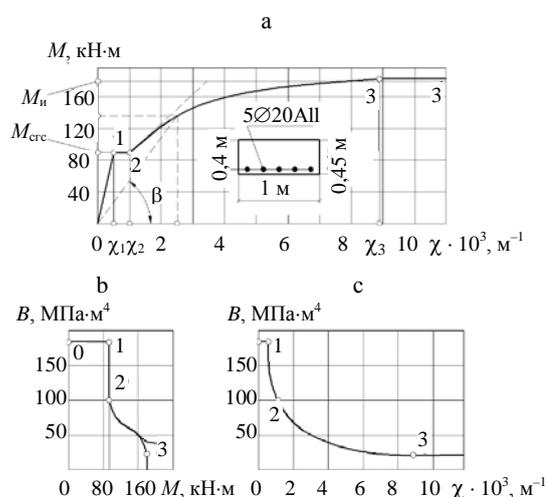


Рис. 1. Зависимости кривизны элемента балки (а) и коэффициента жесткости (б) от момента, жесткости от кривизны (с)

Fig. 1. Dependences of curvature of beam element (a) and stiffness coefficient (b) on the moment, of stiffness on curvature (c)

Построение диаграммы «жесткость – кривизна» для плиты и ее упругий расчет

При нахождении переменной (секущей) жесткости плиты для участка Жемочкина на каждой итерации используется зависимость «жесткость – кривизна» (рис. 2) в направлениях X , Y . Зависимость «жесткость – кривизна», согласно [5], построена по изложенной выше методике, отраженной в [8–10], с использованием приведенной цилиндрической жесткости плиты по направлению осей ортотропии.

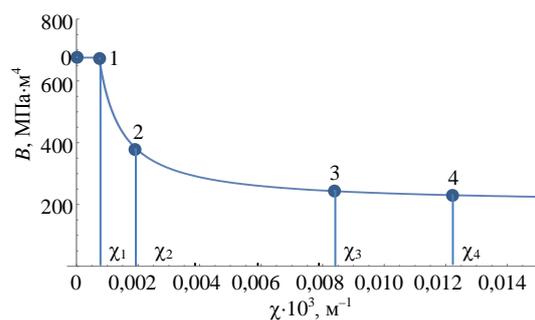


Рис. 2. Зависимость «жесткость – кривизна» по [5]

Fig. 2. Dependence “stiffness – curvature” according to [5]

Упругий расчет выполняли для дорожной железобетонной плиты размерами $4 \times 3 \times 0,14$ м из тяжелого бетона класса С20/25 с упругими характеристиками: модуль деформации бетона $E_6 = 29,05$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_6 = 0,17$. Плита находилась на упругом изо-

тропном слое мощностью (толщиной) $H = 7$ м, жестко соединенном с недеформируемым основанием. Параметры упругого слоя: $E_0 = 20$ кПа, $\nu_0 = 0,33$. Внешняя нагрузка от колеса $Q = 65$ кН распределялась по площади $0,4 \times 0,4$ м и была приложена в центре плиты. В расчете учитывался собственный вес плиты $q = 3,5$ кН/м².

Начальная цилиндрическая жесткость ортотропной плиты:

– в плоскости YOZ

$$D_x^{(0)} = B_x^{(0)} = EJ_x^{(0)} = \frac{E_0 \cdot 0,14^3}{12(1-\nu_0^2)} = \frac{29,05 \cdot 10^6 \cdot 0,14^3}{12(1-0,17^2)} = 6840,46 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

– в плоскости XOZ

$$D_y^{(0)} = B_y^{(0)} = EJ_y^{(0)} = 1,15EJ_x^{(0)} = 1,15 \cdot 6840,46 = 7866,56 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Начальная жесткость кручения гибкой плиты, формула которой приведена в [1], после вычислений получается

$$D_k^{(0)} = \frac{\nu_x + \nu_y}{2} \sqrt{D_x^{(0)} D_y^{(0)}} = \frac{0,17 + 0,17}{2} \sqrt{6840,46 \cdot 7866,56} = 1247,05 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Для анализа параметров напряженно-деформированного состояния по формуле из [11] определяли показатель гибкости изолированной плиты конечных размеров a и b

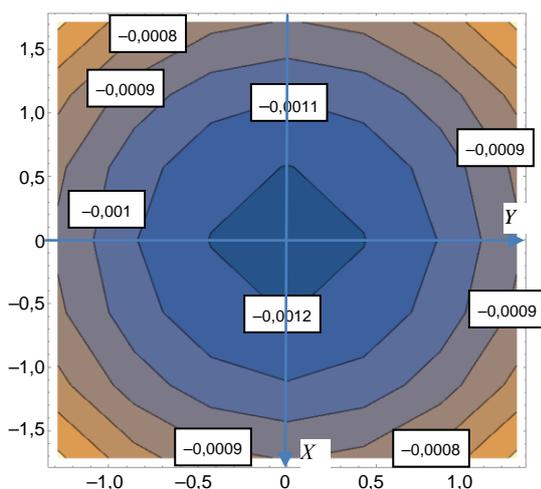


Рис. 3. Эпюры осадок, м, дорожной железобетонной плиты (упругий расчет)

Fig. 3. Diagrams of precipitation, m, of road reinforced concrete slab (elastic calculation)

$$\beta = \frac{\pi E_0 a^3}{(1-\nu_0^2) EJ_0}, \quad (1)$$

где E_0 , ν_0 – упругие параметры изотропного слоя; EJ_0 – цилиндрическая жесткость плиты.

После подстановки параметров плиты и упругого основания в (1) получили следующее значение показателя гибкости, которое свидетельствует о том, что в данной задаче рассчитываются именно гибкие плиты:

$$\beta = \frac{3,14 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 1,5^3}{(1-0,33^2) 6840,46 \cdot 10^3} = 34,789.$$

На рис. 3, 4 в изолиниях для демонстративности построены: эпюры осадок дорожной железобетонной плиты по методике расчета ортотропных плит, приведенной выше, и контактных напряжений в зоне взаимодействия плиты с упругим основанием, моделируемым упругим изотропным слоем. Наибольшие значения получены в центре тяжести плиты, где приложена сосредоточенная сила от колеса машины: осадки плиты $w_{\max} = 0,0012558$ м; контактные напряжения $P_{\max} = 10,38$ кПа.

На рис. 5, 6 построены эпюры изгибающих моментов M_y , M_x (упругий расчет) в изолиниях, которые симметричны относительно осей изгиба и в полной мере подтверждают наличие геометрической ортотропии в дорожных плитах.

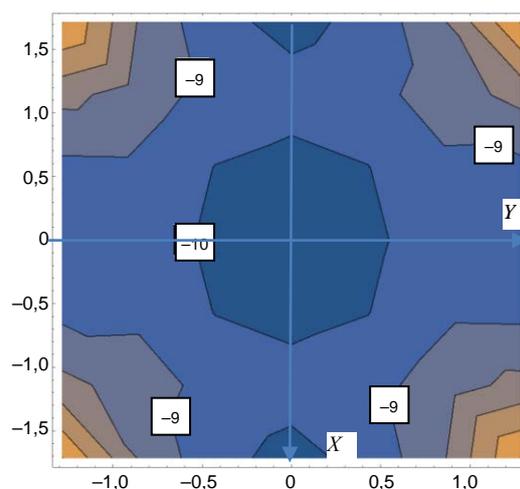


Рис. 4. Эпюры контактных напряжений, кПа (упругий расчет)

Fig. 4. Diagrams of contact voltages, kPa (elastic calculation)

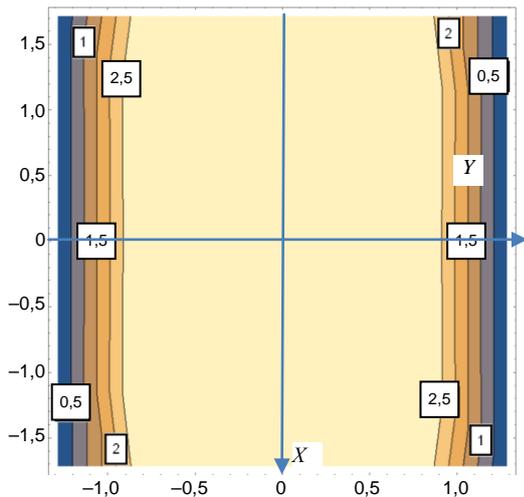


Рис. 5. Эпюры изгибающих моментов M_y , кН, железобетонной плиты (упругий расчет)

Fig. 5. Diagrams of bending moments M_y , кН, of reinforced concrete slab (elastic calculation)

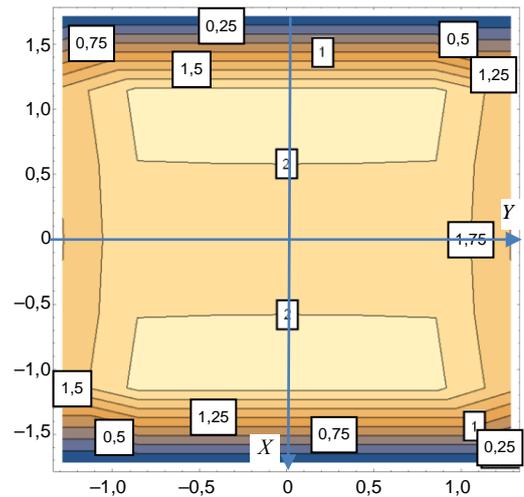


Рис. 6. Эпюры изгибающих моментов M_x , кН, железобетонной плиты (упругий расчет)

Fig. 6. Diagrams of bending moments M_x , кН, of reinforced concrete slab (elastic calculation)

Нелинейный расчет

На рис. 7, 8 приведены результаты нелинейного расчета (3-я итерация): эпюры осадок дорожной железобетонной плиты и контактных напряжений. Наибольшие значения при упругом расчете получены в центре тяжести плиты, где приложена сосредоточенная сила от колеса машины: осадки плиты $w_{max} = 0,0012582$ м; контактные напряжения $P_{max} = 10,43$ кПа.

На рис. 9, 10 построены эпюры изгибающих моментов M_y , M_x (3-я итерация) в изолиниях,

которые почти симметричны относительно осей изгиба.

Сопоставление результатов упругого и нелинейного расчетов (3-я итерация) проводилось для осадок ортотропной плиты и контактных напряжений в зоне взаимодействия плиты с упругим основанием. На рис. 11 показано графическое сравнение эпюр осадок железобетонной плиты между упругим и нелинейным решением (3-я итерация), которое свидетельствует о практически полном совпадении результатов при незначительном их увеличении с учетом переменной кривизны и жесткости.

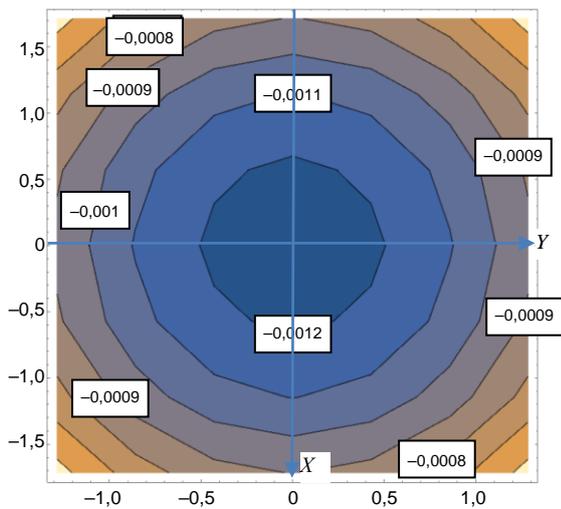


Рис. 7. Эпюры осадок, м, дорожной железобетонной плиты (3-я итерация)

Fig. 7. Diagrams of precipitation, m, of road reinforced concrete slab (3rd iteration)

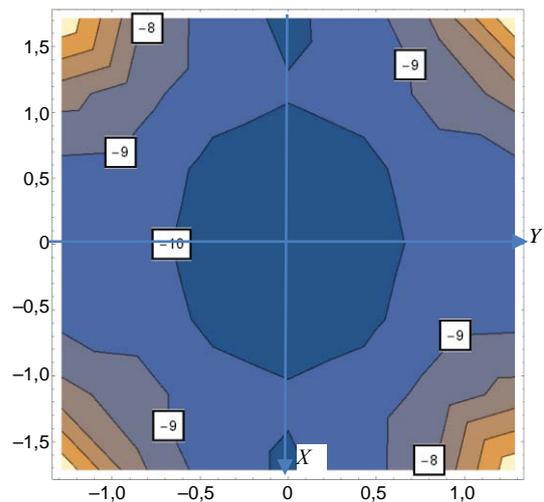


Рис. 8. Эпюры контактных напряжений, кПа (3-я итерация)

Fig. 8. Diagrams of contact voltages, кПа (3rd iteration)

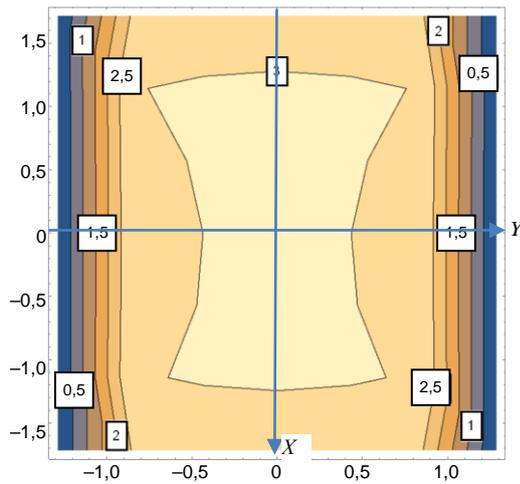


Рис. 9. Эпюры изгибающих моментов железобетонной плиты M_y , кН (3-я итерация)

Fig. 9. Diagrams of bending moments of reinforced concrete slab M_y , kN (3rd iteration)

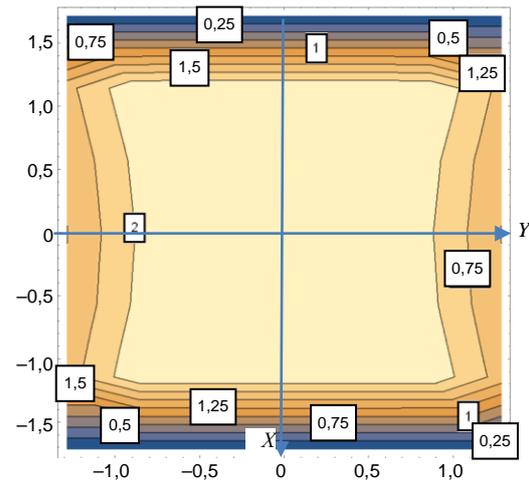


Рис. 10. Эпюры моментов железобетонной плиты M_x , кН (3-я итерация)

Fig. 10. Diagrams of moments of reinforced concrete slab M_x , kN (3rd iteration)

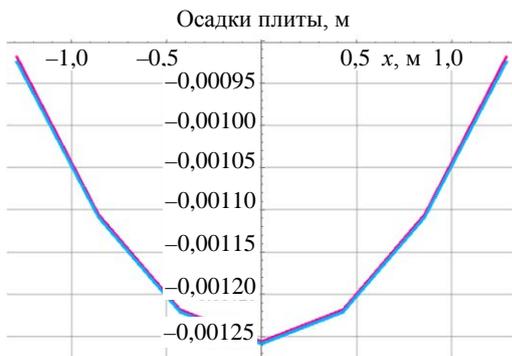


Рис. 11. Осадки дорожной железобетонной плиты: красный цвет – упругое решение; синий цвет – 3-я итерация

Fig. 11. Precipitation of road reinforced concrete slab: red color – elastic solution; blue color – 3rd iteration

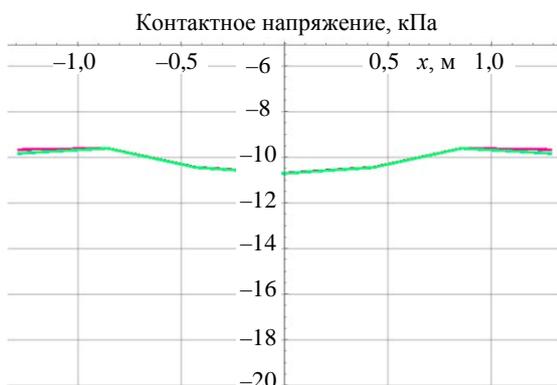


Рис. 12. Контактные напряжения: красный цвет – упругое решение; зеленый цвет – 3-я итерация

Fig. 12. Contact stresses: red color – elastic solution; green color – 3rd iteration

На рис. 12 приведено графическое сравнение эпюр контактных напряжений в зоне взаимодействия между упругим и нелинейным решением (3-я итерация), которое свидетельствует о практически полном совпадении результатов в центре плиты и небольшом (до 3 %) расхождении к краям плиты при учете переменной кривизны и жесткости.

ВЫВОДЫ

1. Предложена в теоретическом развитии и апробирована численно методика нелинейного итерационного расчета методом Б. Н. Жемочкина железобетонной (гибкой) ортотропной плиты на упругом основании, моделируемом упругим слоем конечной толщины. В отличие от традиционных подходов в нелинейных расчетах, основанных на применении зависимости «момент – кривизна», автор статьи использовала зависимость «жесткость – кривизна», что сокращает объем вычислений. Исследования проводились в компьютерной программе Wolfram Mathematica 11.3. Впервые предложено представление прогибов плиты с заземленной нормалью в основной системе смешанного метода от действия сосредоточенной силы определять методом Рунге в виде степенного полинома в новом оригинальном выражении.

2. Проведенный анализ показал, что учитывать нелинейные свойства железобетона через

переменную кривизну гибкой плиты в каждом направлении возможно, и такой учет целесообразен и существен в зоне активного трещинообразования при больших остаточных деформациях (например, при увеличении эксплуатационной нагрузки на дорожные или фундаментные плиты на порядок), а также при моделировании упругого основания с учетом его податливости и слоистости (через комбинированные модели, например вместо однородных). Таким образом, изучаемая отрасль исследований нелинейных задач требует дальнейшей разработки в плане как формирования общей методики решения данного вида задач, так и создания численных методов расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козунова, О. В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 1: Теория расчета / О. В. Козунова // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 3. С. 211–221. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-3-211-221>.
2. Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности / А. В. Александров, В. Д. Потапов. 2-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2002. 400 с.
3. Ржаницын, Р. А. Строительная механика / Р. А. Ржаницын. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.
4. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчетов фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицын. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Госстройиздат, 1962. 240 с.
5. Соломин, В. И. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций / В. И. Соломин, С. Б. Шматков. М.: Стройиздат, 1986. 208 с.
6. Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. Минск: БНТУ, 2002. 128 с.
7. Босаков, С. В. Метод Ритца в контактных задачах теории упругости / С. В. Босаков. Брест: БрГТУ, 2006. 107 с.
8. Свод правил по проектированию и строительству. Железобетонные монолитные конструкции зданий: СП 52-103-2007. М.: НИЦ «Строительство» – НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, 2007. 22 с.
9. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: СП 63.13330.2018. М.: НИЦ «Строительство» – НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, 2018. 168 с.
10. Методическое пособие. Плоские безбалочные железобетонные перекрытия. Правила проектирования. М.: НИЦ «Строительство» – НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, 2017. 158 с.
11. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 680 с.

Поступила 21.12.2021

Подписана в печать 28.02.2022

Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. Kozunova O. V. (2022) Improvement of Calculation Technique for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base. Part 1: Calculation Theory. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (3), 211–221. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-3-211-221> (in Russian).
2. Alexandrov A. V., Potapov V. D. (2002) *Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
3. Rzhantsyn R. A. (1991) *Structural Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 439 (in Russian).
4. Zhemochkin B. N., Sinitsyn A. P. (1962) *Practical Methods for Calculating Foundation Beams and Slabs on an Elastic Foundation*. 2nd ed. Moscow, Gosstroizdat Publ. 240 (in Russian).
5. Solomin V. I., Shmatkov S. B. (1986) *Calculation Methods and Optimal Design of Reinforced Concrete Foundation Structures*. Moscow, Gosstroizdat Publ. 208 (in Russian).
6. Bosakov S. V. (2002) *Static Calculations of Slabs on an Elastic Foundation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 128 (in Russian).
7. Bosakov S. V. (2006) *The Ritz Method in Contact Problems of Elasticity Theory*. Brest, Brest State Technical University. 107 (in Russian).
8. SP [Construction Rules 52-103-2007]. *Code of Practice for Design and Construction. Reinforced Concrete Monolithic Structures of Buildings*. Moscow, Research and Development Center “Construction” – Scientific Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A. A. Gvozdev, 2007. 22 (in Russian).
9. SP [Construction Rules] 63.13330.2018. *Code of Practice. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions*. Moscow, Research and Development Center “Construction” – Scientific Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A. A. Gvozdev, 2018. 168 (in Russian).
10. *Guidance Manual. Flat Beamless Reinforced Concrete Floors. Design Rules*. Moscow, Research and Development Center “Construction” – Scientific Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A. A. Gvozdev, 2017. 158 (in Russian).
11. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on an Elastic Foundation*. 3rd ed. Moscow, Stroizdat Publ. 680 (in Russian).

Received: 21.12.2021

Accepted: 28.02.2022

Published online: 29.07.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-297-313>

УДК 697.9

Термодинамические режимы рекуперативного теплообменника-утилизатора в приточно-вытяжной вентиляционной установке малой производительности

Магистр В. А. Зафатаев¹⁾, канд. техн. наук, доц. Т. И. Королёва¹⁾

¹⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Нарастание уровня тепловой защиты ограждающих конструкций существующих зданий, обусловленное необходимостью соблюдения требований действующих норм строительной теплотехники, приводит к увеличению доли тепловых потерь за счет инфильтрации и работы вытяжной вентиляции в тепловом балансе здания. После исчерпания возможностей реализации технических мероприятий для уменьшения энергозатрат за счет изменения объемно-планировочных решений и утепления ограждающих конструкций зданий дальнейшее снижение уровня теплопотребления должно быть связано с применением потенциала вторичных и возобновляемых ресурсов. В статье приведены результаты оценки технико-экономической целесообразности использования теплового потенциала удаляемого воздуха для нагрева приточного воздуха в системе принудительной приточно-вытяжной вентиляции здания на примере установки малой производительности. Для противоточного воздушно-воздушного теплоутилизатора рекуперативного типа с оребрением тепловых трубок в виде множества сплошных листов установлено влияние изменений физических свойств удаляемого воздуха при фазовом переходе водяного пара, содержащегося в нем, в жидкое состояние на тепловую производительность теплоутилизатора и характеристики его эффективности. Определены условия теплообмена (без выпадения конденсата, с выпадением конденсата в части теплоутилизатора, с выпадением конденсата во всем теплоутилизаторе и с опасностью обледенения) в диапазоне температур приточного воздуха $(-26)–(+8)$ °С для трех вариантов его работы – при балансе номинального количества удаляемого и приточного воздуха и при двух вариантах дисбаланса. Варианты с дисбалансами исследованы в целях поиска возможных сочетаний температур приточного и удаляемого воздуха, при которых во всем объеме теплоутилизатора не происходило бы фазового перехода водяного пара в потоке удаляемого воздуха в жидкое состояние, что исключило бы необходимость проведения мероприятий по сбору и отводу конденсата и предотвращению его замерзания.

Ключевые слова: утилизация теплоты, воздушный баланс, дисбаланс, конденсация, теплопередача, оребрение, энергоэффективность

Для цитирования: Зафатаев, В. А. Термодинамические режимы рекуперативного теплообменника-утилизатора в приточно-вытяжной вентиляционной установке малой производительности / В. А. Зафатаев, Т. И. Королёва // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 297–313. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-297-313>

Recuperative Heat Exchanger-Utilizer Thermodynamic Modes in Low Capacity Supply-and-Exhaust Ventilation Unit

V. A. Zafatayeu¹⁾, T. I. Karaliova¹⁾

¹⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. The increase in the thermal protection level of the existing buildings enclosing structures, due to the need to comply with the current norms of building heat engineering requirements, leads to increasing in the part of heat losses in the

Адрес для переписки
Королёва Татьяна Ивановна
Полоцкий государственный университет
ул. Блохина, 29,
211440, г. Новополоцк, Республика Беларусь
Тел.: +375 214 599-540
t.i.koroleva@psu.by

Address for correspondence
Karaliova Tatsiana I.
Polotsk State University
29, Blokhin str.,
211440, Novopolotsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 214 599-540
t.i.koroleva@psu.by

thermal balance of a building due to infiltration and exhaust ventilation operation. After exhaustion of the possibilities for the implementation of technical measures to reduce energy costs by changing in volumetric planning solutions and insulating building envelopes further decreasing heat consumption level should be associated with the use of the secondary and renewable resources potential. The paper presents the results of assessing the technical and economic feasibility of using the exhaust air thermal potential for heating the supply air in the forced supply-and-exhaust ventilation system of a building taking as a low-capacity unit as an example. For a counterflow air-to-air recuperative type heat utilizer finned with ribbed heat pipes in the form of a plurality of continuous sheets, the influence of changes in the physical properties of the exhaust air during the phase transition of the water vapor contained in it into a liquid state on the heat exchanger-utilizer performance and characteristics of its efficiency has been established. The conditions of heat exchange are determined (without condensate, with condensate in the part of the heat exchanger-utilizer, with condensate in the entire heat exchanger-utilizer and with the risk of icing) in the supply air temperature range from (-26) to $(+8)$ °C for three variants of its operation with a balance of the nominal amount of exhaust and supply air and with two variants of imbalance. Variants with imbalances have been investigated in order to find possible combinations of supply and exhaust air temperatures, at which there would be no phase transition of water vapor in the exhaust air flow to the liquid state in the entire volume of the heat utilizer, which would eliminate the need for measures to collect and remove condensate and preventing it from freezing.

Keywords: heat recovery, air balance, imbalance, condensation, heat transfer, fins, energy efficiency

For citation: Zafatayeu V. A., Karaliova T. I. (2022) Recuperative Heat Exchanger-Utilizer Thermodynamic Modes in Low Capacity Supply-and-Exhaust Ventilation Unit. *Science and Technique*. 21 (4), 297–313. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-297-313> (in Russian)

Введение

Система централизованного энергоснабжения в виде цепочки «источник – распределительная сеть – потребитель» характеризуется низким уровнем эксергии энергоносителя в звене потребителя согласно технологии его использования и соответственно большими потерями эксергии по пути преобразований [1–5]. Чем большее количество ступеней в процессе преобразования энергии имеется в системе, тем меньше ее эксергетический КПД. Это в полной мере относится и к системе централизованного теплоснабжения зданий, которая предназначена для обеспечения нужд отопления, горячего водоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха. Использование высокого теплового потенциала централизованного источника на отопительно-вентиляционные нужды зданий с точки зрения эксергетического анализа нельзя назвать эффективным по причине низкого требуемого уровня теплового потенциала теплоносителя на стороне потребителя. Для этих целей предпочтительнее применение энергии источников невысокого потенциала, например за счет рекуперации теплового потенциала сброшенного продукта – осуществление нагрева приточного воздуха для нужд воздушного отопления и вентиляции за счет теплоты удаляемого системами вытяжной вентиляции воздуха. Полезно использовать тепловой потенциал удаляемого воздуха в теплоутилизаторах различных конструкций.

Аналитический обзор теплоутилизационных установок для рекуперации теплоты вентиляционных выбросов приводится в [6–9]. В настоящее время широко применяются регенеративные, рекуперативные пластинчатые теплообменники и теплоутилизаторы на основе тепловых трубок.

Регенеративные теплоутилизаторы обладают существенным недостатком – вероятностью смешивания определенной части удаляемого воздуха с приточным в корпусе аппарата в результате перетока части удаляемого воздуха к приточному, что, в свою очередь, может привести к переносу неприятных запахов и болезнетворных бактерий. Также следует учесть затраты энергии для работы двигателя, вращающего теплоаккумулирующую насадку.

Пластинчатый теплообменник – одно из самых конструктивно простых и дешевых решений для рекуперации теплоты, – хотя и имеет меньшую тепловую эффективность, чем роторный регенератор [8], при этом характеризуется высоким показателем отношения площади поверхности теплообмена к массе теплообменника, небольшим аэродинамическим сопротивлением, длительным сроком службы [9].

Концепция теплообмена с помощью тепловых трубок впервые предложена в 1940-е гг. R. S. Gaugler [10], позже развита L. Trefenten [11], G. M. Grover [12], получила распространение в 1960–1980-е гг. [13–16]. В настоящее время ее продолжают использовать при решении задач переноса теплоты во многих видах производственных процессов [17–21]. Опыт эксплуа-

тации подобного рода теплообменников показывает, что эффективность переноса теплоты в них из зоны испарения в зону конденсации достаточно высокая – более 90 % [22].

Постановка задач

Основными задачами исследования являлись определение технико-экономической целесообразности использования теплового потенциала удаляемого воздуха для нагрева приточного воздуха на примере воздухо-воздушного теплоутилизатора рекуперативного типа, входящего в состав оборудования приточно-вытяжной вентиляционной установки малой производительности, а также разработка научно обоснованных рекомендаций для его эффективной эксплуатации в климатических условиях Республики Беларусь. Такие вентиляционные установки применяются для обеспечения воздухообмена в малоэтажных и частных жилых домах, отдельных квартирах и изолированных помещениях иного назначения, группах небольших помещений общественного и административного назначения и т. п. Использование приточно-вытяжных установок с включением в них аппаратов для утилизации теплоты выбросного (удаляемого) воздуха на нагрев приточного наружного воздуха – единственный энергетически, экономически и социально оправданный метод значительного сокращения расхода тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции помещений в зданиях различного назначения [23].

Предметная область исследования включала процессы тепло- и влагообмена, происходящие в воздухо-воздушных теплоутилизаторах рекуперативного типа, входящих в состав оборудования систем приточно-вытяжной вентиляции, а также изучение закономерностей изменений температурно-влажностных характеристик потоков удаляемого и приточного воздуха в пределах их поверхности теплообмена.

Методика исследования

Величина тепловой производительности воздухо-воздушных теплоутилизаторов в системах приточно-вытяжной вентиляции является частью расчетного расхода тепловой энергии на отопительно-вентиляционные нужды здания.

Относительно просто можно установить зависимость теплопроизводительности теплообменного аппарата от физических параметров однофазных потоков теплоносителей, но в случае воздухо-воздушных теплоутилизаторов имеют место фазовые превращения воды и водяного пара в потоке удаляемого воздуха. В процессе подогрева и охлаждения воздуха в теплообменнике рекуперативного типа его влагосодержание и парциальное давление водяных паров останутся неизменными, однако при достижении охлаждаемым воздухом температуры точки росы и дальнейшем охлаждении в потоке начнет выделяться скрытая теплота парообразования. Без учета потерь в окружающую среду в теплообменнике будет соблюдаться баланс между теплотой (с учетом скрытой теплоты парообразования), передаваемой охлаждаемым воздухом, и теплотой, воспринимаемой подогреваемым воздухом. Поэтому в отдельных частях теплообменника теплопередача будет характеризоваться разными тепловлажностными условиями. Следовательно, в поверочных тепловых расчетах таких теплообменников важно учитывать изменение физических свойств теплоносителей при их фазовых превращениях. В данной статье такой расчет проведен для противоточного воздухо-воздушного теплоутилизатора рекуперативного типа с оребрением пучка тепловых трубок в виде множества сплошных листов, входящего в состав агрегата вентиляционного теплоутилизационного (АВТУ) (рис. 1–3). Достоинствами тепловой трубки, используемой в качестве теплопередающего элемента, являются долговечность, простота в обслуживании, бесшумность в работе и малое термическое сопротивление [6].

Установленный вертикально пучок тепловых трубок разделен на две функциональные зоны: зону испарения и зону конденсации. Воздух, теплота которого утилизируется, проходит снизу в зоне испарения, подогреваемый воздух – сверху в зоне конденсации.

Установка АВТУ комплектуется радиальными вентиляторами с асинхронными двигателями с внешним ротором, что обеспечивает равномерное поле скоростей в каналах перед теплоутилизатором. Регулирование расхода воздуха трехступенчатое. Паспортная производительность опытной установки по воздуху $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ [24].

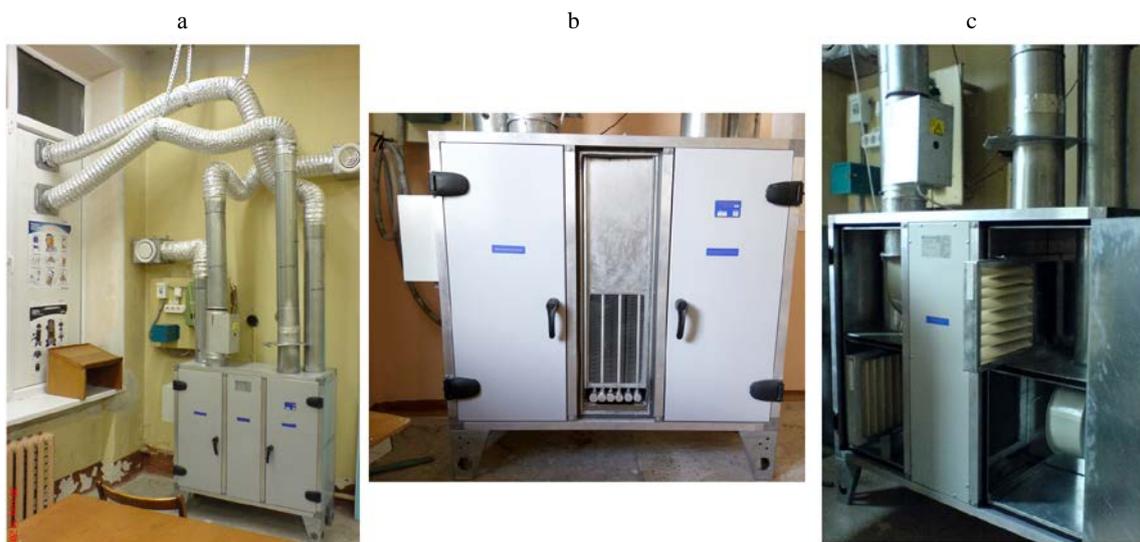


Рис. 1. Установка агрегата вентиляционного теплоутилизационного: а – общий вид; б – фронтальный вид со снятой панелью; с – вид с открытыми дверцами секций

Fig. 1. Heat recovery installation unit: a – general view; б – front view with the panel removed; с – view with open section doors

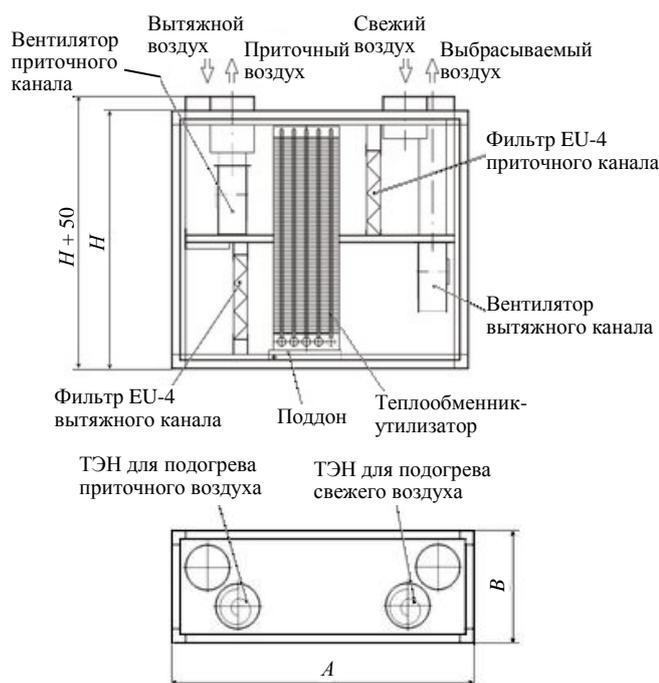


Рис. 2. Схема установки агрегата вентиляционного теплоутилизационного
Fig. 2. Circuit of heat recovery installation unit

Характеристики исследованного теплоутилизатора: материал трубок и оребрения – алюминий; размеры фронтального сечения полезного пространства теплоутилизатора $A_{\text{фронт}} = 270$ мм, $B_{\text{фронт}} = 350$ мм, $H = 180$ мм; наружный диаметр трубок $d_0 = 12,6$ мм; толщина пластин $\Delta = 0,2$ мм; шаг установки пластин $S = 2,6$ мм; поперечный $S_1 = 33,4$ мм и продольный $S_2 = 29$ мм шага трубок; расстояние от края пластины оребрения до лобовой точки ближайшей по ходу воздуха трубки $h_1 = 8$ мм. Объем теплоутилизатора по габаритам $A_{\text{фронт}}$, $B_{\text{фронт}}$, H составлял $0,0170$ м³, объем свободного сечения $0,0137$ м³.

тин $\Delta = 0,2$ мм; шаг установки пластин $S = 2,6$ мм; поперечный $S_1 = 33,4$ мм и продольный $S_2 = 29$ мм шага трубок; расстояние от края пластины оребрения до лобовой точки ближайшей по ходу воздуха трубки $h_1 = 8$ мм. Объем теплоутилизатора по габаритам $A_{\text{фронт}}$, $B_{\text{фронт}}$, H составлял $0,0170$ м³, объем свободного сечения $0,0137$ м³.

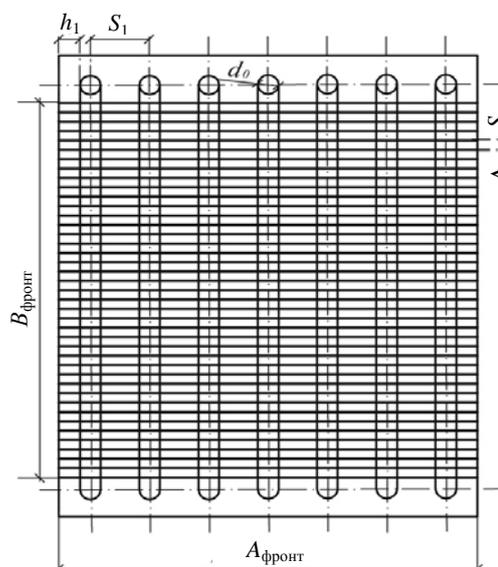


Рис. 3. Фронтальный вид пучка трубок теплоутилизатора в установке агрегата вентиляционного теплоутилизационного
Fig. 3. Front view of heat exchanger bunch of tubes in the heat recovery installation unit

Процессы тепло- и влагообмена, происходящие в воздушно-воздушных теплообменниках рекуперативного типа, применяемых в системах вентиляции зданий, исследовались авторами [8, 23–27] и др. Результаты и выводы перечисленных работ распространяются на типовые конструкции теплообменников рекуперативного и регенеративного типов с учетом особенностей и назначения объектов, на которых эти теплообменники применяются. Для теплоутилизатора в составе установки АВТУ процессы тепло- и влагообмена исследовались с помощью разработанного авторами численного метода технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа, который позволяет анализировать параметры режимов эксплуатации при теплообмене без выпадения и с выпадением конденсата в одном из теплоносителей, определять комплекс обобщенных и локальных показателей термодинамической и экономической эффективности эксплуатации.

При физико-математическом описании тепло- и влагообмена в исследуемом теплоутилизаторе было отдано предпочтение модели переноса [25], в которой течение воздуха рассматривается как поток жидкости с постоянной по его сечению скоростью. Математическая модель тепло- и влагообмена получена на основании известных законов первого начала термодинамики и Ньютона – Рихмана, что является свидетельством ее достоверности.

Произведен зональный тепловой расчет теплоутилизатора с определением температур удаляемого (индексы у физических параметров «1») и приточного (индексы «2») воздуха по площади поверхности теплообмена. Температуры усреднены в шести функциональных объемах (по количеству поперечных потоков рядов трубок). Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи усреднялись отдельно для зон без выпадения и с выпадением конденсата. Определены условия теплообмена в диапазоне температур приточного воздуха (-26) – $(+8)$ °С для трех вариантов работы установки АВТУ, $\text{м}^3/\text{ч}$: при балансе номинального количества удаляемого и приточного воздуха $L_1 = L_2 = 500$; при дисбалансе $L_1 = 500, L_2 = 0,67L_1$; при дисбалансе $L_1 = 500, L_2 = 0,33L_1$. Последние два варианта

исследованы в целях поиска возможных сочетаний температур приточного и удаляемого воздуха, при которых во всем объеме теплоутилизатора не происходило бы фазового перехода водяного пара в потоке удаляемого воздуха в жидкое состояние, что исключает необходимость сбора и отвода конденсата и проведение мероприятий по предотвращению его замерзания.

Основную сложность в тепловом расчете теплообменника с фазовыми превращениями в потоке теплоносителя представляют неизвестные температуры на границе раздела фаз t_{ctf} «удаляемый воздух – конденсат», температура поверхности теплообмена со стороны канала удаляемого воздуха t_{w1} и температура со стороны приточного воздуха t_{w2} , которые, кроме всего прочего, необходимо определять для каждого функционального объема теплообменника, где параметры, характеризующие теплопередачу, приняты сосредоточенными (постоянными). Здесь и далее функциональные объемы теплообменника названы интервалами для возможности применения понятия «интервал» к другим конструкциям теплообменных поверхностей.

Расчет определяющих температур удаляемого t_{1i} и приточного t_{2i} воздуха в каждом i -м интервале теплообменника с учетом скрытой теплоты конденсации в потоке удаляемого воздуха возможно произвести расчетно-графическим способом по методике, предложенной в [28, 29], или использовать для этого расчетный метод последовательных приближений температур t_{ctf}, t_{w1}, t_{w2} путем перебора их вручную для увязки теплового баланса между потоками удаляемого и приточного воздуха. При этом необходимо соблюсти условие неравенства температур $t_1 > t_{ctf} > t_{w1} > t_{w2} > t_2$. Последний из указанных методов опробован в процессе проведения теплового поверочного расчета конденсационного теплоутилизатора типа ТК производства Витебского коммунального производственного унитарного предприятия котельных и тепловых сетей «ВПКИТС», в результате чего для четырех режимов нагрузки котлоагрегата КВ-РМ-2,5 определены конечные температуры дымовых газов t_1'' и воды t_2'' с отклонением от данных режимной карты $\pm 0,3$ °С [30].

Зону начала выпадения конденсата в канале удаляемого воздуха определяли путем сравнения температур удаляемого воздуха на входе t'_{li} и выходе t''_{li} i -го интервала с температурой точки росы удаляемого воздуха t_{p1} , если:

а) $t'_{li} > t''_{li} > t_{p1}$ – в объеме i -го интервала происходит теплообмен без выпадения конденсата;

б) $t'_{li} > t_{p1} > t''_{li}$ – в объеме i -го интервала теплообменника происходит частично теплообмен с выпадением конденсата;

в) $t'_{li} = t_{p1} \geq t_{w1}$ – во всем объеме канала удаляемого воздуха (т. е. не только в первом интервале) происходит выпадение конденсата.

Интенсивность теплоотдачи при конденсации водяного пара во влажном воздухе, Вт/(м²·°C), определяется суммой коэффициентов теплоотдачи конвекцией от воздуха к пленке конденсата $\alpha_{кв}$ и теплоотдачи при конденсации пара $\alpha_{кс}$ [31]

$$\alpha_{вл} = \alpha_{кв} + \alpha_{кс} = \alpha_{кв} + \frac{\beta_p [r + (i - i_p)] (p_n - p_{ctf})}{t_1 - t_{ctf}}, \quad (1)$$

где β_p – коэффициент массоотдачи, кг/(м²·с·Па) [31]; r – теплота парообразования, Дж/кг, определяется по температуре t_{ctf} на границе раздела фаз; i – энтальпия перегретого пара во влажном воздухе, Дж/кг; i_p – энтальпия пара в состоянии насыщения при давлении p в потоке влажного воздуха, Дж/кг; p_n – давление насыщения пара при температуре удаляемого воздуха t_1 , Па; p_{ctf} – парциальное давление пара при температуре t_{ctf} .

Для каналов теплоутилизаторов, образованных множеством сплошных плоских листов обрешетки труб, коэффициент теплоотдачи [32]

$$\alpha_{кв.i} = 3,51 \frac{w_i^{0,8}}{d_r^{0,2}}, \quad (2)$$

где « i » – индекс, соответствующий рассматриваемому интервалу теплоутилизатора; w_i – скорость потока воздуха в теплоутилизаторе, м/с; d_r – гидравлический диаметр проходного сечения теплоутилизатора, м.

Расчет температур удаляемого t''_{li} и приточного t''_{2i} воздуха на выходе из теплоутилизатора

(и его интервалов) осуществляли по известной площади поверхности теплообмена F , водяным эквивалентам теплоносителей $W = Gc_p$ и коэффициентам теплопередачи k_i (в первом и втором приближении, не считая итерации с перебором температур t_{ctf} , t_{w1} , t_{w2}) по формулам [33]:

$$t''_{li} = t'_1 - (t'_1 - t'_2) \times \frac{1 - \exp \left[-\frac{k_i F_x}{c_{p1} G_1} \left(1 - \frac{c_{p1} G_1}{c_{p2} G_2} \right) \right]}{1 - \frac{c_{p1} G_1}{c_{p2} G_2} \exp \left[-\frac{k_i F_x}{c_{p1} G_1} \left(1 - \frac{c_{p1} G_1}{c_{p2} G_2} \right) \right]}, \quad (3)$$

$$t''_{2i} = t'_2 + (t'_1 - t'_2) \frac{c_{p1} G_1}{c_{p2} G_2} \times \frac{1 - \exp \left[-\frac{k_i F_x}{c_{p1} G_1} \left(1 - \frac{c_{p1} G_1}{c_{p2} G_2} \right) \right]}{1 - \frac{c_{p1} G_1}{c_{p2} G_2} \exp \left[-\frac{k_i F_x}{c_{p1} G_1} \left(1 - \frac{c_{p1} G_1}{c_{p2} G_2} \right) \right]}, \quad (4)$$

где « i » – индекс, обозначающий интервал теплоутилизатора; F_x – площадь поверхности теплообмена по тракту одного из теплоносителей, считая от входной точки, м²; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; c_p – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°C); k – коэффициент теплопередачи по тракту одного из теплоносителей (осредненный по площади F или взятый для одного из интервалов теплоутилизатора), Вт/(м²·°C).

Формулы (3), (4) справедливы для противоточной схемы теплообмена.

Поверочный тепловой расчет теплоутилизатора считается завершенным, т. е. определены средние температуры воздуха в его интервалах, средние коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, а также теплопроизводительность, если установлено равенство левой и правой частей в двух балансовых уравнениях [31] с невязкой не более заданной величины в 5 % для каждого интервала и для теплоутилизатора в целом:

$$\varepsilon \left[\alpha_{кв} (t_1 - t_{ctf}) + \beta_p r (p_n(t_1) - p_n(t_{ctf})) \right] =$$

$$= \frac{t_{ctf} - t_2}{\frac{1}{\alpha_{kc}} \frac{F_{то}}{F_{внутр}} + \left(\sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right) \frac{F_{то}}{F_{внутр}} + \frac{1}{\alpha_2}}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{t_{ctf} - t_2}{\frac{1}{\alpha_{kc}} \frac{F_{то}}{F_{внутр}} + \left(\sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right) \frac{F_{то}}{F_{внутр}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \\ & = \frac{t_{w1} - t_2}{\left(\sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} \right) \frac{F_{то}}{F_{внутр}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6) \end{aligned}$$

где ε – коэффициент эффективности переноса теплоты из зоны испарения в зону конденсации; $F_{то}$, $F_{внутр}$ – площадь поверхности теплообмена в каналах приточного и удаляемого воздуха соответственно, m^2 (для рассматриваемого теплоутилизатора $F_{то} = F_{внутр}$); $\sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j}$ –

сумма сопротивлений теплопроводности j -х слоев теплопередающей стенки, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ (не учитывали в расчете); α_2 – коэффициент теплоотдачи в канале приточного воздуха, $Вт / (m^2 \cdot ^\circ C)$.

Поверочный тепловой расчет теплоутилизатора реализован в СУБД MS Excel и фактически сводится к вводу исходных данных (обмерочных характеристик теплоутилизатора, указанных ранее, начальных температур удаляемого t'_1 и приточного t'_2 воздуха, начальной относительной влажности ϕ'_1 удаляемого воздуха, давления p в потоке воздуха, объемных расходов удаляемого L_1 и приточного L_2 воздуха, количества часов стояния температур наружного воздуха) и перебора вручную температур t_{ctf} , t_{w1} , t_{w2} . Для удобства ведения расчетов, которые предполагают необходимость последовательных приближений искомых величин, физические параметры сухого воздуха, воды и водяного пара аппроксимированы в виде аналитических зависимостей [34]. В дополнение к результатам поверочного расчета получены величины, характеризующие эффективность использования теплоты в теплоутилизаторе.

Задача разработки логически обоснованной методики определения эксергетического КПД η_e ,

пригодной для любых систем преобразования энергии, решалась постепенно [2, 3]. В конечном счете сформулированы общие подходы в его определении. Первый основан на нахождении величины отношения суммарных потоков эксергии на выходе системы к эксергии на входе [35, 36]. Предельное значение $\eta_e = 1$ для обратимого процесса, а разность между знаменателем и числителем равна потере эксергии от необратимости. Однако этот КПД не отражает эффективности процесса с точки зрения его целевого назначения. Примером может служить теплообменник, в котором на месте теплопроводной стенки установлена адиабатная перегородка, и теплота вообще не передается. Тогда можно считать, что эксергия горячего потока на входе в теплообменник равна его эксергии на выходе. То же можно сказать и о холодном потоке. Нетрудно видеть, что в этом случае $\eta_e = 1$, и здесь нет ошибки, так как процесс идеален – потерь не имеется. Другими словами, формально корректно составленный КПД не дает правильной информации о том, насколько эффективно данный теплообменник выполняет свое назначение. В этом случае применяется другой подход – разностный. Можно рассмотреть отношение возрастания получаемой эксергии (полезный прирост) к уменьшению расходуемой эксергии (затраты). Однако в одном и том же процессе в качестве полезных эффектов и затрат могут пониматься разные аспекты. Например, при расчете химической составляющей эксергии дымовых газов под полезным эффектом понимается прирост эксергии, связанный в одних случаях с возрастанием объемных концентраций продуктов сгорания, а в других – с увеличением их парциальных давлений. Тем не менее в статье использован второй подход к определению эксергетического КПД как более универсальный.

Для теплообменника рекуперативного типа с выпадением конденсата на стороне одного из теплоносителей показатели эффективности должны рассчитываться с учетом фазовых превращений. Термин «эксергетический КПД» для теплоутилизатора нивелируется, поскольку технически задача снижения потерь эксергии удаляемого воздуха («топлива» по [37]) не имеет смысла, и можно говорить лишь о контроли-

руемом отношении прироста эксергии подогреваемого приточного воздуха («продукта» [37]) к имеющемуся падению теплового потенциала («запаса эксергии» [37]) удаляемого воздуха при заданной температуре окружающей среды [38].

Для противоточного или перекрестноточного теплообменника уравнение эксергетического КПД Грассмана [2] имеет вид

$$\eta_e = \frac{e_2'' - e_2'}{e_1' \frac{G_1}{G_2} - e_2'} \quad (7)$$

где e – удельная эксергия потока, Дж/кг, при его текущей температуре t относительно температуры окружающей среды t_0 (верхний индекс «'» относится к параметрам потока на входе в интервал или теплообменник в целом, «''» – к параметрам потока на выходе из интервала или теплообменника в целом); G_1 , G_2 – массовый расход удаляемого и приточного воздуха соответственно, кг/с.

В знаменателе формулы (7) стоит тепловой потенциал потока удаляемого воздуха для идеального теплообменника (с бесконечной поверхностью теплообмена), где выходные параметры удаляемого воздуха теоретически становятся равными параметрам приточного воздуха на входе.

При малых парциальных давлениях водяного пара во влажном воздухе его свойства близки к свойствам идеального газа [3]. Таким образом, влажный воздух рассматривается как бинарная смесь идеальных газов. Эксергия влажного воздуха в потоке соответствует его термомеханической составляющей с исключением из рассмотрения химической составляющей, поскольку химический потенциал влажного воздуха в потоке и в окружающей среде считается одинаковым [2]. Не учтена также внешняя кинетическая и потенциальная составляющие эксергии потока: первая – по причине усреднения скорости воздушных потоков по поперечному сечению теплоутилизатора, вторая – по причине неизменности положения в пространстве теплоутилизатора потоков удаляемого и приточного воздуха.

Температура приточного воздуха на входе в теплоутилизатор t_1' принята равной температу-

ре окружающей среды t_0 . Тогда удельная термомеханическая эксергия приточного воздуха на входе в теплоутилизатор e_2' равна нулю, и формула эксергетического КПД для контрольной поверхности теплоутилизатора принимает вид

$$\eta_e = \frac{G_2 (e_2'' - e_2')}{G_1 e_1'} \quad (8)$$

Удельная термомеханическая эксергия, Дж/кг, влажного воздуха при температуре t определяется по формуле Т. Бэса [39, 40]

$$e_b = (i_b - i_{b0}) - T_0 \left[c_p \ln \frac{T_b}{T_{b0}} - R_b \ln \frac{p(t) - \Phi p_n}{p_0(t_0) - \Phi_0 p_{n0}} \right] + d \left[(i_n - i_{n0}) - T_0 c_p \ln \frac{T_n}{T_{n0}} \right] \quad (9)$$

где «0» – индекс у параметров влажного воздуха при температуре окружающей среды t_0 ; «п», «н», «в» – индексы у параметров водяного пара, на линии насыщения и влажного воздуха соответственно; d – влагосодержание, подставляется в кг вл. возд./кг сух. возд.; T – абсолютная температура, К.

Энтальпия влажного ненасыщенного воздуха, кДж/кг, складывается из энтальпий сухого воздуха и пара [41]

$$i_b = i_{c.v} + di_n \quad (10)$$

или в раскрытом виде

$$i_b = c_{p.c.v} t + d \left[c_{p.p} (t - t_n) + c_{p.вод} t_n + r \right] \quad (11)$$

где $c_{p.c.v}$, $c_{p.p}$, $c_{p.вод}$ – удельная теплоемкость сухого воздуха, пара и воды соответственно, кДж/(кг·°С).

С учетом (11), принятых обозначений и условий изменения тепловлажностного состояния воздуха запишем выражения для определения энтальпий удаляемого и приточного воздуха на входе и выходе воздушного теплоутилизатора:

$$i_{b1}' = c_{p.c.v} t_1' + d_1' \left[c_{p.p} (t_1' - t_{n1}') + c_{p.вод} t_{n1}' + r \right] \quad (12)$$

$$i_{b1}'' = c_{p.c.v} t_1'' + d_1'' c_{p.вод} t_{n1}'' \quad (13)$$

$$i'_{в2} = c_{рс.в} t'_2 + d'_2 [c_{рп} (t'_2 - t'_{н2}) + c_{р\text{воды}} t'_{н2} + r]; \quad (14)$$

$$i''_{в2} = c_{рс.в} t''_2 + d'_2 [c_{рп} (t''_2 - t'_{н2}) + c_{р\text{воды}} t'_{н2} + r]. \quad (15)$$

Для более точного решения формула (13) должна содержать слагаемое, учитывающее энтальпию воды, однако фактическое содержание последней оценить невозможно. Выражения (12)–(15) записаны с учетом постоянства влагосодержания приточного воздуха и непостоянства энтальпии (и соответственно влагосодержания) удаляемого воздуха в процессе рекуперации теплоты.

Формулы для определения удельных термомеханических эксергий влажного воздуха, кДж/кг, будут иметь вид:

– для прироста удельной термомеханической эксергии приточного воздуха

$$e''_{в2} - e'_{в2} = (i''_2 - i'_2) - T'_2 \left[c_{рс.в} \ln \frac{T''_2}{T'_2} - R_{в} \ln \frac{p - \Phi''_2 p''_{н2}}{p - \Phi'_2 p'_{н2}} \right] + d_2 \left[1,86(t''_2 - t'_2) - T'_2 c_{р\text{воды}} \ln \frac{T''_2}{T'_2} \right]; \quad (16)$$

– для удельной термомеханической эксергии удаляемого воздуха на входе в теплоутилизатор

$$e'_{в1} = (i'_1 - i'_2) - T'_2 \left[c_{рс.в} \ln \frac{T'_1}{T'_2} - R_{в} \ln \frac{p - \Phi'_1 p'_{н1}}{p - \Phi'_2 p'_{н2}} \right] + d_1 \left[1,86(t'_1 - t'_2) - T'_2 c_{р\text{воды}} \ln \frac{T'_1}{T'_2} \right]. \quad (17)$$

Наряду с эксергетическим КПД, в качестве показателя эффективности теплоутилизатора используется энтальпийный коэффициент рекуперации [41] как отношение изменения энтальпии одного из потоков к тепловому потенциалу другого потока, а также температурный коэффициент эффективности [30, 42], значение которого приводится производителем установки теплообменного аппарата в ее паспорте.

Энтальпийный коэффициент рекуперации по изменению энтальпии подогреваемого теплоносителя (приточного воздуха) рассчитывается по формуле

$$\eta_{i2} = \frac{i''_2 - i'_2}{i'_1 \frac{G_1}{G_2} - i'_2}. \quad (18)$$

Температурный коэффициент эффективности теплоутилизатора по подогреваемому теплоносителю (приточному воздуху)

$$\eta_{t2} = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t'_2}. \quad (19)$$

Результаты исследования

Для трех вариантов расхода приточного воздуха в установке АВТУ определены условия теплообмена (рис. 4) по каждому интервалу теплоутилизатора: без выпадения конденсата, с выпадением конденсата в части теплообменника, с выпадением конденсата во всем теплообменнике и с опасностью замерзания.

Эксплуатация установки с теплоутилизатором рекуперативного типа при соблюдении баланса объемных расходов удаляемого и приточного воздуха чревата обледенением и перекрытием проходного сечения тракта удаляемого воздуха при температурах наружного воздуха от минус 10 °С и ниже. Для целей вентиляции и воздушного отопления это означает невозможность использования установки, подобной АВТУ-500, как единственной и самостоятельной единицы оборудования для обеспечения параметров микроклимата и создания комфортных условий в помещениях в течение отопительного периода. Данный пример показывает: вывод, содержащийся в [43], о том, что приточно-вытяжная система вентиляции с рекуперацией теплоты позволяет отказаться от применения дополнительного оборудования для нагрева воздуха, подлежит опровержению. В режимах работы на дисбалансе объемных расходов $L_1 = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$, $L_2 = 0,33L_1 \text{ м}^3/\text{ч}$ опасность замерзания отсутствует, однако в интервале начальных температур приточного воздуха (–25)–0 °С в объеме теплоутилизатора будет происходить выпадение конденсата в канале удаляемого воздуха. Теплообмена без выпадения конденсата можно добиться только при работе установки на дисбалансе $L_1 = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$, $L_2 = 0,33L_1 \text{ м}^3/\text{ч}$ и при начальной температуре приточного воздуха от 5 °С и выше.

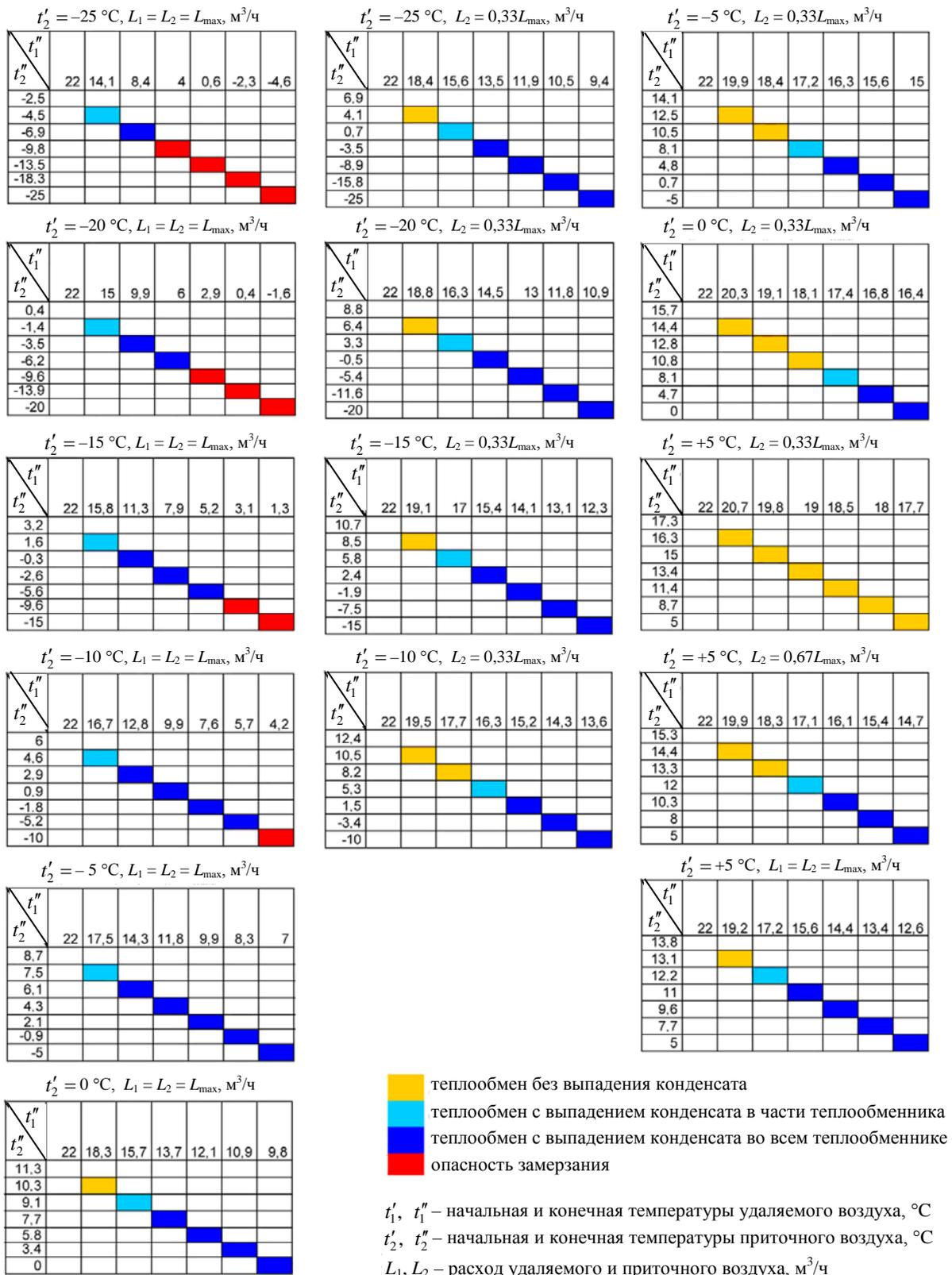


Рис. 4. Условия теплообмена в различных режимах работы теплоутилизатора в установке агрегата вентиляционного теплоутилизационного при противоточной схеме движения теплоносителей

Fig. 4. Heat exchange conditions in various operation modes of heat recovery unit in the ventilation installation with counterflow movement scheme of heat carriers

Средний в пучке коэффициент теплопередачи, рассчитанный согласно разработанному авторами численному методу технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа по средним определяющим температурам первого приближения (без учета конденсации), отличается от среднего, рассчитанного по средним определяющим температурам второго приближения (с учетом конденсации, не считая итерации с подбором температур t_{ctf} , t_{w1} , t_{w2}), на 2,8 % (рис. 5).

Коэффициент теплопередачи в канале удаляемого воздуха, рассчитанный по средним определяющим температурам для всего теплоутилизатора без учета скрытой теплоты конденсации, получается на 24 % меньше коэффициента теплопередачи, рассчитанного по средним определяющим температурам для всего теплоутилизатора, но при учете скрытой теплоты конденсации. Также следует отметить, что коэффициент теплопередачи стремится к самому малому из двух коэффициентов теплоотдачи α_1 или α_2 (сопротивление теплопроводности алюминиевой стенки не учитывалось), в рассматриваемом случае – к α_2 , т. е. в канале приточного воздуха.

При увеличении расхода приточного воздуха L_2 средний коэффициент теплопередачи возрастает (рис. 6), что также подтверждается вы-

водом в [42]. Вместе с тем при номинальном расходе приточного воздуха $L_2 = L_1$ локальный коэффициент теплопередачи (в интервалах) по пути от первого поперечного ряда трубок к третьему (считая по тракту удаляемого воздуха) увеличивается на 26 %, однако затем по пути к шестому ряду уменьшается. При меньших расходах приточного воздуха наблюдается тенденция к снижению коэффициента теплопередачи от ряда к ряду. Все это свидетельствует о низкой турбулизирующей способности пучка оребренных труб теплоутилизатора. При малых расходах приточного воздуха в его канале режим течения является ламинарным. Для интенсификации теплообмена в таком пучке следует применять искусственные турбулизирующие элементы, например алюминиевые листы оребрения выполнять с микроперфорацией либо с микроштамповкой из продольных и поперечных канавок, лунок.

Полученная расчетом тенденция к уменьшению коэффициента теплопередачи по рядам также может быть связана с выпадением влаги в канале удаляемого воздуха. При невысоких температурах удаляемого воздуха (ниже 22 °С) потенциал скрытой теплоты конденсации незначительный, в то время как сопротивление теплопроводности слоя конденсата является серьезным препятствием на пути теплового потока при небольших температурных напорах.

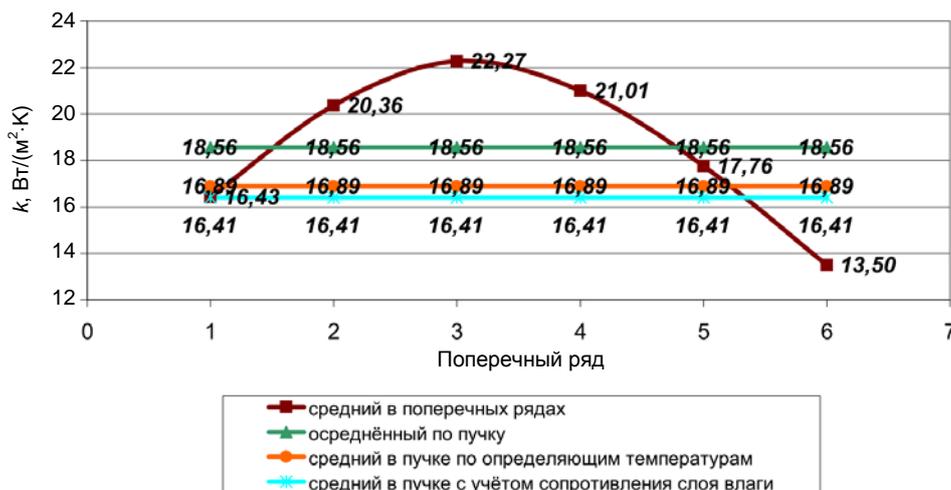


Рис. 5. Коэффициент теплопередачи по поперечным рядам трубок теплоутилизатора (при температуре наружного воздуха $t'_2 = 0$ °С и воздушном балансе $L_2 = L_1$, м³/ч)

Fig. 5. Coefficient of heat transfer along transverse rows of heat exchanger bunch tubes (at external temperature $t'_2 = 0$ °С and air balance $L_2 = L_1$, м³/h)

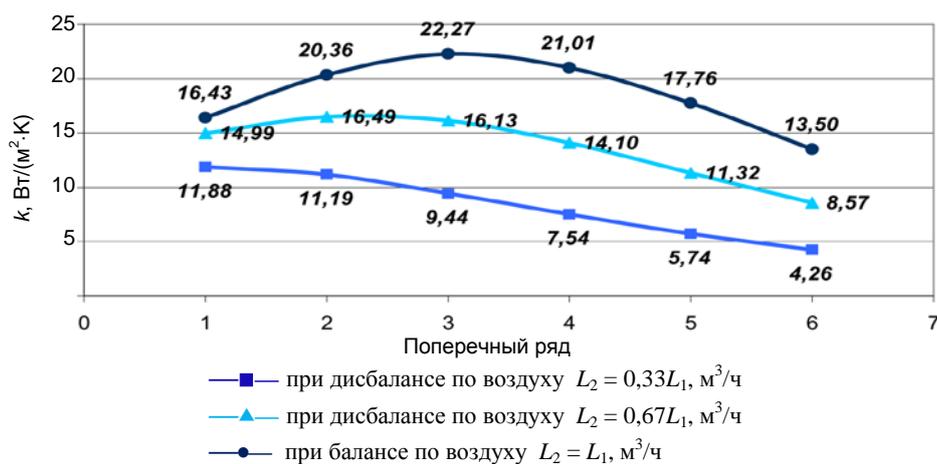


Рис. 6. Коэффициент теплопередачи по поперечным рядам трубок теплоутилизатора (при температуре наружного воздуха $t_2' = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)

Fig. 6. Coefficient of heat transfer along transverse rows of heat exchanger bunch tubes (at external temperature $t_2' = 0 \text{ }^\circ\text{C}$)

Объем выпавшего конденсата в канале удаляемого воздуха, приближенно оцененный через влагосодержание и расход удаляемого воздуха, составил $2,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует толщине слоя конденсата 1,17 мм, если он равномерно покрывает поверхность теплообмена (трубки и пластины оребрения) в канале удаляемого воздуха. Если предположить, что в первых двух интервалах теплоутилизатора теплообмен происходит без выпадения конденсата, это означает, что при шаге установки пластин $S = 2,8 \text{ мм}$ интервалы с третьего по шестой будут находиться в затопленном состоянии. Описанные обстоятельства характерны не только для условий с температурой наружного воздуха $0 \text{ }^\circ\text{C}$, но и для температур в диапазоне $(-5,9) \text{--} (+8,0) \text{ }^\circ\text{C}$ (77 % времени стояния за отопительный период для г. Полоцка). Причем тенденция к изменению коэффициентов теплопередачи аналогична изображенной на рис. 6 с отличиями в значениях по конкретным интервалам и при заданных расходах воздуха 0,7–1,3 %.

В [17] найденный экспериментально и осредненный по пучку коэффициент теплопередачи составил $19,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что на 3,8 % больше рассчитанного в настоящей статье (рис. 5).

Определены показатели термодинамической эффективности теплоутилизатора в диапазоне температур приточного воздуха $(-25) \text{--} (+5) \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7).

Температурный коэффициент эффективности, вычисленный по формуле (19), в интервале начальных температур наружного воздуха $(-25) \text{--} (+5) \text{ }^\circ\text{C}$ укладывается в диапазон заявленных производителем значений 30–75 %.

При увеличении начальной температуры приточного воздуха температурный коэффициент эффективности растет, однако не учитывает влажностного состояния удаляемого воздуха. При повышении расхода приточного воздуха температурный коэффициент уменьшается, что также подтверждается выводом в [42]. Энтальпийный коэффициент, определенный по (18), и коэффициент эксергетической эффективности (8) имеют заметно меньшие значения, чем температурный коэффициент, и при увеличении начальной температуры приточного воздуха уменьшаются. Происходит это по двум причинам: во-первых, коэффициент эксергетической эффективности убывает с ростом относительной влажности удаляемого воздуха; во-вторых, увеличение начальной температуры приточного воздуха уменьшает термодинамическую ценность удаляемого воздуха, поскольку его эксергия отсчитывается от температуры окружающей среды t_0 , которой и соответствует температура приточного воздуха. Тепловой поток имеет тем меньшую энергетическую ценность, чем меньше разница между температурой источника теплоты и температурой окружающей среды.

Для исследования режимов работы теплоутилизатора был взят диапазон температур наружного воздуха от $(-26) \text{ до } (+8) \text{ }^\circ\text{C}$ за отопительный период, который затем разбивали на интервалы $(-26) \text{--} (-22)$, $(-21,9) \text{--} (-18,0)$, $(-17,9) \text{--} (-14,0)$, $(-13,9) \text{--} (-10,0)$, $(-9,9) \text{--} (-6,0)$, $(-5,9) \text{--} (-2,0)$, $(-1,9) \text{--} (+2,0)$ и $(+2,1) \text{--} (+8,0) \text{ }^\circ\text{C}$ с известным числом часов стояния температур согласно табл. 3.19 Изменения № 1 к СНБ 2.04.02–2000 «Строительная климатология».

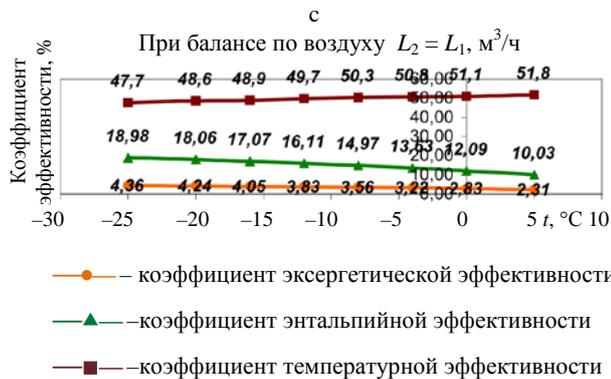
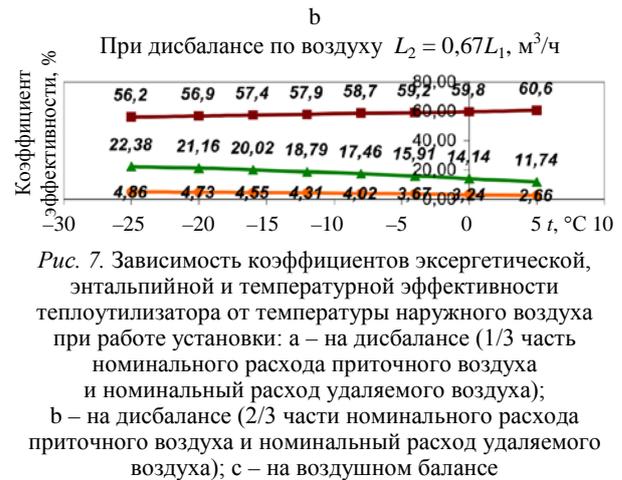
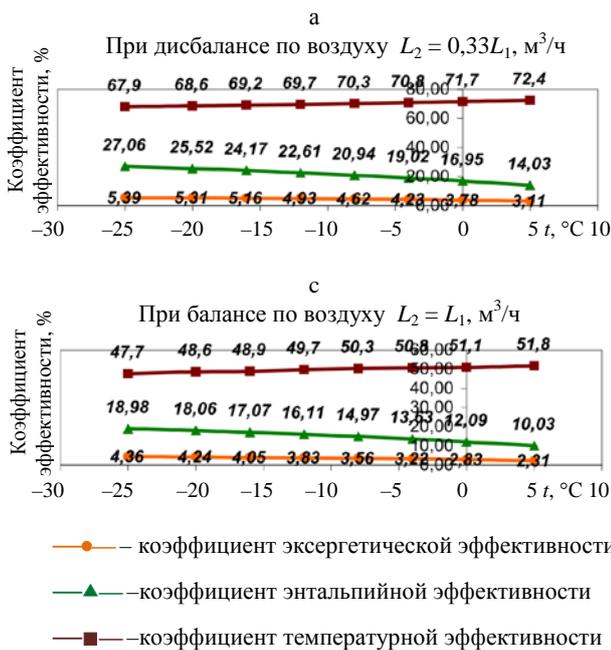


Рис. 7. Зависимость коэффициентов эксергетической, энтальпийной и температурной эффективности теплоутилизатора от температуры наружного воздуха при работе установки: а – на дисбалансе (1/3 часть номинального расхода приточного воздуха и номинальный расход удаляемого воздуха); б – на дисбалансе (2/3 части номинального расхода приточного воздуха и номинальный расход удаляемого воздуха); с – на воздушном балансе

Fig. 7. Dependence of exergy, enthalpy and temperature efficiency coefficients of heat recovery unit on external air temperature when the unit operates: а – at imbalance (1/3 of nominal flow rate of supplying air and nominal flow rate of exhaust air); б – at an imbalance (2/3 of nominal flow rate of supplying air and nominal flow rate of exhaust air); с – on air balance

В качестве нижней границы интервала брали температуру на градус ниже средней температуры наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (для г. Полоцка это -25 °C). Данная температура используется для тепловых расчетов отопительно-вентиляционных систем. В качестве верхней границы принята средняя температура наружного воздуха для переходного периода года – $+8$ °C. Температура в каждом таком интервале усреднена, например, для интервала $+2,1$ – $+8,0$ °C средней будет температура $+5$ °C, для $-5,9$ – $-2,0$ °C – -4 °C и т. д. Таким образом, величины годовых затрат и экономии энергии по теплоутилизационной установке определяли дискретно во взятых температурных интервалах при средних температурах наружного воздуха в этих интервалах.

Что касается интервала температур -26 – -22 °C, для него средняя температура будет -24 °C, а не -25 °C, при которой выше были определены условия теплообмена и величины коэффициентов термодинамической эффективности теплоутилизатора (рис. 4 и 7). В примененной модели стационарного теплообмена условия теплообмена и величины коэффициентов термодинамической эффективности теплоутилизатора не находятся в зависимости с временем стояния температур наружного воздуха, и поэтому для расчетов упомянутых характеристик могут быть выбраны любые

температуры из интервала -26 – $+8$ °C. Впрочем, возможное изменение температуры с -25 на -24 °C в указанных случаях не приведет к изменениям выводов в этой статье.

Диапазон температур наружного воздуха $-5,9$ – $+8,0$ °C охватывает три расчетных интервала температур ($-5,9$ – $-2,0$), $-1,9$ – $+2,0$), $+2,1$ – $+8,0$ °C) с соответствующими среднеинтервальными температурами -4), 0 и $+5$ °C).

Наибольшее количество сэкономленной тепловой энергии за счет утилизации теплоты удаляемого воздуха получено в диапазоне температур отопительного периода $-5,9$ – $+8,0$ °C (при среднеинтервальных расчетных температурах -4), 0 и $+5$ °C) (рис. 8), что и определяет целесообразность применения рассматриваемой теплоутилизационной установки в указанный период.

График зависимости количества сэкономленной тепловой энергии от температуры наружного воздуха получается практически эквидистантным графику изменения времени стояния температур наружного воздуха [44], и при работе установки на воздушном балансе $L_2 = L_1$ экономия выше на 50 %, чем при работе на дисбалансе $L_2 = 0,33L_1$, а также на 21% выше, чем при дисбалансе $L_2 = 0,67L_1$, однако, как отмечалось выше, при увеличении расхода приточного воздуха L_2 до номинального термодинамические условия работы установки АВТУ ухудшаются.

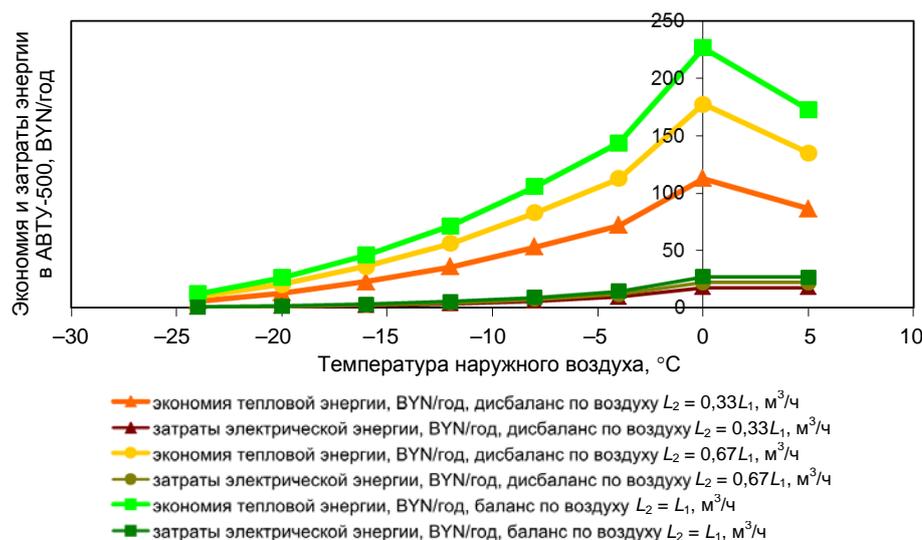


Рис. 8. Стоимостные показатели работы установки агрегата вентиляционного теплоутилизационного в отопительный период

Fig. 8. Cost indicators for operation of heat recovery installation unit during heating period

ВЫВОДЫ

1. На основе разработанного метода технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа определены термодинамические режимы воздухо-воздушного теплоутилизатора рекуперативного типа, входящего в состав рассмотренной вентиляционной установки малой производительности.

2. Отмечено влияние изменения физических характеристик потоков теплоносителей на показатели термодинамической и экономической эффективности рассмотренной вентиляционной установки с учетом и без учета фазовых превращений в одном из потоков.

3. Установлены и научно обоснованы климатические условия, при которых утилизация теплоты удаляемого воздуха в рассмотренной вентиляционной установке технически оправдана и экономически целесообразна.

ЛИТЕРАТУРА

- Кузнецов, Ю. В. Энергосберегающие технологии и мероприятия в системах энергосбережения / Ю. В. Кузнецов, С. В. Федорова. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 356 с.
- Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. М.: Энергоатомиздат, 1988. 250 с.
- Сажин, Б. С. Эксергетический метод в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. М.: Химия, 1992. 208 с.
- Андрющенко, А. И. Оптимизация тепловых циклов и процессов ТЭС / А. И. Андрющенко. М.: Высш. шк., 1974. 280 с.
- Хрусталева, Б. М. К вопросу применения эксергетического метода термодинамического анализа при оценке и разработке энергоиспользования в промышленных теплотехнологиях / Б. М. Хрусталева, В. Н. Романюк, А. Н. Пехота // Энергетическая стратегия. 2017. № 1. С. 50–56.
- Утилизация теплоты вентиляционных выбросов промышленных зданий / А. В. Бараков [и др.] // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. Т. 56, № 4. С. 46–56.
- Костуганов, А. Б. Исследование эффективности утилизации теплоты в рекуперативных теплообменниках установок автономной вентиляции / А. Б. Костуганов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 1. С. 36–46. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.01.6>.
- Зыков, А. П. Повышение энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования общественных зданий за счет использования технологии утилизации тепла вытяжного воздуха / А. П. Зыков, А. В. Барков // Высокие технологии и инновации в науке: сб. избр. ст. Междунар. науч. конф. СПб., 2020. С. 160–166.
- Нуруллин, Н. Ж. Анализ работы систем приточно-вытяжной вентиляции в разных климатических условиях / Н. Ж. Нуруллин // Economic Aspects of Industrial Development in the Transition to a Digital Economy: сб. науч. ст. по материалам III Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2020. С. 43–51.
- Heat Transfer Device: U. S. Pat. 2350348 / R. S. Gaugler. Publ. June 6, 1944.
- Trefethen, L. On the Surface Tension Pumping of Liquids or a Possible Role of the Candlewick in Space Explora-

- tion / L. Trefenten // GE Tech. Info. Serial. 1962. No 615. D114.
12. Grover, G. Structure of Very High Thermal Conductance / G. Grover, T. Cotter, G. Erickson // Journal Applied Physics. 1964. Vol. 35, No 6. P. 1990–1991. <https://doi.org/10.1063/1.1713792>.
 13. Cotter, T. P. Theory of Heat Pipes: USAEC Report LA-3246 / T. P. Cotter. Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, USA, 1965. <https://doi.org/10.2172/4619147>.
 14. Cotter, T. P. Principles and Prospects of Micro Heat Pipes / T. P. Cotter // Proceedings 5th International Heat Pipe Conference. Tsukuba, Japan, 1984.
 15. Busse, C. A. Theory of Ultimate Heat Transfer Limit of Cylindrical Heat Pipes / C. A. Busse // Int. J. Heat Mass Transfer. 1973. Vol. 16, No 1. P. 169–186. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(73\)90260-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(73)90260-3).
 16. Levy, E. K. Theoretical Investigation of Heat Pipes Operating at Low Vapor Pressures / E. K. Levy // Journal of Engineering for Industry. 1968. Vol. 90, No 4. P. 547–552. <https://doi.org/10.1115/1.3604687>.
 17. Wu, Z.-C. Comparison of Heat Transfer Efficiency between Heat Pipe and Tube Bundles Heat Exchanger / Z.-C. Wu, X.-P. Zhu // Thermal Science. 2015. Vol. 19, No 4. P. 1397–1402. <https://doi.org/10.2298/TSCI1504397W>.
 18. Zhuang, J. Prospect of Heat Pipe Technology for Year 2010 / J. Zhuang, H. Zhang // Chemical Engineering & Machinery. 1998. Vol. 25, No 1. P. 44–49.
 19. Research on Heat Pipe and Heat Pipe Exchanger for Waste Heat Recovery / Q. W. Dong [et al.] // Industrial Heating. 2007. Vol. 36, No 4. P. 37–40.
 20. Vasiliev, L. L. Heat Pipes in Modern Heat Exchangers / L. L. Vasiliev // Applied Thermal Engineering. 2005. Vol. 25, No 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004>.
 21. Yau, Y. H. A Review on the Application of Horizontal Heat Pipe Heat Exchangers in Air Conditioning Systems in the Tropics / Y. H. Yau, M. Ahmadzadehtalatapeh // Applied Thermal Engineering. 2010. Vol. 30, No 2–3. P. 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.07.011>.
 22. Васильев, Л. Л. Теплообменники на тепловых трубах / Л. Л. Васильев. Минск: Наука и техника, 1981. 143 с.
 23. Повышение энергоэффективности зданий при условии утилизации тепла вытяжного воздуха / П. С. Хужаев [и др.] // Бюллетень науки и практики. 2017. Т. 16, № 3. С. 57–63.
 24. Агрегаты вентиляционные теплоутилизационные [Электронный ресурс] // Каталог продукции Махаеро. Промышленное отопление и вентиляция. Промышленные отопительные системы. Режим доступа: <http://www.maхаero.by/katalog-produkcii/oborudovanie-dlya-ventilyacii/pritochnye-ustanovki/agregaty-ventilyacionnye-teploutilizacionnye-avtu>. Дата доступа: 27.08.2021.
 25. Утилизация теплоты вытяжного воздуха в перекрестноточном рекуператоре / С. М. Анисимов [и др.] // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2014. Т. 151, № 7. С. 79–83.
 26. Энергосбережение в системах обеспечения микроклимата зданий при утилизации теплоты вентиляционных выбросов / Т. В. Щукина [и др.] // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2016. Т. 4, № 3. С. 30–34.
 27. Игнаткин, И. Ю. Оптимизация эффективности утилизации теплоты воздушно-воздушного рекуператора / И. Ю. Игнаткин // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина. 2018. Т. 83, № 1. С. 34–39. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-83-1-34-39>.
 28. Королёва, Т. И. Проверка условия конденсации влаги в воздушном теплоутилизаторе рекуперативного типа / Т. И. Королёва, В. А. Зафатаев // Строительство – 2016: сб. материалов II Брянского Междунар. иннов. форума, 1 дек. 2016 г. / Брянский гос. инж.-технол. ун-т; редкол.: А. В. Городков, З. А. Мевлидинов [и др.]. Брянск, 2016. Т. 2. С. 51–54.
 29. Зафатаев, В. А. Определение возможности конденсации влаги в воздушном пластинчатом утилизаторе теплоты рекуперативного типа / В. А. Зафатаев // Инновационные технологии в промышленности: образование, наука, производство: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф., 16 дек. 2016 г. / Уфимский гос. нефт. техн. ун-т. Филиал ФГБОУ ВО УГНТУ в Стерлитамаке; редкол.: В. В. Пряничникова, И. В. Овсянникова [и др.]. Стерлитамак, 2016. С. 326–328.
 30. Королёва, Т. И. Термодинамическое обоснование утилизации теплоты дымовых газов в конденсационных теплоутилизаторах на примере котельной «5-й полк» г. Витебска [Электронный ресурс] / Т. И. Королёва, В. А. Зафатаев // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого гос. ун-та / Полоцкий гос. ун-т; редкол.: А. А. Бакатович, Л. М. Парфенова. Новополоцк, 2018. Режим доступа: <https://elib.psu.by/handle/123456789/22708>.
 31. Маньковский, О. Н. Теплообменная аппаратура химических производств / О. Н. Маньковский, А. Р. Толчинский, М. В. Александров. Л.: Химия, 1976. 369 с.
 32. Данилевский, Л. Н. Системы принудительной вентиляции с рекуперацией тепловой энергии удаляемого воздуха для жилых зданий / Л. Н. Данилевский. Минск, 2015. 152 с.
 33. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / под ред. О. Т. Ильченко. Харьков: Вища шк., 1985. 384 с.
 34. Рашиков, В. И. Численные методы. Компьютерный практикум / В. И. Рашиков. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 132 с.
 35. Романюк, В. Н. Научно-методические основы эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках. Ч. 2 / В. Н. Романюк, А. М. Нияковский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 4. С. 328–335. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-328-335>.
 36. К вопросу оценки термодинамической эффективности Белорусской энергосистемы / К. О. Воронов [и др.] // Энергия и Менеджмент. 2016. Т. 90, № 3. С. 2–7.
 37. Тсатсаронис, Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Дж. Тсатсаронис; пер. Т. В. Морозюка. Одесса: Студия «Негоциант», 2002. 152 с.
 38. Lazzaretto, A. On the Quest for Objective Equations in Exergy Costing / A. Lazzaretto, G. Tsatsaronis // Proceedings of the ASME 1997 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Dallas, Texas, USA: Advanced Energy Systems, 1997. P. 197–210. <https://doi.org/10.1115/IMECE1997-0989>.

39. Бэс, Т. Эксергия в процессах отопления, кондиционирования воздуха и сушки / Т. Бэс // Вопросы термодинамического анализа (эксергетический метод): сб. ст. / под ред. В. М. Бродянского. М.: Мир, 1965. С. 139–145.
40. Analysis of Exergy of Moist Air and Energy Saving Potential in HVAC by Evaporative Cooling or Energy Recovery / C. Q. Ren [et al.] // International Journal on Architectural Science. 2001. Vol. 2, No 4. P. 113–117.
41. Белоногов, Н. В. Пути совершенствования пластинчатых перекрестноточных рекуперативных теплообменников / Н. В. Белоногов. СПб., 2005. 204 с.
42. Mandapati, M. J. K. Thermodynamic Performance Evaluation of an Air-Air Heat Pipe Heat Exchanger / M. J. K. Mandapati, K. S. Chandra, G. S. Narayan // Thermal Science. 2014. Vol. 18, No 4. P. 1343–1353. <https://doi.org/10.2298/tsci121214123k>.
43. Тябина, Д. А. Приточно-вытяжная система вентиляции с рекуперацией тепла как способ энергосбережения / Д. А. Тябина, П. Е. Манохин // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 1, № 12. С. 587–591.
44. Зафатаев, В. А. Термодинамическое обоснование применения системы приточно-вытяжной вентиляции зданий с утилизацией теплоты удаляемого воздуха в условиях ее работы при низких температурах наружного воздуха [Электронный ресурс] / В. А. Зафатаев, С. В. Ланкович, А. С. Лапезо // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. II Междунар. науч. конф., Новополюк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий гос. ун-т; под ред. Л. М. Парфеновой. Новополюк, 2020. Режим доступа: <https://elib.psu.by/handle/123456789/25549>.
- 10 (1), 36–46. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.01.6> (in Russian).
8. Zykov A. P., Barkov A. V. (2020) Increasing Energy Efficiency of Ventilation and Air Conditioning Systems in Public Buildings through the Use of Exhaust Air Heat Recovery Technology. *Vysokie Tekhnologii i Innovatsii v Nauke: Sb. Izbr. St. Mezhdunar. Nauch. Konf.* [High Technologies and Innovations in Science. Collection of Selected Articles of International Scientific Conference]. Saint Petersburg, 160–166 (in Russian).
9. Nurullin N. Zh. (2020) Analysis of the Operation of Supply and Exhaust Ventilation Systems in Different Climatic Conditions. *Economic Aspects of Industrial Development in the Transition to Digital Economy*. Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference. Ufa, 43–51 (in Russian).
10. Gaugler R. S. (1944) *Heat Transfer Device*. U. S. Patent No 2350348.
11. Trefethen L. (1962) On the Surface Tension Pumping of Liquids or a Possible Role of the Candlewick in Space Exploration. *GE Tech. Info. Serial*, (615), D114.
12. Grover G., Cotter T., Erickson G. (1964) Structure of Very High Thermal Conductance. *Journal Applied Physics*, 35 (6), 1990–1991. <https://doi.org/10.1063/1.1713792>.
13. Cotter T. P. (1965) *Theory of Heat Pipes*. USAEC Report LA-3246. Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, USA. <https://doi.org/10.2172/4619147>.
14. Cotter T. P. (1984) Principles and Prospects of Micro Heat Pipes. *Proceedings 5th International Heat Pipe Conference*. Tsukuba, Japan.
15. Busse C. A. (1973) Theory of Ultimate Heat Transfer Limit of Cylindrical Heat Pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16 (1), 169–186. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(73\)90260-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(73)90260-3).
16. Levy E. K. (1968) Theoretical Investigation of Heat Pipes Operating at Low Vapor Pressures. *Journal of Engineering for Industry*, 90 (4), 547–552. <https://doi.org/10.1115/1.3604687>.
17. Wu Z.-C., Zhu X.-P. (2015) Comparison of Heat Transfer Efficiency between Heat Pipe and Tube Bundles Heat Exchanger. *Thermal Science*, 19 (4), 1397–1402. <https://doi.org/10.2298/TSCI1504397W>.
18. Zhuang J., Zhang H. (1998) Prospect of Heat Pipe Technology for Year 2010. *Chemical Engineering & Machinery*, 25 (1), 44–49.
19. Dong Q. W. [et al.] (2007) Research on Heat Pipe and Heat Pipe Exchanger for Waste Heat Recovery. *Industrial Heating*, 36 (4), 37–40.
20. Vasiliev L. L. (2005) Heat Pipes in Modern Heat Exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 25 (1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004>.
21. Yau Y. H., Ahmadzadehtalatapeh M. (2010) A Review on the Application of Horizontal Heat Pipe Heat Exchangers in Air Conditioning Systems in the Tropics. *Applied Thermal Engineering*, 30 (2–3), 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.07.011>.
22. Vasiliev L. L. (1981) *Heat Exchangers on Heat Pipes*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 143 (in Russian).
23. Khuzhaev P. S., Nazarov R. S., Alimardonov A. B., Sul-tonmamadov Kh. P. (2017) Improving Energy Efficiency of Buildings under Condition of Utilizing Heat of Exhaust Air. *Byulleten Nauki i Tekhniki = Bulletin of Science and Practice*, 16 (3), 57–63 (in Russian).
24. Ventilation Heat Recovery Units. *MaxAero Product Catalog. Industrial Heating and Ventilation. Industrial Heating Systems*. Available at: <http://www.maxaero.by/katalog>

Поступила 21.12.2021

Подписана в печать 22.02.2022

Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. Kuznetsov Yu. V., Fedorova S. V. (2008) *Energy Saving Technologies and Measures in Energy Saving Systems*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 356 (in Russian).
2. Brodyansky V. M., Fratsher V., Mikhalek K. (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 250 (in Russian).
3. Sazhin B. S., Bulekov A. P. (1992) *Exergetic Method in Chemical Technology*. Moscow, Khimiya Publ. 208 (in Russian).
4. Andryushchenko A. I. (1974) *Optimization of Thermal Cycles and Processes of TPP*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 280 (in Russian).
5. Khroustalev B. M., Romanyuk V. N., Pekhota A. N. (2017) On the application of the Exergy Method of Thermodynamic Analysis in the Assessment and Development of Energy Use in Industrial Heat Technologies. *Energeticheskaya Strategiya [Energy Strategy]*, (1), 50–56 (in Russian).
6. Barakov A. V., Dubanin V. Yu., Kozhukhov N. N., Prutskikh D. A. (2019) Heat Utilization of Ventilation Emissions From Industrial Buildings. *Nauchny Zhurnal Stroitelstva i Arkhitektury = Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 56 (4), 46–56 (in Russian).
7. Kostuganov A. B. (2020) Study of Efficiency of Heat Utilization in Recuperative Heat Exchangers of Autonomous Ventilation Installations. *Gradostroitelstvo i Arkhitektura = Urban Construction and Architecture*,

- produkcii/oborudovanie-dlya-ventilyacii/pritochnye-usta novki/agregaty-ventilyacionnye-teploutilizacionnye-avtu (Accessed 27 August 2021) (in Russian).
25. Anisimov S. M., Vasil'ev V. F., Edlikovskii A., Pandelidis D. (2014) Utilization of Heat of Exhaust Air in Cross-Flow Recuperator. *Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie* [Plumbing, Heating, Air Conditioning], 151 (7), 79–83 (in Russian).
 26. Shchukina T. V., Zherlykina M. N., Solov'ev S. A., Mantsurov P. I. (2016) Energy Saving in Systems for Providing Microclimate of Buildings during Utilization of Heat of Ventilation Emissions. *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikatsii* [Urban Planning. Infrastructure. Communications], 4 (3), 30–34 (in Russian).
 27. Ignatkin I. Yu. (2018) Optimizing Utilization Efficiency of Heat Developed by Air-to-Air Recuperator. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Agroinzhenernogo Universiteta im. V. P. Goryachkina = Vestnik of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*, 83 (1), 34–39. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-83-1-34-39>.
 28. Koroleva T. I., Zafataev V. A. (2016) Checking Conditions of Moisture Condensation in Air Recuperative Heat Exchanger. *Stroitel'stvo – 2016: Sb. Materialov II Bryanskogo Mezhdunar. Innov. Forum, 1 Dek. 2016 g. T. 2* [Construction – 2016: Collection of Papers of the 2nd Bryansk International Innovation Forum, December 01, 2016. Vol. 2]. Bryansk, 51–54 (in Russian).
 29. Zafataev V. A. (2016) Determination of Moisture Condensation Possibility in Recuperative Air Plate Heat Exchanger. *Innovatsionnye Tekhnologii v Promyshlennosti: Obrazovanie, Nauka, Proizvodstvo: Sb. Materialov Vseros. Nauch.-Prakt. Konf., 16 Dek. 2016 g.* [Innovative Technologies in Industry: Education, Science, Production: Collection of Papers of All-Russian Scientific-Practical Conference, December 16, 2016]. Sterlitamak, 326–328 (in Russian).
 30. Koroleva T. I., Zafataev V. A. (2018) Thermodynamic Substantiation of Smoke Gas Heat Recovery in Condensing Heat Exchangers on the Example of the 5th Regiment Boiler House in Vitebsk. *Arkhitekurno-Stroitel'nyi Kompleks: Problemy, Perspektivy, Innovatsii: Elektron. Sb. St. Mezhdunar. Nauch. Konf., Posvyashch. 50-Letiye Polotskogo Gos. Un-ta.* [Architectural and Construction Complex: Problems, Perspectives, Innovations. Electronic Collection of Papers of International Scientific Conference Dedicated to the 50th Anniversary of Polotsk State University]. Nopolotsk. Available at: <https://elib.psu.by/handle/123456789/22708> (in Russian).
 31. Mankovsky O. N., Tolchinsky A. R., Aleksandrov M. V. (1976) *Heat Exchange Equipment for Chemical Industries*. Leningrad, Khimiya Publ. 369 (in Russian).
 32. Danilevsky L. N. (2015) *Forced Ventilation Systems with Recovery of Thermal Energy of Exhaust Air for Residential Buildings*. Minsk. 152 (in Russian).
 33. Ichenko O. T. (ed.) (1985) *Heat-Using Installations of Industrial Enterprises*. Kharkov, Vishcha Shkola Publ. 384 (in Russian).
 34. Rashchikov V. I. (2010) *Numerical Methods. Computer Workshop*. Moscow, Publishing House of National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute. 132 (in Russian).
 35. Romaniuk V. N., Niyakovski A. M. (2021) Scientific and Methodological Bases of Exergetic Analysis of the Processes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat Technology Installations. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (4), 328–335. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-328-335> (in Russian).
 36. Voronov, E. O., Romanyuk, V. N., Sednin, V. A., Bobich A. A. (2016) On the Issue of Assessing the Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], 90 (3), 2–7 (in Russian).
 37. Tsatsaronis G. (2002) *Interaction of Thermodynamics and Economics to Minimize the Cost of an Energy Conversion System*. Odessa, Studiia «Negotsiant» Publ. 152 (in Russian).
 38. Lazzaretto A., Tsatsaronis G. (1997) On the Quest for Objective Equations in Exergy Costing. *Proceedings of the ASME 1997 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Dallas, Texas, USA, Advanced Energy Systems, 197–210. <https://doi.org/10.1115/IMECE1997-0989>.
 39. Bes T. (1965) Exergy in the Processes of Heating, Air Conditioning and Drying. *Voprosy Termodinamicheskogo Analiza (Eksergetichesky Metod): Sb. St.* [Questions of Thermodynamic Analysis (Exergy Method). Collection of Papers]. Moscow, Mir Publ. 139–145 (in Russian).
 40. Ren C. Q., Tang G. F., Li N. P., Zhang G. F., Yang J. (2001) Analysis of Exergy of Moist Air and Energy Saving Potential in HVAC by Evaporative Cooling or Energy Recovery. *International Journal on Architectural Science*, 2 (4), 113–117.
 41. Belonogov N. V. (2005) *Ways of Improving Plate Cross-Flow Recuperative Heat Exchangers*. Saint Petersburg. 204 (in Russian).
 42. Mandapati M. J. K., Chandra K. S., Narayan G. S. (2014) Thermodynamic Performance Evaluation of an Air-Air Heat Pipe Heat Exchanger. *Thermal Science*, 18 (4), 1343–1353. <https://doi.org/10.2298/tsci121214123k>.
 43. Tyabina D. A., Manokhin P. E. (2018) Supply and Exhaust Ventilation System with Heat Recovery as a Way of Energy Saving. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Razrabotki* [Modern Research and Development], 1 (12), 587–591 (in Russian).
 44. Zafataev V. A., Lankovich S. V., Lapezo A. S. (2020) Thermodynamic Substantiation of the Use of the System of Supply and Exhaust Ventilation of Buildings with the Utilization of Heat of the Removed Air under the Conditions of its Operation at Low Outdoor Temperatures. *Arkhitekurno-Stroitel'nyi Kompleks: Problemy, Perspektivy, Innovatsii: Elektron. Sb. St. II Mezhdunar. Nauch. Konf., Novopolotsk, 28–29 Noyab. 2019 g.* [Architectural and Construction Complex: Problems, Perspectives, Innovations. Electronic Collection of Papers of the 2nd International Scientific Conference. Novopolotsk, November 28–29, 2019]. Novopolotsk, Polotsk State University, 499–513 (in Russian).

Received: 21.12.2021

Accepted: 22.02.2022

Published online: 29.07.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-314-322>

УДК 621.315

Железобетонные стойки стенового безопалубочного формования для опор воздушных линий 0,4–10 кВ

Канд. техн. наук, проф. П. Т. Мирзаев¹⁾, докторант З. П. Шамансурова¹⁾

¹⁾Ташкентский архитектурно-строительный институт (Ташкент, Республика Узбекистан)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Применение технологии стенового безопалубочного формования для изготовления железобетонных конструкций дает возможность вести индустриальное строительство в соответствии с требованиями современных нормативных документов. Это позволяет разработку проектов выполнять индивидуально, а производство за короткий срок переналадить в соответствии с возникающими потребностями. В статье рассмотрена возможность применения железобетонных стоек, производимых по технологии стенового безопалубочного формования, для опор воздушных линий 0,4–10 кВ. Конструкции таких опор разработаны на типовой базе номенклатуры изделий. Решена задача по установлению минимального количества (двух) поперечных сечений с различными геометрическими размерами для всех марок предлагаемых стоек при соблюдении эксплуатационных требований и технологических условий производства. Поперечные сечения стоек, изготовленных по стеновой безопалубочной технологии, представляют собой трапеции, у которых размеры верхних оснований меньше нижних, что способствует сохранению формы свежетоформованного бетона. Для стоек длиной до 11,0 м предложено сплошное поперечное сечение с гранями трапеции: $h = 245$ мм; $b = 150$ мм (верхняя); $b_1 = 180$ мм (нижняя). В средней части поперечного сечения стоек длиной от 11,0 до 16,4 м имеется полость по всей длине стойки. Размеры граней стойки: $h = 300$ мм; $b = 205$ мм; $b_1 = 235$ мм. Технология стенового безопалубочного формования предусматривает армирование предварительно напряженных конструкций высокопрочной проволочной или канатной арматурой. Предлагаемые стойки армируются стержнями напрягаемой проволочной арматуры диаметром 5 мм класса Вр1400, поэтому предусматривается проектирование стоек без образования трещин в теле бетона при эксплуатации. Проволочная арматура располагается группами во всех угловых участках поперечного сечения стойки с равным количеством проволоки в каждой группе с учетом технологических особенностей стенового безопалубочного формования. На предлагаемое поперечное сечение полых стоек, производимых стеновым безопалубочным формованием, для опор воздушных линий напряжением 0,4–10 кВ получен патент на полезную модель в Агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Качественные характеристики стоек опор воздушных линий – это низкая материалоемкость, универсальность, технологичность, кроме того, инновационность, поскольку связаны с конструированием, изготовлением и испытанием опытных изделий для использования конкретными потребителями, т. е. с коммерциализацией.

Ключевые слова: геометрия конфигурации поперечного сечения, напрягаемая проволочная арматура, прочность, трещиностойкость, схемы армирования, низкая материалоемкость, универсальность, технологичность

Для цитирования: Мирзаев, П. Т. Железобетонные стойки стенового безопалубочного формования для опор воздушных линий 0,4–10 кВ / П. Т. Мирзаев, З. П. Шамансурова // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 314–322. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-314-322>

Reinforced Concrete Posts Made by Long-Line Formwork-Free Shaping for 0.4–10 kV Overhead Line Supports

P. T. Mirzaev¹⁾, Z. P. Shamansurova¹⁾

¹⁾Tashkent Institute of Architecture and Civil Engineering (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Abstract. When using the technology of long-line formwork-free shaping for the manufacture of reinforced concrete structures, industrial engineering can be conducted in accordance with the requirements of modern regulatory documents.

Адрес для переписки
Мирзаев Пулат Таджиевич
Ташкентский архитектурно-строительный институт
ул. Янги шахар, 9,
100206, г. Ташкент, Республика Узбекистан
Тел.: +998 93 391-75-18
pulatmirza@mail.ru

Address for correspondence
Mirzaev Pulat T.
Tashkent Institute of Architecture and Civil Engineering
9, Yangi Shaxar str.,
100206, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Tel.: +998 93 391-75-18
pulatmirza@mail.ru

This allows projects to be developed individually, and production lines can be readjusted in a short time in accordance with emerging needs. In this regard, the possibility of using reinforced concrete posts produced by the technology of long-line formwork-free shaping for 0.4–10 kV overhead line supports is being considered. The designs of such supports are developed on the standard basis of the product range. The problem of establishing the minimum number (two) of cross-sections with different geometric dimensions for all brands of the offered posts is solved, subject to the operational requirements and technological specifications of production. The cross-sections of the proposed posts represent trapeziums, with the dimensions of the upper bases smaller than the dimensions of the lower bases in order to maintain the shape of the freshly formed concrete body of the posts made using long-line formwork-free shaping technology. For posts up to 11.0 m long, a solid cross-section with trapezoid edges is proposed: $h = 245$ mm; $b = 150$ mm (an upper base); $b_1 = 180$ mm (a lower base). In the middle part of the cross-section of posts with a length of 11.0 to 16.4 m there is a cavity along the entire length of the posts. Cross-sectional dimensions of such posts are $h = 300$ mm; $b = 205$ mm, $b_1 = 235$ mm. Long-line formwork-free shaping technology provides for the reinforcement of prestressed structures with high-strength wire or rope reinforcement. The proposed posts are reinforced with 5Bp1400 rods, therefore, during their operation, the formation of cracks in the tensile zone of concrete is not foreseen. The rods are located in groups at all corner sections along the cross-section of the post with an equal number of rods in each group, taking into account the technological features of the long-line formwork-free shaping. For the proposed cross-section of hollow posts, produced by long-line formwork-free shaping for 0.4–10 kV overhead line supports, a patent for utility model has been obtained from the Agency for Intellectual Property of Uzbekistan. Qualitative characteristics of the posts for overhead line supports are low material consumption, versatility, manufacturability, innovation, which lies in the fact that their implementation is associated with the design, manufacture and testing of experimental products for use by specific consumers, i. e. with the commercialization.

Keywords: cross-section configuration geometry, stressed wire reinforcement, strength, crack resistance, reinforcement schemes, low material consumption, versatility, manufacturability

For citation: Mirzaev P. T., Shamansurova Z. P. (2022) Reinforced Concrete Posts Made by Long-Line Formwork-Free Shaping for 0.4–10 kV Overhead Line Supports. *Science and Technique*. 21 (4), 314–322. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-314-322> (in Russian)

Введение

При проектировании и строительстве линий электропередачи благодаря современным технологиям уменьшаются затраты на их сооружение и эксплуатацию, увеличиваются сроки службы и надежность строительных конструкций, сокращается число их отказов. Это, в свою очередь, уменьшает материальные потери потребителей от недополучения электроэнергии [1].

Технология изготовления железобетонных конструкций стендовым безопалубочным формованием является прогрессивной, ее применяют в строительной индустрии экономически развитых стран. Благодаря такой технологии индустриальное строительство ведется в соответствии с требованиями современных нормативных документов, позволяющих в том числе разрабатывать индивидуальные проекты, а производство конструкций за короткое время можно переориентировать под потребности заказчика. То есть на одной и той же технологической линии можно выпускать разные конструктивные элементы зданий и сооружений.

Особенности производства конструкций безопалубочного формования – отсутствие поперечной арматуры, сеток, косвенного армирования в торцах, выпусков арматуры, строповочных петель. Например, на изготовление одного погонного метра многопустотных плит перекрытий методом стендового безопалубочного формования металла требуется в 2,5 раза меньше в сравнении с традиционной схемой агрегатно-поточной технологии [2].

В Узбекистане налажено производство предварительно напряженных многопустотных плит перекрытий, изготавливаемых на линиях стендового безопалубочного формования, что позволяет расширить спектр продукции. Наиболее целесообразно на стендах безопалубочного формования производить железобетонные конструкции, отвечающие следующим требованиям:

- изделие должно быть длинномерным, например, балки, плиты, сваи и т. д.;
- размеры поперечного сечения изделия исходя из технологии изготовления должны быть одинаковыми по всей длине, так как формующая машина движется вдоль стенда поступательно.

Учитывая требования технологии формования железобетонных конструкций, представляет интерес изготовление стоек с предварительно напряженной арматурой для опор воздушных линий электропередачи (ЛЭП) на стендах безопалубочного формования.

Недостатком типовых стоек железобетонных вибрированных (СВ) для воздушных линий (ВЛ) [3, 4] является сложность их производства, заключающаяся в том, что для каждой стойки изготавливаются арматурные изделия (спирали, хомуты, сварные сетки), устраиваемые в форме, а также этап бетонирования, т. е. каждая стойка формуется в отдельной форме, и этот технологический процесс осуществляется отдельно для каждой из них. В [5–7] не регламентировано проектирование конструкций (в том числе стоек для опор ВЛ), армированных только предварительно напряженной проволочной или канатной арматурой (без применения ненапрягаемой арматуры).

Характеристики стоек для опор воздушных линий

По запросу GEO BETON TRUST специалисты кафедры «Строительные конструкции» Ташкентского архитектурно-строительного института разработали инновационный проект «Разработка конструкции предварительно напряженных стоек опор ВЛ 0,4–10 кВ с возможностью их изготовления стендовым безопалубочным формованием». При проектировании таких стоек учитывались базы номенклатуры изделий, приведенные в [3, 4]. Эти документы распространяются на типовые стойки опор ВЛ длиной от 8,5 до 16,4 м, армированные напрягаемой стержневой арматурой, с классами бетона В25 и В30. Типовые стойки имеют переменное по длине поперечное сечение в форме

трапеции (рис. 1), у которой верхняя грань больше, чем нижняя (для удобства распалубки готовых изделий). Размеры поперечных сечений типовых стоек ($b = 165–390$ мм; $b_1 = 150–370$ мм; $b_2 = 150–190$ мм; $h_1 = 230–380$ мм; $h_2 = 165–200$ мм) зависят от величин расчетных изгибающих моментов, воспринимаемых стойками от действия эксплуатационных нагрузок с учетом предельных значений ширины раскрытия трещин и прогибов.

Номенклатура изделий по типовым СВ состояла из 16 марок, для их изготовления применялось 11 металлоформ. В техническом задании на выполнение проекта заказчик отметил ряд требований.

1. Установить единую геометрию сечения стоек для всей номенклатуры изделий с учетом технологических ограничений формующих машин и с соблюдением требований по прочности, трещиностойкости, жесткости, предъявляемых к железобетонным предварительно напряженным конструкциям. При этом с учетом технологических ограничений высота сечения изделия должна быть не более 300 мм.

2. Разрабатываемые стойки опор ЛЭП должны армироваться напрягаемой проволочной арматурой класса 5Вр1400 и иметь прочность бетона не более класса В30, которая дает возможность исключить применение поперечной арматуры в стойках (конструкции, производимые методом безопалубочного формования, армируются только продольной предварительно напряженной арматурой без установки монтажных (строповочных) петель – это технологические ограничения безопалубочного формования).

3. Учесть в конструкции стойки вероятность устройства заземляющего проводника, а также определить возможность первого подъема изделия (стойки) с поддона стенда.

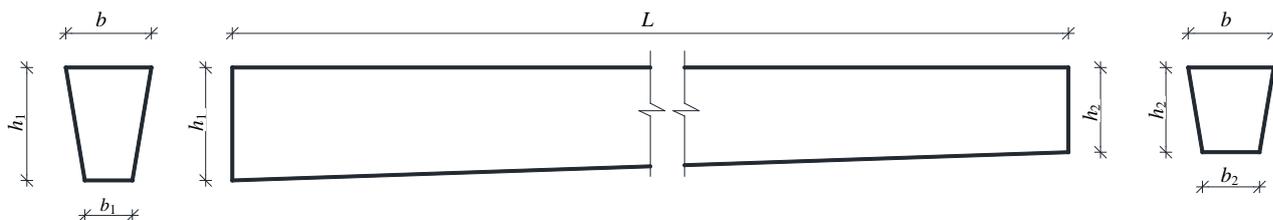


Рис. 1. Геометрия типовых стоек [3]

Fig. 1. Geometry of standard posts [3]

4. Предложить схемы армирования стоек для всей рассматриваемой номенклатуры изделий (раскладку стержней по поперечному сечению стоек).

5. Дорожка станда безопалубочного формования имеет ширину 1,2 м для производства многослойных плит перекрытий шириной 1,2 м. В связи с этим необходимо определить возможность устройства четырех ниток формования и при этом предусмотреть свободный доступ хотя бы к одной боковой грани для установки закладных деталей в свежетоформованный бетон. Кроме того, следует учесть технологическое ограничение размещения групп стержней (группа – это несколько стержней, расположенных близко друг к другу) по ширине дорожки станда (шаг расположения групп стержней 132,5 мм), т. е. расстояние между осями групп стержней по ширине сечения стойки должно быть 132,5 мм (рис. 2).

6. Принять участие в руководстве и организации изготовления опытных партий стоек по разработанному техническому регламенту и предложенной проектной документации.

7. Провести комплекс испытаний стоек из опытных партий на прочность, трещиностойкость и жесткость в заводских условиях.

Типовые предварительно напряженные стойки опор ВЛ 0,4–10 кВ [3, 4] рассчитаны на эксплуатационные и аварийные нагрузки с учетом допущения образования трещин в бетоне размерами 0,10–0,25 мм в зависимости от вида и класса применяемой напрягаемой арматуры, а также с учетом соблюдения нормативных требований по жесткости. Известно, что длительный срок эксплуатации строительных конструкций при одновременных силовых и средовых воздействиях приводит к появлению и развитию повреждений, основными из которых являются коррозионные. При оценке конструктивной безопасности железобетонных конст-

рукций в условиях их напряженно-деформированного состояния такие повреждения необходимо учитывать. Из-за коррозии изменяются прочностные и деформационные параметры бетона сжатой зоны и растянутой арматуры, вызывая нарушение сцепления стержней с бетоном. Это изменяет нормативную высоту сжатой зоны, что может стать причиной хрупкого разрушения железобетонных конструкций при изгибе [8–10]. Повреждения от коррозии приводят к образованию и развитию трещин, отчего снижается жесткость конструкций, что способствует увеличению деформаций.

Условия работы системы ВЛ относятся к тяжелым прежде всего потому, что она не имеет резерва [11]. Выход из строя одного элемента вызывает нарушение функционирования всей системы. Запасы прочности типовых стоек опор ВЛ ограничены и в то же время неопределенны. Надежность сетей до 10 кВ в значительной степени определяется аварийностью поврежденных и дефектных опор [11, 12]. Типичный вариант отказа в работе системы ВЛ – когда нагрузки не превышают расчетных значений, а повреждение железобетонной опоры предопределяется коррозией рабочей арматуры и бетона. Чтобы не допустить аварийных состояний несущих элементов системы ВЛ, необходимо ясно представлять развивающиеся в них разрушительные процессы [13–15].

Стойки и фундаменты для опор ВЛ должны служить 50–70 лет с последующей их заменой. Защитные мероприятия целесообразно предпринимать в первые годы эксплуатации опорных конструкций, когда можно обойтись минимальными затратами. В 10–15-летний период, предшествующий замене, следует все ремонтные работы сократить до минимума [11]. Как правило, защиту от воздействия окружающей среды начинают проводить тогда, когда коррозионные разрушения принимают аварийный характер.

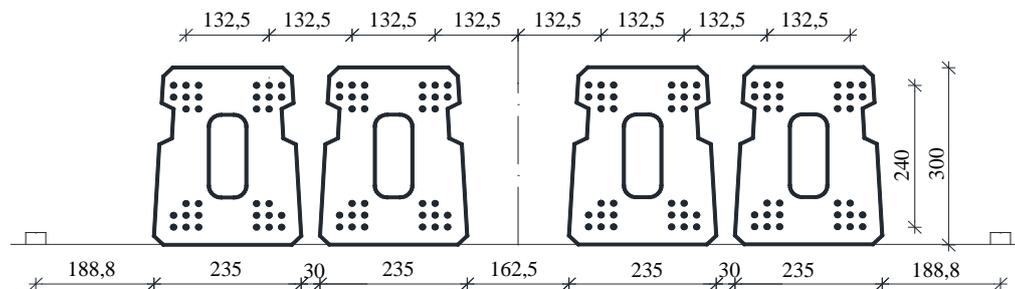


Рис. 2. Расположение производимых изделий (стоек) на поддоне формующей дорожки станда

Fig. 2. Arrangement of manufactured products (posts) on the pallet of the forming lane of the production line

В типовых опорах со стержневой напрягаемой арматурой диаметром 12–14 мм при эксплуатации их в неагрессивных средах трещины раскрытием до 0,5 мм не приведут к аварийным ситуациям. С большой долей вероятности площадь поперечного сечения такой арматуры от коррозии за 40–50 лет эксплуатации не может уменьшиться более чем на 10–15 % от первоначальной [11, 13]. 25-летний опыт эксплуатации опор ВЛ с раскрытием трещин до 0,5 мм показывает, что уменьшение площади сечения стальной стержневой арматуры от коррозии составило не более 5–7 %.

При одинаковой глубине коррозии высокопрочной проволочной арматуры диаметром 5 мм степень коррозионного износа оказывается несравнимо большей, чем стержневой арматуры, а опасность последствий – выше. Поэтому эксплуатировать стойки, армированные высокопрочной проволочной арматурой диаметром 5 мм и менее, с поперечным раскрытием трещин даже на 0,1 мм рискованно, особенно если стойки находятся в условиях агрессивной среды [11–13, 16]. Опасность локального коррозионного поражения высокопрочной проволочной арматуры в зоне поперечных трещин заключается в том, что оно может привести, как было отмечено выше, к хрупкому разрушению стоек. Уменьшение сечения высокопрочной проволочной арматуры в стойках на 60 % вызывает разрыв проволочек без образования шейки [11].

Стойки, изготавливаемые по технологии стенового безопалубочного формования и армированные высокопрочной проволокой 5Вр1400, могут эксплуатироваться без образования в бетоне трещин от действия возможных эксплуатационных нагрузок. Соблюдение требований по трещиностойкости и толщины защитного слоя бетона, применение высокопрочных бетонов предохраняют предварительно напряженную проволочную арматуру стоек опор ВЛ от коррозии и повышают их долговечность [11–13, 17]. К тому же, учитывая особенности эксплуатации стоек опор ВЛ и вероятность их работы в неблагоприятных условиях, риски образования трещин снижаются благодаря высокому уровню предварительного обжатия бетоном высокопрочной проволочной арматуры, что позволяет защитить такую арматуру от коррозии на длительный срок.

Для достижения цели по разработке рассматриваемого инновационного проекта сформулирована первоначальная задача – определение параметров и конфигурации поперечных

сечений стоек опор, изготавливаемых стендовым безопалубочным формованием, с учетом технологии производства и требований заказчика.

Методология

Известно, что одна из важных задач в развитии теории сопротивления железобетона – увеличение пролета конструкции при минимизации размеров ее поперечного сечения. В связи с этой и другими задачами в [18] утверждается, что создание новых и развитие существующих методов расчета бетонных и железобетонных конструкций, обеспечивающих их надежность и долговечность, является основой для разработки современных конструктивных решений зданий и сооружений, снижающих трудоемкость работ и позволяющих получить максимальную экономию материалов. Проектировщики, которые хотят внедрить индивидуальный проект, не могут довольствоваться существующими подходами к расчету железобетонных конструкций, поскольку индивидуальный проект базируется на разнообразии конструктивных решений, отличных от стандартных (например, по конфигурации поперечного сечения конструкции). В связи с этим параметры сечений стоек опор ВЛ назначались исходя из следующих основных требований:

- обеспечение необходимой прочности, трещиностойкости и жесткости стойки;
- изделие (стойка) должно быть универсальным и технологичным.

Фактор универсальности стоек опор ВЛ безопалубочного формования заключается в возможности выпускать их любой необходимой для потребителя длины и для различных эксплуатационных нагрузок. С позиции инновационного внедрения стоек опор ВЛ технологичность – это возможность на современном оборудовании (линиях стенового безопалубочного формования) производить изделия (стойки) в промышленном объеме с трансформированными геометрическими параметрами типовых стоек, не ухудшающими их прочностные и жесткостные характеристики [19].

Действие эксплуатационных нагрузок на стойку вызывает в ней изгибающие и в меньшей степени крутящие моменты (значение отношения крутящего момента к изгибающему – в пределах 0,1–0,4) [20]. Учитывая эту специфику, поперечное сечение стоек предложено в форме трапеции (четырехугольника). По сравнению с типовой СВ в поперечном сечении

стоек опор ВЛ, изготавливаемых по технологии стендового безопалубочного формования, нижняя грань трапеции длиннее верхней. Такое сечение принято для неизменяемости формы свежеотформованного бетона. Предварительно напряженная проволочная арматура расположена во всех угловых участках стойки группами с одинаковым количеством проволок в каждой группе (по аналогии с расположением предварительно напряженной стержневой арматуры в углах типовых СВ). Таким образом, форма и размеры поперечного сечения стоек зависят от:

- площади угловых участков сечения с наибольшим количеством проволочной арматуры в группе с учетом того, что передаточную прочность бетона R_{bp} (к моменту его обжатия) следует назначать не менее 15 МПа и 50 % принятого класса бетона по прочности на сжатие [7];
- толщины защитного слоя бетона, предохраняющего напрягаемую проволочную арматуру стойки от коррозии;
- прочности и трещиностойкости стойки;
- ограничения высоты стойки по технологии изготовления конструкций стендовым безопалубочным формованием.

Известно, что в средней части поперечного сечения железобетонных элементов бетон при изгибе и растяжении практически не работает. Поэтому принцип проектирования плит перекрытий заключается в исключении максимального объема бетона из срединной растянутой зоны сечения, при этом остаются вертикальные ребра для обеспечения прочности плиты по наклонным сечениям [21]. Таким образом, если в средней части поперечного сечения железобетонной стойки опоры ВЛ оставить полость по всей длине стойки, то эта полость (пустота) не ухудшит прочностные и жесткостные характеристики стойки для всей номенклатуры изделий. Уменьшение материалоемкости стойки без снижения ее прочности обеспечивает экономическую эффективность конструкции.

Из опыта проектирования многопустотных плит перекрытий известно, что при увеличении степени пустотности плит сверх критериальной величины значительно снижается их несущая способность по нормальным сечениям в связи с переходом нейтральной линии в межпустотные перегородки (ребра) плиты, а также уменьшается прочность по наклонным сечениям на опорных участках. Кроме того, увеличивается деформативность плиты, т. е. снижается ее жесткость. Такое же явление обнаруживается в полый

стойке. Поэтому решение рассматриваемой задачи конкретизируется. К тому же не надо изыскивать оптимальное сочетание высоты и параметров конфигурации поперечного сечения стойки, поскольку критерий высоты сечения задан.

Расчет стоек опор ВЛ, изготавливаемых по технологии стендового безопалубочного формования и армированных стержнями высокопрочной проволочной арматуры диаметром 5 мм класса Вр1400, проводили согласно [6, 15]; трещины в теле бетона от действия эксплуатационных нагрузок не образовывались. Критериальными величинами при расчете трещиностойкости таких стоек служили расчетные изгибающие моменты в плоскости большей и меньшей жесткости типовых стоек (в зависимости от их марок), приведенные в [3]. Прогибы стоек определяли по значениям изгибающих моментов, воспринимаемых стойками от действия расчетной контрольной нагрузки по трещиностойкости. При этом критерием служили контрольные нагрузки по жесткости на типовые стойки с учетом допускаемых в [3] величин ширины раскрытия трещин.

Результаты исследований

1. Для стоек длиной до 11,0 м предложено сплошное трапециевидальное сечение с параметрами: $h = 245$ мм, $b = 150$ мм – верхняя грань; $b_1 = 180$ мм – нижняя грань. Для стоек длиной от 11,0 до 16,4 м – трапециевидальное сечение с параметрами: $h = 300$ мм, $b = 205$ мм; $b_1 = 235$ мм; а в средней части этих стоек предусмотрена полость по всей их длине.

2. На рис. 3 приведены поперечные сечения стоек стендового безопалубочного формования для опор ВЛ напряжением 0,4–10 кВ. При армировании опор предусмотрено максимальное количество напрягаемой проволочной арматуры исходя из наибольшего расчетного усилия по трещиностойкости, которое может воспринять каждое сечение.

3. Прогибы предлагаемых стоек при действии расчетной контрольной нагрузки по трещиностойкости значительно меньше прогибов типовых стоек (в 4,54–7,60 раза – в зависимости от рассматриваемых марок стоек), приведенных в [3].

4. Для строповки стоек при их транспортировании и монтаже предусмотрены два сквозных отверстия по боковым граням (рис. 3). Отверстия, расположенные вдоль вертикальных осей поперечных сечений предлагаемых стоек и предусмотренные для крепления траверс и опорных плит, условно не показаны.

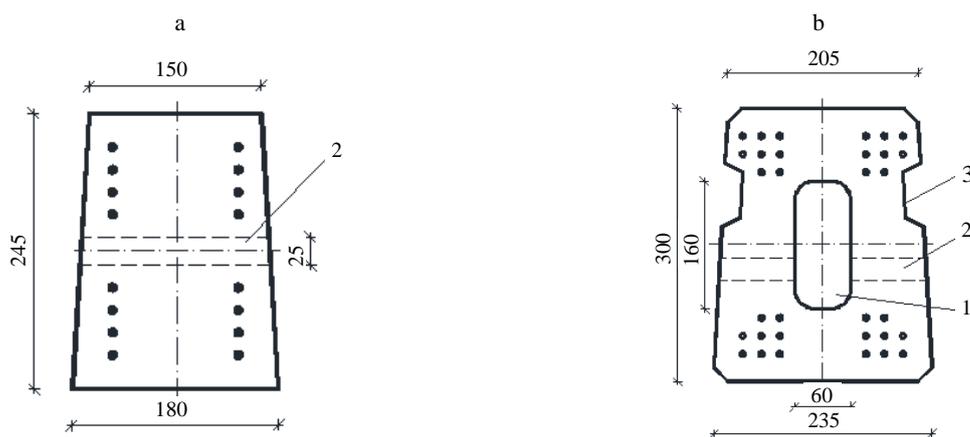


Рис. 3. Поперечные сечения стоек стандового безопалубочного формования для опор воздушных линий напряжением 0,4–10 кВ: а – стойка сплошного сечения; б – полая стойка; 1 – полость; 2 – отверстие для строповки; 3 – паз (используется для первого подъема изделия с поддона станда специальным грузозахватным приспособлением)

Fig. 3. Cross-sections of posts made by long-line formwork-free shaping for overhead lines of 0.4–10 kV voltage: а – solid section post; б – hollow post; 1 – cavity; 2 – hole for slinging; 3 – groove (used for the first lifting of the product from the production line pallet with a special lifting device)

5. Устройство заземляющих проводников в стойке со сплошным сечением производится по аналогии с устройством такого проводника в типовой стойке [3]. В полый стойке заземляющий проводник устраивается в полости.

6. Рекомендовано расположение производимых изделий (стоек) на поддоне формочной дорожки станда со свободным доступом к одной из боковых граней каждой из четырех бетонных монолитных лент со стойкообразным сечением (рис. 2).

7. На предлагаемое поперечное сечение полых стоек, производимых стандовым безопалубочным формованием для опор ВЛ напряжением 0,4–10 кВ, получен патент на полезную модель в Агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан [22].

ВЫВОДЫ

1. При армировании предлагаемых стоек по всей номенклатуре изделий стандового безопалубочного формования расходуется в среднем в 2,3 раза меньше арматурной стали, чем для типовых вибрированных стоек по всей номенклатуре изделий, приведенной в [3, 4].

2. Изготовление стоек по технологии стандового безопалубочного формования для опор воздушных линий имеет следующие преимуще-

щества по сравнению с производством железобетонных вибрированных стоек по типовой базе номенклатуры изделий [3, 4]:

- удешевление стоимости;
- универсальность и технологичность;
- гарантированное качество.

3. В связи с тем, что в стойках стандового безопалубочного формования отсутствует возможность появления трещин в процессе эксплуатации, увеличивается срок их службы.

4. Ведутся работы по решению таких задач, как:

- оценка трещиностойкости и прочности контрольными испытаниями стоек из опытно-промышленных партий для возможности производства стоек стандового безопалубочного формования для опор воздушных линий в промышленном объеме;
- оптимизация расхода высокопрочной проволочной арматуры в стойках разной длины при различных значениях эксплуатационных нагрузок – вне типовой базы номенклатуры изделий.

5. По результатам исследований разработаны проекты технических условий и проектной документации на производство стоек стандового безопалубочного формования по предлагаемой номенклатуре изделий (стоек) для опор воздушных линий напряжением 0,4–10 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсанов, М. И. Анализ эффективности применения композитных опор в электрических сетях Республики Беларусь / М. И. Фурсанов, П. А. Сазонов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 15–23. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-15-23>.
2. Блажко, В. П. О применении многопустотных плит безопалубочного формования в панельных и каркасных зданиях / В. П. Блажко // Жилищное строительство. 2013. № 2–3. С. 7–10.
3. Стойки железобетонные вибрированные для опор ВЛ 0,4–10 кВ: ТУ 5863-007-00113557-94. М.: АО «РОСЭП», 1994. 16 с.
4. Стойки железобетонные предварительно напряженные вибрированные для опор воздушных линий электропередач напряжением 0,4–10 кВ: О'zDSt 3062:2016. Введ. 18.02.2016. Ташкент: Узстандарт, 2016. 25 с.
5. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур: КМК 2.03.01–96. Ташкент: Госкомархитектстрой, 1998. 84 с.
6. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: СП 63.13330.2012. Введ. 01.01.2013. М.: М-во регион. развития Рос. Федер., 2015. 168 с.
7. Методическое пособие по расчету предварительно напряженных железобетонных конструкций: Пособие к СП 63.13330. М.: Минстрой, 2015. 169 с.
8. Меркулов, С. И. Конструктивная безопасность эксплуатационных железобетонных конструкций / С. И. Меркулов // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 4. С. 53–54.
9. Бондаренко, В. М. Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций / В. М. Бондаренко // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5. С. 13–17.
10. Бондаренко, В. М. Концепции и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28–21.
11. Кудрявцев, А. А. Несущая способность опорных конструкций контактной сети / А. А. Кудрявцев. М.: Транспорт, 1988. 160 с.
12. Оценка несущей способности дефектных опор воздушных линий 6–10 кВ / Л. Д. Сафрошкина [и др.] // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, № 5. С. 131–133.
13. Мигунов, В. Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами. Ч. 1 / В. Н. Мигунов. Пенза: ПГУАС, 2003. 332 с.
14. Овчинников, И. И. Моделирование кинетики деформирования конструкций в специальных эксплуатационных средах / И. И. Овчинников. Пенза: ПГУАС, 2014. 280 с.
15. Щуцкий, В. Л. Прочность конических опор линий электропередач с учетом ограничений по второй группе предельных состояний [Электронный ресурс] / В. Л. Щуцкий, А. В. Шилов, Т. Д. Талипова // Научное ведение. 2016. Т. 8, № 2. Режим доступа: <https://nauko.vedenie.ru/PDF/29TVN216.pdf>.
16. Mangat, P. Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement / P. Mangat, M. Elgaft // ACI Structural Journal. 1999. Vol. 96, No 1. P. 149–158. <https://doi.org/10.14359/606>.
17. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]. М.: Стройиздат. 1980. 536 с.
18. Кодыш, Э. Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций / Э. Н. Кодыш, Н. Н. Трекин // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 25–28.
19. Mirzaev, P. Optimization of Geometrical Parameters of Hollow-Core Slabs by Formwork-Free Shaping for Construction in Seismic Areas / P. Mirzaev, S. Mirzaev // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2020. Vol. 8, Iss. 6. P. 4973–4977. <https://doi.org/10.35940/ijrte.f9192.038620>.
20. Короткевич, М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть / М. А. Короткевич. М.: Высш. шк., 2010. 574 с.
21. Кодыш, Э. Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям / Э. Н. Кодыш, Н. К. Никитин, Н. Н. Трекин. М.: АСВ, 2010. 352 с.
22. Бетонная стойка для линии электропередачи: пат. № FAP 01737 Узбекистан / П. Т. Мирзаев, К. С. Умаров, З. П. Шамансурова. Оpubл. 29.11.2021.

Поступила 06.12.2021

Подписана в печать 08.02.2022

Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. Fursanov M. I., Sazonov P. A. (2019) Analysis of the Efficiency of Composite Supports in Electric Networks of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 15–23. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-15-23> (in Russian).
2. Blazhko V. P. (2013) On the Use of Hollow-Core Slabs of Formwork-Free Shaping in Panel and Frame Buildings. *Zhilishchnoe Stroitelstvo = Housing Construction*, (2–3), 7–10 (in Russian).
3. Technical Specifications 5863-007-00113557-94. *Reinforced Concrete Vibrating Posts for Supports of Overhead Lines 0.4–10 kV*. Moscow, Publishing House of JSC "ROSEP", 1994. 16 (in Russian).
4. O'zDSt 3062:2016. *Reinforced Concrete Prestressed Vibrated Posts for Supports of Overhead Power Lines with Voltage 0.4–10 kV*. Tashkent, Uzstandart Publ., 2016. 25 (in Russian).
5. KMK 2.03.01–96. *Concrete and Reinforced Concrete Structures Designed to Operate Under Conditions of*

- Elevated and High Temperatures*. Tashkent, Goskomarkhitektstroj Publ., 1998. 84 (in Russian).
6. Code of Practice 63.13330.2012. *Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions*. Moscow, Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2015. 168 (in Russian).
 7. Code of Practice 63.13330. *Methodological Guide for the Calculation of Prestressed Reinforced Concrete Structures*. Moscow, Minstroj Publ., 2015. 169 (in Russian).
 8. Merkulov S. I. (2009) Structural Safety of Operational Reinforced Concrete Structures. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, (4), 53–54 (in Russian).
 9. Bondarenko V. M. (2009) Corrosion Damage as a Cause of Avalanche Destruction of Reinforced Concrete Structures. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschot Sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, (5), 13–17 (in Russian).
 10. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. (2013) Concepts and Directions of Development of the Theory of Constructive Safety of Buildings and Structures under Force and Environmental Influences. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, (2), 28–21 (in Russian).
 11. Kudryavtsev A. A. (1988) *Bearing Capacity of Support Structures of the Contact Network*. Moscow, Transport Publ. 160 (in Russian).
 12. Safroshkina L. D., Gunger Yu. R., Kandaev V. A., Demin Yu. V., Khromov E. G., Zuikov V. V. Assessment of Bearing Capacity of Defective Supports of Overhead Lines 6–10 kV. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 308 (5), 131–133 (in Russian).
 13. Migunov V. N. (2003) *Experimental-Theoretical Study of Corrosion and Durability of Reinforced Concrete Structures with Cracks. Part 1*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction. 332 (in Russian).
 14. Ovchinnikov I. I. (2014) *Modeling of the Kinetics of Deformation of Structures in Special Operating Environments*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction. 280 (in Russian).
 15. Shchutskiy V. L., Shilov A. V., Talipova T. D. (2016) Strength of the Conical Supports of Power Transmission Lines Taking into Account the Restrictions on the Second Group of Limiting States. *Naukovedenie [Science Study]*, 8 (2). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/29TVN216.pdf> (in Russian).
 16. Mangat P., Elgaft M. (1999) Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 96 (1), 149–158. <https://doi.org/10.14359/606>.
 17. Moskvina V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., Guzeev E. A. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of their Protection*. Moscow, Stroizdat Publ. 536 (in Russian).
 18. Kodysh E. N., Trekin N. N. (2016) Improvement of the Regulatory Framework for the Design of Reinforced Concrete Structures. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, (6), 25–28 (in Russian).
 19. Mirzaev P., Mirzaev S. (2020) Optimization of Geometrical Parameters of Hollow-Core Slabs by Formwork-Free Shaping for Construction in Seismic Areas. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8 (6), 4973–4977. <https://doi.org/10.35940/ijrte.f9192.038620>.
 20. Korotkevich M. A. (2010) *Design of Power Transmission Lines. Mechanical Part*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 574 (in Russian).
 21. Kodysh E. N., Nikitin N. K., Trekin N. N. (2010) *Calculation of Reinforced Concrete Structures Made of Heavy Concrete in Terms of Strength, Crack Resistance and Deformations*. Moscow, ASV Publ. 352 (in Russian).
 22. Mirzaev P. T., Umarov K. S., Shamansurova Z. P. (2021) *Concrete Rack for Power Lines*. Patent No FAP 01737 Uzbekistan. State Registration 29.11.2021 (in Russian).

Received: 06.12.2021

Accepted: 08.02.2022

Published online: 29.07.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330>

УДК 656.13.05

Повышение эффективности применения информации при организации перевозок пассажиров в городах

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾, С. С. Семченков¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Н. Ларин²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Проблема организации перевозок пассажиров в городах приобретает все большую значимость. Ситуация осложняется еще и тем, что рост автомобилизации приводит к уменьшению пропускной способности улиц, загрязнению окружающей среды, разрушению экосистем, а также увеличивает социальную напряженность. Стало очевидным, что создание городов, удобных для жизни, невозможно без системы маршрутного пассажирского транспорта. И здесь особую актуальность приобретает улучшение качества перевозок пассажиров в городах путем повышения эффективности применения информации, требуемой для управления процессом перевозок. Возникает необходимость в создании единого информационного пространства в области перевозок, вовлечении в него всех участников процесса. Это, в свою очередь, поможет предоставить достоверную информацию пользователям (пассажирам) маршрутного пассажирского транспорта, повысит его надежность и доверие пассажиров к нему. Важную роль здесь играют информационное обеспечение процесса управления перевозками с выбором правильной модели сбора достоверной информации о движении маршрутных транспортных средств и верное ее использование. Благодаря этому можно повысить надежность маршрутного пассажирского транспорта, а достоверная информация о его движении будет способствовать повышению доверия пользователей к маршрутному пассажирскому транспорту и в то же время дисциплинировать перевозчиков и оператора.

Ключевые слова: маршрутный пассажирский транспорт, организация перевозок, достоверная информация, модель диспетчерского управления

Для цитирования: Капский, Д. В. Повышение эффективности применения информации при организации перевозок пассажиров в городах / Д. В. Капский, С. С. Семченков, О. Н. Ларин // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 323–330. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330>

Improving the Efficiency of Information Application in the Organization of Passenger Transportation in Cities

D. V. Kapskiy¹⁾, S. S. Semchenkov¹⁾, O. N. Larin²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The problem of organizing passenger transportation in cities is becoming more and more important every day. The situation is aggravated by the fact that the spontaneous growth of motorization leads to a drop in the capacity of streets,

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-05-48
d.kapsky@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-05-48
d.kapsky@bntu.by

environmental pollution, destruction of ecosystems, and an increase in social tension. It became obvious that the creation of cities convenient for life is impossible without a system of route passenger transport. And here, improvement of the quality of passenger transportation in cities by increasing the efficiency of using the information necessary to manage the transportation process is of particular relevance. There is a need to create a unified information space in the field of transportation, involving all participants in the process. This, in turn, will help to provide reliable information to users (passengers) of route passenger transport, increase its reliability and passengers' trust in it. An important role here is played by the information support of the transportation management process with the choice of the correct model for collecting reliable information about the movement of route vehicles and its correct use, which will lead to an increase in the reliability of the route passenger transport, and the provision of open reliable information about the movement of route vehicles will contribute to increasing user confidence in route passenger transport and at the same time discipline carriers and operators.

Keywords: route passenger transport, organization of transportation, reliable information, dispatch control model

For citation: Kapskiy D. V., Semchenkov S. S., Larin O. N. (2022) Improving the Efficiency of Information Application in the Organization of Passenger Transportation in Cities. *Science and Technique*. 21 (4), 323–330. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330> (in Russian)

Введение

Создание благоприятного для жизни и работы городского пространства невозможно без развитой системы маршрутного пассажирского транспорта, представляющей четкий и слаженный механизм, сочетающий в себе различные виды транспорта и предлагающий достойную и эффективную альтернативу личным автомобилям. Так, население г. Минска, расположенного на площади 348,8 км², составляет 2020,6 тыс. чел., в том числе 1067,1 тыс. чел. потенциально совершают перемещения по городу, связанные с работой. По данным Национального статистического комитета, в промышленном производстве занято около 19,5 % работающего населения, в строительстве – 9,4 %, в торговле и сфере коммерческих услуг – 19,3 %, в связи и на транспорте – 7,9 %, в сфере образования – 8,6 %, в области здравоохранения и сопутствующих услуг – 5,1 %, в прочих областях экономики – 30,2 % от общего числа занятых [1]. Массовые перевозки пассажиров в Минске осуществляются наземным маршрутным пассажирским транспортом, которым в год перевозится 490 млн пассажиров [2] (в среднем 1,3 млн в день), и метрополитеном, ежегодно перевозящим 294 млн пассажиров [3] (в среднем 0,8 млн в день). Протяженность маршрутной сети наземного пассажирского транспорта составляет 6326 км, при этом на 215 городских автобусных, 60 троллейбусных и восемь трамвайных маршрутов выходят 1115 автобусов, 600 троллейбусов и 98 трамваев.

В Минске зарегистрировано 900 тыс. автомобилей. Рост автомобилизации, увеличение количества автомобилей, находящихся в частной собственности, – конкуренция маршрутному пассажирскому транспорту. Поэтому для развития последнего необходимы системный подход и рационально организованная его работа, чтобы своевременно реагировать на изменяющуюся обстановку [4]. В условиях нечеткого реагирования на ситуацию возникает некий замкнутый круг (рис. 1), когда рост автомобилизации в условиях сложившейся уличной сети приводит к ее перегрузке.



Рис. 1. Замкнутый круг автомобилизации

Fig. 1. Vicious circle of motorization

Это ухудшает условия движения маршрутных транспортных средств (снижая их скорость) и качество оказания услуг по перевозке пассажиров, что, в свою очередь, приводит к потере пользователей (пассажиров) таким транспортом, дальнейшему сокращению количества маршрутных транспортных средств на маршрутах (возникает впечатление, что маршрут не нужен, так как микроавтобусы недостаточно заполнены). Данная ситуация еще больше отводит пассажиров от маршрутного пассажирского транспорта в пользу личного, что вновь ведет к росту автомобилизации, – и так круг замыкается.

В сложившейся ситуации необходимо предпринимать все возможные меры и использовать любые доступные способы для того, чтобы замкнутый круг был разорван. Особую актуальность приобретает улучшение организации перевозок пассажиров в городах путем повышения эффективности применения информации, необходимой для управления данным процессом.

Выбор модели организации перевозок маршрутным пассажирским транспортом

Одно из приоритетных направлений в увеличении роли маршрутного пассажирского транспорта – повышение его привлекательности, которая определяется: безопасностью (общественная безопасность, безопасность дорожного движения), скоростью сообщения (снижение затрат для перевозчиков, повышение скорости сообщения для пассажира), комфортабельностью и доступностью (низкопольные маршрутные транспортные средства, инфраструктура, современные транспортные средства с системами климат-контроля и т. д.), удобством пользования (различные способы оплаты проезда), информативностью (доступность информации о маршрутном транспорте и качественное ее представление), удобным расписанием и гарантированной регулярностью движения, надежностью. Все это делает маршрутный транспорт привлекательным. Большое значение здесь придается роли оператора перевозок пассажиров, который по сути является организатором процесса (рис. 2), а также во-

влечению его в управление движением маршрутных транспортных средств [5]. Такой подход способствует стабильности транспортной системы в городе, содействию реализации концепции устойчивого развития, поддержанию устойчивой мобильности всех категорий населения, что обеспечит координированную работу всех видов маршрутного пассажирского транспорта на территории города или населенного пункта. При этом сами транспортные средства необязательно должны принадлежать одному перевозчику.

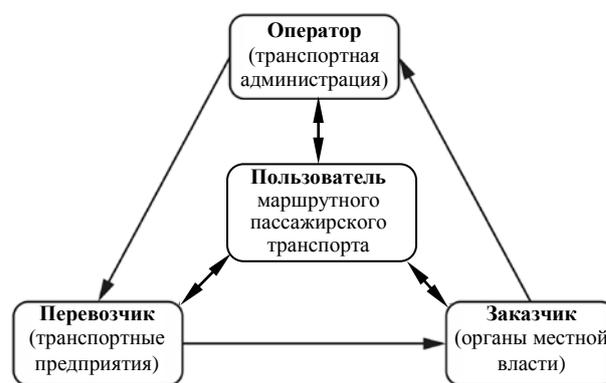


Рис. 2. Процесс перевозок пассажиров маршрутным пассажирским транспортом в современных условиях его организации

Fig. 2. Passenger transportation process by route passenger transport in modern conditions of its organization

Роль оператора должна состоять не только в формировании маршрутной сети, но и в качественной организации перевозок пассажиров в регулярном сообщении. Сегодня Беларусь идет по пути выделения операторов в независимый орган управления и уходит от практики, когда функции оператора фактически передавались транспортному предприятию, выполняющему основной объем перевозок в городе или населенном пункте. Для поддержания деятельности оператора необходимо создание единой информационной платформы в сфере перевозок пассажиров маршрутным пассажирским транспортом, которая объединит и предоставит доступ к информации всем участникам этого процесса. Такая информационная платформа позволит установить связи между всеми участниками процесса перевозок пассажиров маршрутным пассажирским транспортом и обеспе-

чит их достоверной актуальной информацией о маршрутной сети, расписании движения, потребностях в перевозках, выполненной работе, об оплате проезда, условиях работы на созданной маршрутной сети и т. д. [6].

Следует отметить, что оперативное управление движением маршрутных транспортных средств должно стать одной из основных функций оператора с его главным подразделением – центром управления перевозками, который в последующем должен быть интегрирован в единое цифровое информационное пространство с центром управления дорожным движением [7]. При этом работа центра управления перевозками должна нести в себе не только контрольную функцию, но и за счет унификации подходов к получению и обработке исходной информации о местоположении транспортных средств обрести новую функцию, заключающуюся в руководстве движением маршрутного пассажирского транспорта, фактически «обезличенного» (по отношению к принадлежности маршрутного транспортного средства к тому или иному перевозчику) для инженера, обеспечивающего данное руководство в центре управления перевозками [8].

Особо актуальной становится проблема правильного выбора модели диспетчерского управления движением маршрутных транспортных средств. Проведенные авторами исследования показывают, что во многих городах используется система управления таким транспортом, основанная на получении данных о его местоположении с помощью средств системы глобального позиционирования (GPS), передаваемых в режиме реального времени посредством GSM-связи, пройдя путь использования автоматизированных систем управления движением автобусов, троллейбусов, трамваев, построенных на методе передачи сведений о местонахождении транспортного средства от беспроводных датчиков короткой дальности или датчиков индукционного типа по выделенным телефонным линиям [9, 10]. Так, в Минске автоматизированная система управления движением автобусов отслеживала работу транспортных средств с помощью аппаратных контрольных пунктов, работа которых основывалась на принципе связи короткой дальности,

а монтаж каждого контрольного пункта требовал вскрытия верхнего слоя дорожного полотна, укладки контура, прокладки к нему физических линий выделенной связи. В то же время маршрутная сеть развивалась быстрыми темпами, удовлетворяя потребности в перевозках в современном городе. Это привело к тому, что у большинства маршрутов не было необходимого количества контрольных точек, а ряд автобусных маршрутов имел всего по одному контрольному пункту [9, 11]. Далее, получив в свое распоряжение средства GPS, многие предприятия пошли по ложному пути, не перестраивая свои системы управления движением, а лишь заменяя аппаратные контрольные пункты виртуальными, получающими данные о проследовании транспортным средством определенных границ, обозначенных для каждого контрольного пункта, очерченных радиусом окружности или площадью фигуры, образованной ломаной линией. Некоторые выстраивали новые системы управления движением транспорта, однако, к сожалению, все равно основывались на описанных выше (привычных им) принципах организации. Это привело к тому, что, имея в распоряжении широкодоступные сегодня средства GPS и GSM-связи, позволяющие легко и непрерывно получать положение транспортного средства (при необходимости с интервалами менее 1 с), многие предприятия попросту не смогли воспользоваться данной информацией для принятия оперативных решений диспетчерского управления. Фактически такие системы предназначены для контроля работы транспортного средства на маршруте, а не для оперативного диспетчерского управления и принятия решений. Кроме того, эти системы не могут качественно интегрироваться в систему информирования пассажиров о времени прибытия транспортного средства, имеют большие проблемы с достоверностью и доступностью данных в случае, когда транспорт следует по измененному маршруту или для восстановления нарушенного движения идет по сокращенному либо измененному маршруту.

Основная идея дискретной модели (рис. 3) состояла в том, что по маршруту располагались контрольные пункты: на конечных остано-

ках – терминальные контрольные пункты (ТКП), на маршруте – промежуточные контрольные пункты (ПКП). Фактически транспортное средство, достигая очередного контрольного пункта, по команде водителя передавало по беспроводной связи определенный уникальный код, который принимался контрольным пунктом и отправлялся в центр обработки данных по выделенным линиям связи. Транспортные средства, находившиеся на участках маршрута между контрольными пунктами, выпадали из поля зрения системы управления и их работа не могла быть оперативно отслежена. Применение подобных систем ограничивалось контролем прохождения контрольных пунктов и не являлось средством оперативного управления движением ввиду недостаточности достоверной информации.

Как уже было сказано, ряд предприятий пошел по ложному пути, заменив в своих системах аппаратные контрольные пункты виртуальными, что фактически привело к появлению псевдодискретной модели (рис. 4). При этом наращивание числа контрольных пунктов в такой модели не приводит к нужному результату из-за ложного распознавания на узких улицах или на трамвайных линиях, когда траектории движения встречных транспортных средств расположены близко друг к другу.

При этом следует заметить, что псевдодискретная модель сбора информации, как правило, для самоуспокоения дополняется визуализацией (рис. 5), показывающей местоположение транспортных средств на картографической основе, взятой из открытых источников, но неупорядоченной маршрутной сети города.

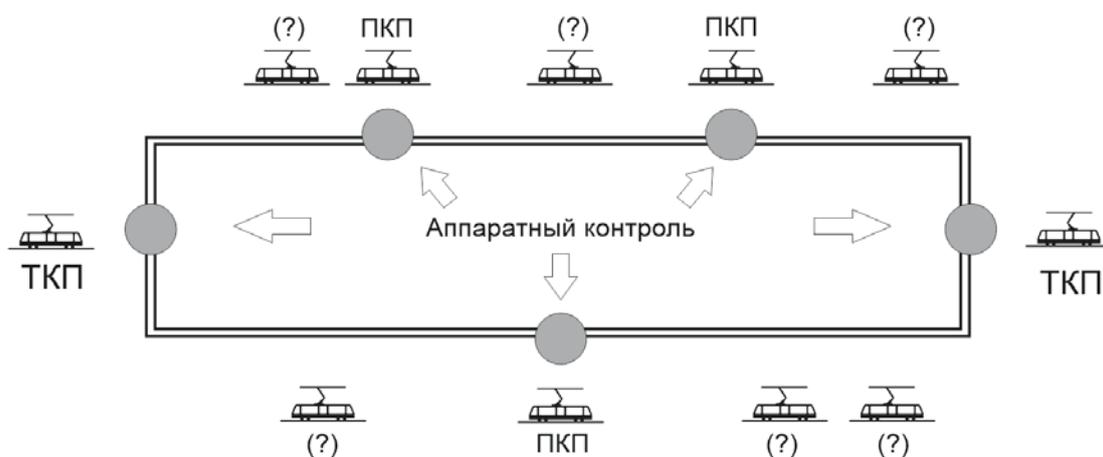


Рис. 3. Дискретная модель

Fig. 3. Discrete model

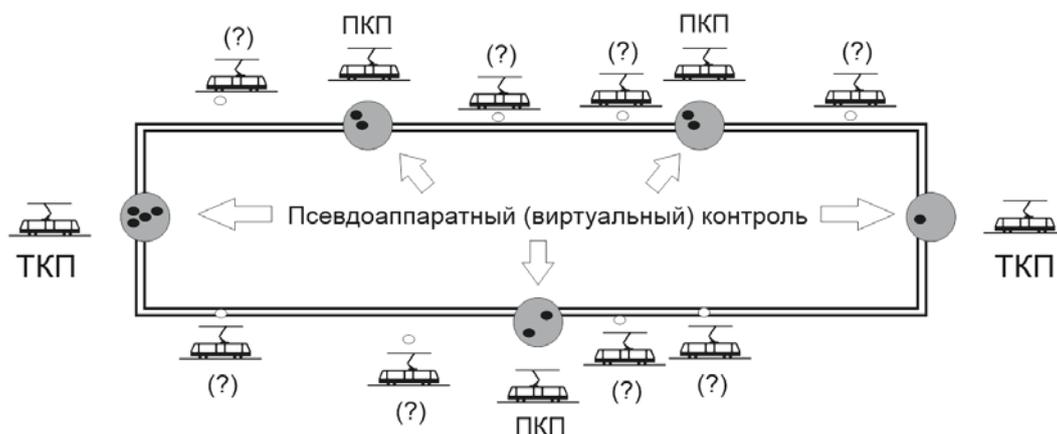


Рис. 4. Псевдодискретная модель

Fig. 4. Pseudo-discrete model

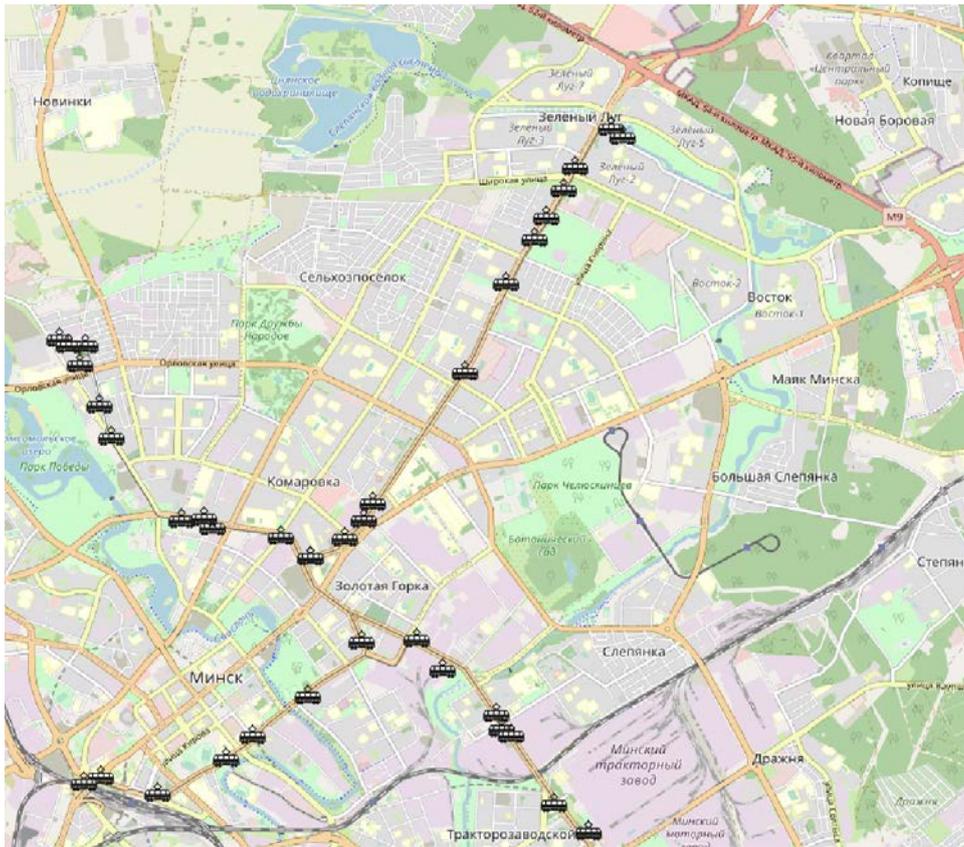


Рис. 5. Пример визуализации в псевдодискретной модели
 Fig. 5. Example of visualization in a pseudo-discrete model

С учетом изложенного авторы предлагают подход к применению перманентной модели (рис. 6), которая на подготовительном этапе предполагает формирование (цифровую прокладку с использованием фактических координат) точной трассы маршрута и нанесение на нее последовательно расположенных остановочных пунктов с условными обозначениями. При обработке информации, получаемой от транспортных средств, координаты маршрутного транспортного средства с помощью несложных

математических методов постоянно проецируются на линию трассы. Тем самым устраняются погрешности позиционирования, а так как при этом осуществляется непрерывное отслеживание того, в каком направлении движется транспортное средство, и учитывается последовательность проследования остановочных пунктов, то исключаются случаи ложного определения направления движения, имеющие место в псевдодискретной модели.

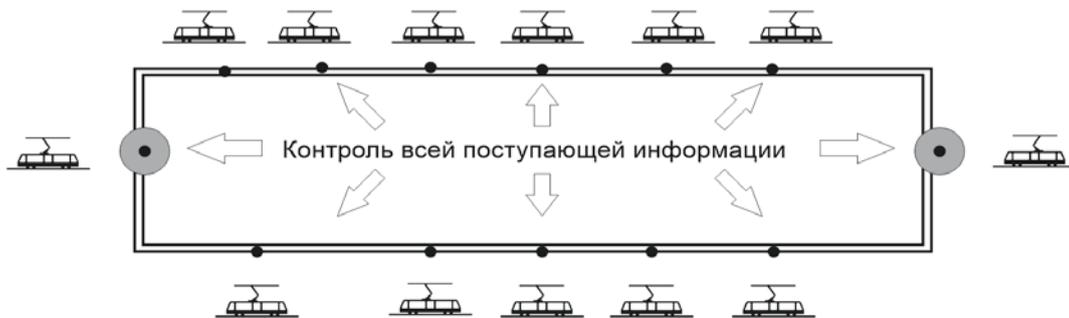


Рис. 6. Перманентная модель
 Fig. 6. Permanent model

В условиях движения в городах трасса каждого маршрута не только формализуется, но и в рамках паспортизации дополняется всеми возможными вариантами оборота транспортных средств на маршрутной сети с целью оперативного принятия решений и отслеживания работы микроавтобусов. Направляя маршрутное транспортное средство в сокращенный или измененный рейс, инженер центра управления движением предоставляет ему определенный вариант регулирования движения, в результате транспорт работает по оперативному расписанию, а не выбывает из него. Этим решается еще одна проблема, состоящая в предоставлении недостоверной информации пассажиру (например, на табло, расположенных на остановочных пунктах) о времени прибытия маршрутного транспортного средства и недостоверной информации движения на терминал водителя, когда некоторые машины по решению инженера

следуют по измененному маршруту. Пример использования данной модели для оперативного управления движением маршрутных транспортных средств приведен на рис. 7.

Функции инженера центра управления движением в предлагаемой модели состоят не только в контроле за наличием на линии маршрутных транспортных средств и факта их движения, но и в том, чтобы обеспечивать и организовывать максимально точное выполнение установленного расписания движения, соблюдение интервалов движения, непрерывное движение транспорта на маршруте, своевременно принимая соответствующие меры. Более того, предоставление открытой достоверной информации о движении маршрутных транспортных средств поспособствует повышению доверия пользователей к маршрутному пассажирскому транспорту и в то же время дисциплинирует перевозчиков и оператора.

Экран оперативного управления движением пассажирского транспорта
(для маршрута трамвая № 1)

Маршрут 1
ЗЛГ-МСН
17:28

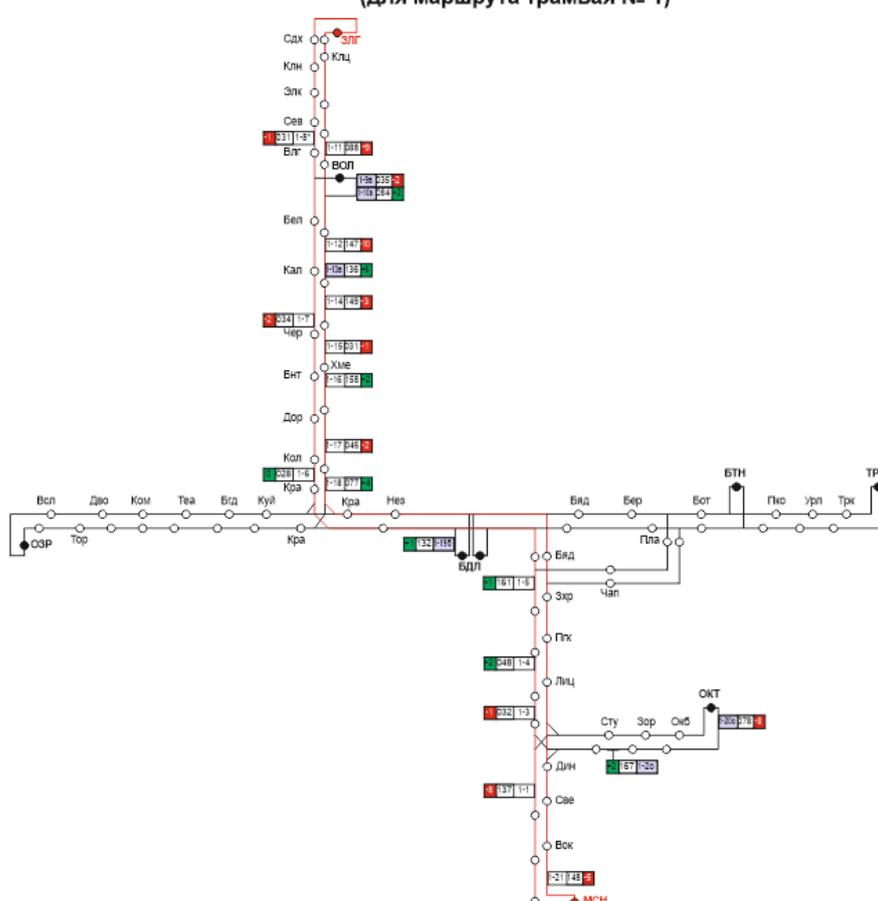


Рис. 7. Пример экрана (виртуальной мнемосхемы) оперативного управления движением маршрутных транспортных средств

Fig. 7. Example of a screen (virtual mnemonic diagram) for the operational control of route vehicles movement

ВЫВОДЫ

1. Совершенствование работы маршрутного пассажирского транспорта возможно только при совместных усилиях заинтересованных сторон в различных направлениях. Именно деятельность в этих направлениях создает предпосылки для того, чтобы маршрутный пассажирский транспорт стал действительной альтернативой частному, предоставляя удобные способы передвижения по городу.

2. Единая информационная платформа будет способствовать цифровизации при организации процесса перевозки пассажиров в городах, что, несомненно, повысит привлекательность маршрутного пассажирского транспорта и качество оказываемых им услуг. Создание единой информационной платформы с использованием предлагаемого подхода к оперативному управлению движением повысит привлекательность маршрутного пассажирского транспорта, усилит его роль в городах, укрепит позиции и престиж данного вида транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/>. Дата доступа: 01.10.2021.
2. В 2019 г. наземным общественным транспортом столицы перевезено на 24 млн пассажиров больше, чем в 2018-м [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minsknews.by/v-2019-g-nazemnym-obshhestvennym-transportom-stoliczy-perevezeno-na-34-mln-passazhirov-bolshechem-v-2018-m/>. Дата доступа: 01.10.2021.
3. Минский метрополитен, официальный сайт Минского метро [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://metropoliten.by/>. Дата доступа: 01.10.2021.
4. Капский, Д. В. Роль организации дорожного движения в транспортной системе города / Д. В. Капский // Транспорт и сервис: сб. науч. тр. / отв. ред. С. И. Корягин. Калининград, 2013. Вып. 2: Функционирование устойчивых транспортных городских систем. С. 47–51.
5. О внесении изменений и дополнений в Правила автомобильных перевозок пассажиров [Электронный ресурс]: пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 31.08.2018 № 636 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21800636&p1=1>. Дата доступа: 15.07.2021.
6. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2008. 242 с.
7. Капский, Д. В. Методология повышения качества дорожного движения / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2018. 370 с.
8. Автоматизированные системы управления дорожным движением / Д. В. Капский [и др.]. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2015. 367 с.
9. Транспортное моделирование и оценка условий дорожного движения с использованием навигационной информации / Д. В. Капский [и др.]. Минск: Капитал Принт, 2018. 144 с.
10. Капский, Д. В. Повышение качества дорожного движения в городах / Д. В. Капский // Транспортные си-

стемы мегаполисов. Проблемы и пути решения: тр. Междунар. науч.-практ. конф., Харьков, 11–12 окт. 2011 г. / редкол. А. Н. Туренко [и др.]. Харьков: Харьков. нац. автомоб.-дорожн. ун-т, 2011. С. 20–26.

11. Resilient Supply Chain Management Model / O. Larin [et al.] // SHS Web of Conferences. 2021. Vol. 93. P. 030051. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20219303005>.

Поступила 05.10.2021

Подписана в печать 07.12.2021

Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Available at: <https://www.belstat.gov.by/> (Accessed 1 October 2021) (in Russian).
2. In 2019 the Surface Public Transport of the Capital Carried 24 Million More Passengers Than in 2018. Available at: <https://minsknews.by/v-2019-g-nazemnym-obshhestvennym-transportom-stoliczy-perevezeno-na-34-mln-passazhirov-bolshechem-v-2018-m/> (Accessed 1 October 2021) (in Russian).
3. Minsk Metro, Official Website of the Minsk Metro. Available at: <https://metropoliten.by/> (Accessed 1 October 2021) (in Russian).
4. Kapskiy D. V. (2013) The Role of Traffic Management in the Transport of the City. *Transport i Servis: Sb. Nauch. Tr. Vyp. 2: Funktsionirovanie Ustoichivyykh Transportnykh Gorodskikh Sistem* [Transport and Service: Collection of Scientific Papers. Iss. 2: Operation of Sustainable Urban Transport System]. Kaliningrad, 47–51 (in Russian).
5. On Amendments and Additions to the Rules for Carriage of Passengers by Road: Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus Dated 31.08.2018 No 636. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21800636&p1=1> (Accessed 15 July 2021) (in Russian).
6. Kapskiy D. V. (2008) *Forecasting of Accidents in Road-traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 242 (in Russian).
7. Kapskiy D. V. (2018) Road Quality Improvement Methodology. Minsk, Belarusian National Technical University. 370 (in Russian).
8. Kapskiy D. V., Vrbel' Yu. A., Navoi D. V., Rozhanskii D. V., Kot E. N. (2015) *Automated Traffic Control Systems*. Minsk, Novoye Znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ. 367 (in Russian).
9. Kapskiy D. V., Kas'yanik V. V., Kaptsevich O. A., Mozalevskii D. V., Poznyak, A. S., Katkov A. V., Kuz'menko V. I., Volynets A. S. (2018) *Transport Modeling and Evaluation of Traffic Conditions Using Navigation Information*. Minsk, Capital Print Publ. 144 (in Russian).
10. Kapskiy D. V. (2011) Improving the Quality of Traffic in Cities. *Transportnye Sistemy Megapolisov. Problemy i Puti Resheniya: Tr. Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Khar'kov, 11–12 Okt. 2011 g.* [Transport Systems of Megacities. Problems and Solutions: Proc. of Internat. Scient. and Pract. Conf., Kharkiv, Oct. 11–12, 2011]. Kharkiv, Kharkiv National Automobile and Highway University, 20–26 (in Russian).
11. Larin O., Tarasov D., Mirotin L., Rublev V., Kapskiy D. (2021) Resilient Supply Chain Management Model. *SHS Web of Conferences*, 93, 03005. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20219303005>.

Received: 05.10.2021

Accepted: 07.12.2021

Published online: 29.07.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-331-339>

УДК 621.43.03/.05-044.3:004.9

Разработка метода оптимизации алгоритмов диагностирования двигателей автомобилей

Инж. И. А. Серебряков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В современной практике диагностирования сложных технических устройств, наряду с развивающимися системами встроенной диагностики, широкую нишу по-прежнему занимает поиск неисправности, основанный на логических закономерностях. Логические алгоритмы поиска неисправности, положенные в основу диагностических карт силовых установок автомобилей, далеко не всегда обладают оптимальной структурой с точки зрения достижения наименьших стоимостных и временных показателей процесса диагностирования. Таким образом, актуальной является задача структурной оптимизации логических алгоритмов диагностирования и вместе с тем формирования по возможности простого и понятного стандартизированного порядка действий. В статье обоснованы критерий оценки эффективности диагностического алгоритма и структура исходных данных для расчета критерия. Предложены варианты визуальной формализации диагностической карты с целью повышения наглядности и проведения дальнейших действий по оптимизации ее структуры, а также варианты формализации визуальной информации в цифровом виде для ее обработки вычислительными средствами. Разработан и реализован порядок оптимизации структуры на языке программирования JavaScript. Описан обратный переход от цифровой формы к графической, что позволит немедленно внедрить результаты в практику работы организаций автосервиса. Анализ выборки из 22 диагностических карт показал, что предлагаемый метод оптимизации позволит добиться снижения средних затрат на диагностирование до 17 %.

Ключевые слова: диагностирование двигателей, диагностическая карта, граф, логический алгоритм диагностирования, критерий оценки, эффективность диагностирования

Для цитирования: Серебряков, И. А. Разработка метода оптимизации алгоритмов диагностирования двигателей автомобилей / И. А. Серебряков // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 331–339. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-331-339>

Development of Method for Optimization of Diagnostic Algorithms for Car Engines

I. A. Serebryakov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In modern practice of diagnosing complex technical devices, along with developing built-in diagnostic systems, a wide niche is still occupied by troubleshooting based on logical patterns. Logical algorithms for troubleshooting are the basis for diagnostic maps of car power plants. They do not always have an optimal structure in terms of achieving the lowest cost and time indicators of the diagnostic process. Thus, the problem of structural optimization of logical diagnostic algorithms is relevant, as well as the formation of a simple and understandable standardized procedure for optimizing diagnostic algorithms. The paper substantiates the criterion for evaluating the effectiveness of a diagnostic algorithm and the structure of the initial data for calculating the criterion. Variants of visual formalization of a diagnostic map are proposed in order

Адрес для переписки

Серебряков Игорь Андреевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Колоса, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-17
serabakovtea@bntu.by

Address for correspondence

Serebryakov Ihar A.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-17
serabakovtea@bntu.by

to increase visibility and carry out further actions to optimize its structure, as well as options for formalizing visual information in digital form for its processing by computing means. The procedure for optimizing the structure in the JavaScript programming language has been developed and implemented. The reverse transition from a digital form to graphic one is described, which will immediately introduce the results into the practice of car service organizations. An analysis of a sample of 22 diagnostic maps has shown that the proposed optimization method will reduce the average cost of diagnostics up to 17 %.

Keywords: engine diagnostics, diagnostic map, graph, logical diagnostic algorithm, evaluation criterion, diagnostic efficiency

For citation: Serebryakov I. A. (2022) Development of Method for Optimization of Diagnostic Algorithms for Car Engines. *Science and Technique*. 21 (4), 331–339. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-331-339> (in Russian)

Введение

Сложные технические устройства все более широко проникают в различные сферы жизни человека. Силовые установки современных автомобилей относятся к таким устройствам. По данным Международной ассоциации автопроизводителей [1], в мире насчитывается более 1,2 млрд автомобилей, 95 % которых составляют легковые (включая коммерческий транспорт). На протяжении всего срока службы автомобиль подвергается техническому обслуживанию и ремонту. Неотъемлемая составляющая ремонта транспортного средства – операции диагностирования. Силовая установка является технически сложным изделием, поэтому для диагностирования точной причины отказа целесообразно придерживаться определенной последовательности действий – алгоритма диагностирования [2].

Вопросам построения логических алгоритмов диагностирования посвящены работы ряда исследователей [3–5], анализ которых показал, что в них созданы серьезная фундаментальная теоретическая база и понятийная система предмета. Ряд работ относится к аэрокосмической тематике, военной технике, диагностированию сложного электронного оборудования. В то же время наблюдается недостаток научных исследований, посвященных оптимизации алгоритмов диагностирования, в частности силовых установок автомобилей. Особенно данная тенденция касается современных гражданских автомобилей, в состав которых входит большое количество электронных систем управления (до 50–70), содержащих в совокупности колоссальное количество датчиков, исполнительных механизмов и коммутационной аппаратуры. Каждый из перечисленных составляющих элементов системы может выходить из строя.

Также следует отметить отсутствие стоимостного подхода при проектировании диагностико-ремонтных процедур. Анализ существующей практики диагностирования бензиновых двигателей легковых автомобилей (данный тип силовых установок наиболее распространен) на примере марки Lada показал [6], что при разработке документов, регламентирующих порядок диагностирования (диагностических карт), не учитываются стоимостные характеристики алгоритмов диагностирования, в результате чего экономика диагностирования не является достаточно эффективной.

Исходные данные и методы исследования

Материалом данного исследования послужили диагностические карты (рис. 1) на диагностирование отдельных систем автомобиля или элементов этих систем. Проанализировали 22 из 134 диагностических карт [7] поиска неисправностей электронной системы управления двигателем автомобиля Lada Vesta 1-го поколения. Данная модель автомобиля была выбрана в связи с широким распространением в Республике Беларусь. Статистические данные об отказах системы, предназначенные для расчета критерия эффективности, получили из анализа заказ-нарядов на диагностирование автомобилей, а также из литературных источников и сети Интернет [8].

Для формирования и визуализации графов, полученных из алгоритмов диагностирования, применяли программу MS Visio. Обработку данных и модификацию алгоритмов осуществляли на языке программирования JavaScript в среде программирования Microsoft Visual Studio Code. Визуализацию полученных оптимальных алгоритмов производили средствами JavaScript в формате HTML-документа.

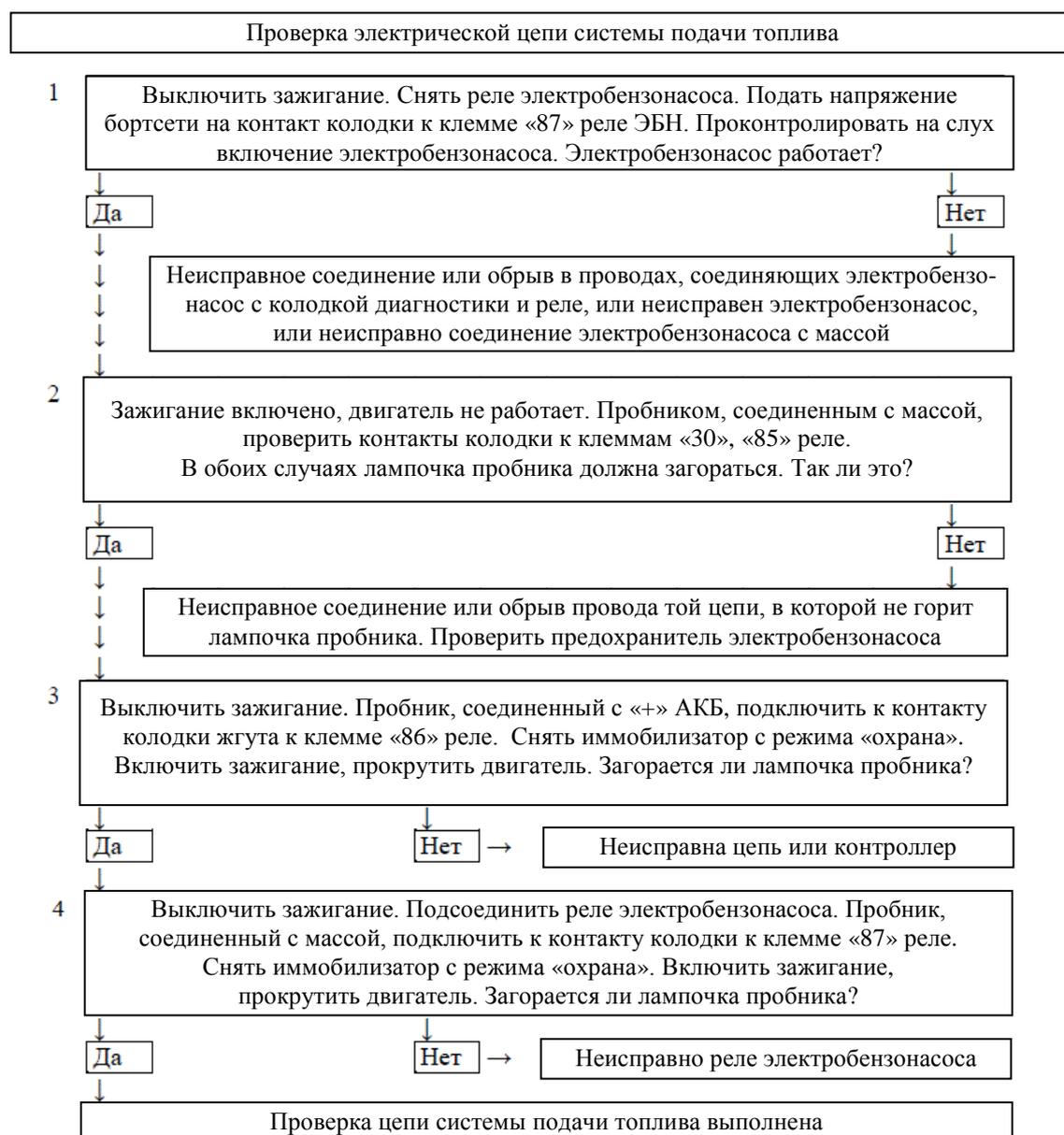


Рис. 1. Пример диагностической карты

Fig. 1. Example of a diagnostic map

Критерий оценки эффективности диагностической карты

В широком смысле слова критерий эффективности диагностирования может иметь различные аспекты, в частности связанные с качеством выполнения работ либо с управлением технологическим процессом. Однако в рассматриваемом исследовании основной целевой приоритет – стоимостные характеристики тех-

нологического процесса, поэтому и критерий эффективности будет связан со стоимостными параметрами и определяться средней стоимостью диагностирования (ССД), точнее, ее математическим ожиданием, которое является средним (взвешенным по вероятностям возможных значений) значением случайной величины. Таким образом, при наличии полного перечня неисправностей и вероятности каждой из них, понимаемой как эмпирическая доля

случаев отдельной неисправности, математическое ожидание будет вычисляться по формуле

$$ССД = \sum_{i=1}^n P_i S_i, \quad (1)$$

где P_i – вероятность i -го исхода; S_i – полная себестоимость диагностирования и устранения i -го исхода, рассчитываемая как сумма себестоимостей всех предшествующих ему операций, у. е.; n – количество возможных исходов; i – номер конкретного исхода.

Таким образом, метод оптимизации алгоритма должен приводить к минимизации данной величины. Следует обратить внимание, что при любых преобразованиях вероятность P_i остается неизменной, поэтому операции преобразования алгоритма будут сводиться к изменению стоимости диагностирования исходов, зависящей от последовательности действий.

Концепция оптимизации алгоритма

Преобразование алгоритма осуществляется с использованием компьютерных технологий. В связи с этим необходимо, чтобы исходные данные имели формат, доступный для манипулирования средствами вычислительной техники. Для этого должна быть проведена формализация диагностической карты, состоящая из нескольких этапов.

Максимально близким математическим архетипом [9] для диагностической карты является форма древовидного графа. Следует согласиться с мнением исследователей, внесших вклад в теорию алгоритмов диагностирования [3], что именно к такой форме в первую очередь целесообразно преобразовывать диагностическую карту.

Необходимо отметить, что процесс преобразования диагностической карты в древовидный граф потребует ощутимых человеческих ресурсов. С одной стороны, это связано собственно с процессом оцифровки. С другой – в процессе преобразования следует устранить различного рода технические ошибки и недостатки, при-

сущие реальным диагностическим картам, рассмотренные в [6]. Основным недостатком диагностических карт в разрезе инженерного анализа состоит в отсутствии конкретики и однозначности каждого диагностического шага.

Далее древовидный граф необходимо дополнить вероятностной и стоимостной информацией, таким образом преобразовав его в расширенный граф. Теперь каждому исходу, обозначенному ромбом, соответствует величина вероятности этого исхода, записанная в квадратных скобках. Каждая проверочная операция, обозначенная формой прямоугольника, содержит в себе собственную себестоимость (в условных величинах) в круглых скобках. Эта информация отображается графически (рис. 2). Следует отметить, что условные величины в контексте данной статьи не являются какой-либо валютой, их основное назначение – объективное отражение себестоимости проведения диагностических операций.

На следующем этапе расширенный граф должен быть переведен в математический формат, пригодный для работы с алгоритмическим языком. Его можно представить в виде: цифровой матрицы смежности [10]; набора объектов, взаимосвязанных друг с другом [11]; структуры данных типа двоичное дерево (binary tree) [12]. Полученная математическая форма уже является пригодной для обработки компьютерными средствами и оперирования ее данными на языке программирования.

Основной этап – осуществляемая научно-теоретически модификация алгоритма, в результате которой должен быть получен оптимальный с точки зрения структуры граф с минимизированным математическим ожиданием себестоимости диагностических операций.

На последнем этапе обработки полученный граф должен быть визуализирован для обеспечения возможности его практического применения. Для этого следует разработать код построения визуального графа по цифровому массиву данных. Граф, полученный после модификации, назовем оптимизированным.

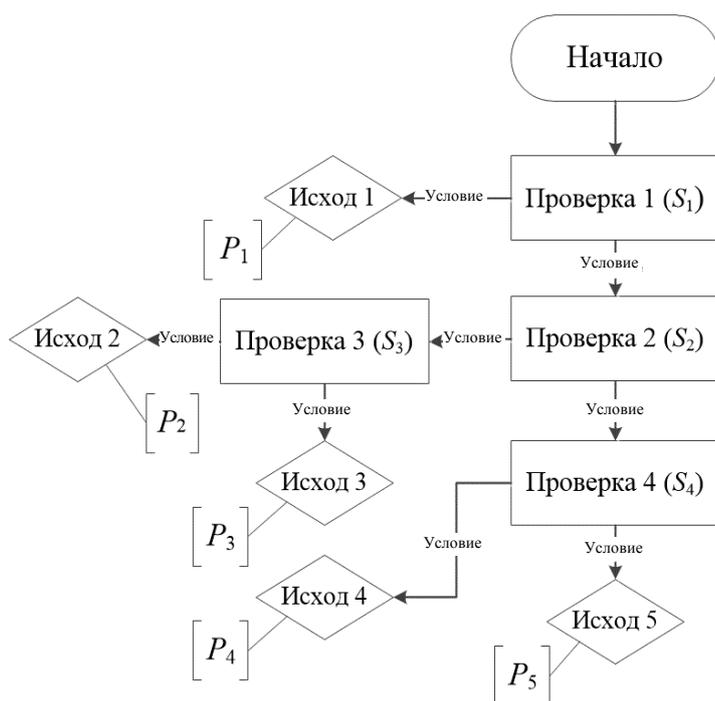


Рис. 2. Принципиальное представление расширенного графа
Fig. 2. Conceptual representation of extended graph

Разработка метода оптимизации диагностических алгоритмов

Определение графа может варьироваться в зависимости от контекста рассматриваемой теории, однако общая концепция теории графов определяет граф как множество вершин, некоторые из которых соединены ребрами [9]. В рассматриваемой задаче операции диагностической карты будут являться вершинами графа, а логические связи между ними – ребрами графа. Ребра будут направленными, поскольку подразумевается строгий, логически обоснованный переход от одной операции в карте к другой, равно как переход из одной вершины графа в другую. Показанная ранее диагностическая карта (рис. 1) в форме расширенного графа (рис. 2) будет выглядеть следующим образом (рис. 3).

Перейдем к математическому описанию графа. В первую очередь рассмотрим способ представления графа в виде матрицы смежности. Согласно определению, матрица смежности графа с конечным числом вершин – это квадратная целочисленная матрица разме-

ром $n \times n$, в которой значение элемента a_{ij} равно числу ребер из i -й вершины в j -ю вершину [9]. Реализация представления графа в виде такой матрицы устроена следующим образом. Для представления графа понадобится матрица размером $[i; j]$, где $i = j =$ числу проиндексированных элементов блок-схемы (узлов). В базовом случае, описанном выше, для перевода графа в матричную форму достаточно указать в матрице лишь на наличие связей между определенными узлами. Однако в рассматриваемом исследовании предлагается дополнить ее информацией о стоимости диагностирования и вероятности исходов, а также записывать эту информацию непосредственно в ячейки матрицы. В ячейках, расположенных на диагонали, записываются вероятности неисправностей, в ячейках, обозначающих ребра, – стоимости элементарных проверок. Данная форма представления хорошо отражает древовидную структуру связей. Она может быть дополнена вероятностной и стоимостной информацией, но не дает возможности удобного хранения сведений о наименовании проверок, об описании связей, а также о некоторых дополнительных параметрах, используемых в дальнейшем при преобразовании графа.

Отображение графа в виде двоичного дерева представляет собой иерархическую структуру, которая может быть встроена непосредственно в синтаксис некоторых языков программирования, например JavaScript [10]. Двоичные деревья состоят из узлов и атрибутов связей. В узлы может быть записана числовая информация. Набор связей описывает, какие узлы связаны друг с другом.

Для адекватного описания информационной структуры древовидного графа автором разработан усовершенствованный способ представления графа, имеющий некоторые сходства с представлением в виде двоичного дерева. Граф записывается в виде набора (массива) объектов. Главное преимущество данного способа заключается в наиболее полном описании графа алгоритмическим языком. В табл. 1 представлен пример объекта, отражающего информацию об элементарной проверке.

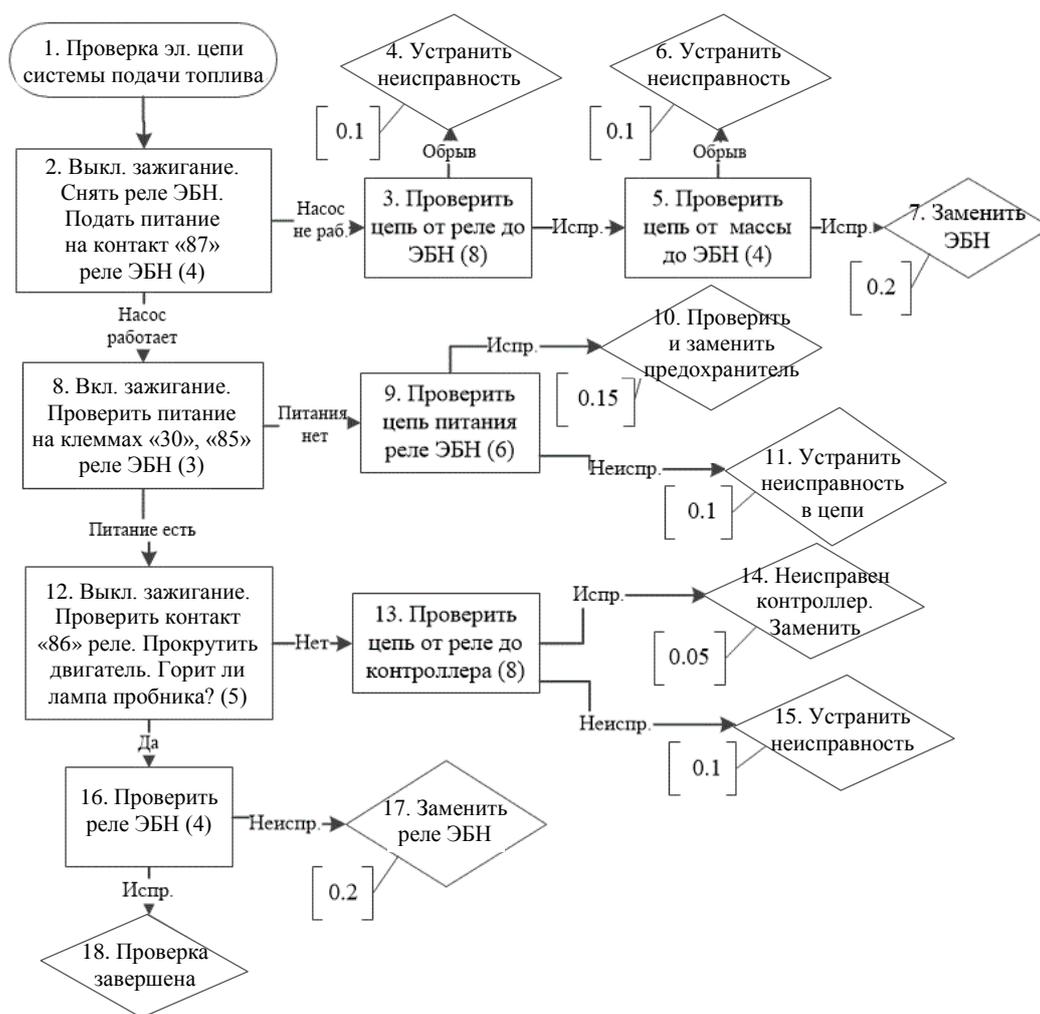


Рис. 3. Расширенный граф диагностической карты
 Fig. 3. Extended graph of diagnostic map

Таблица 1

Поля объекта
 Object fields

ID	PID	Name	P	S	Parent?	NEID
3	2	Проверить цепь от реле до ЭБН	–	8	1	2

Как видно из табл. 1, объект содержит набор полей, имеющих имя (шифр). Расшифруем содержание полей:

ID отражает уникальный идентификатор операции, который представляет собой натуральное число;

PID отражает уникальный идентификатор родительского узла, т. е. того узла, переход из которого порождает рассматриваемый узел. Соответственно этот идентификатор также представляет собой натуральное число;

Name включает в себя полное наименование диагностической или ремонтной операции, содержит текстовую информацию;

P отражает вероятность исхода, значение является положительным числом от 0 до 1;

S отражает стоимость проведения диагностической операции либо стоимость устранения выявленной неисправности, измеряется в у. е.;

Parent? – признак того, является ли рассматриваемый узел родителем для других узлов, может принимать значение 0 или 1, где 0 – логическое нет, 1 – логическое да;

NEID (Necessary Elements ID) – ID того узла (узлов) алгоритма, предварительное выполнение которого(ых) необходимо для выполнения данного узла.

Алгоритм оптимизации

Алгоритм оптимизации расширенного графа основан на нескольких составляющих:

- определении возможных действий над элементами;
- определении ограничений;
- теореме об уменьшении стоимости.

Возможные действия над элементами

На расширенном графе определяются следующие действия:

1) перестановка блоков операций или отдельной операции. Действие состоит в перестановке операции или блоков операций на один шаг. Повторением данного действия можно произвести сортировку элементов в пределах одной ветви по некоторому критерию. Как правило, оптимизация алгоритма будет заключаться исключительно в перестановках;

2) удаление операции. Может потребоваться в случае исчезновения логической сущности проверки. Это может произойти, например, из-за потери актуальности проверки или из-за возникновения новых проверок, результат которых будет более информативен, чем у предыдущих;

3) создание операции. При недостаточной полноте графа может потребоваться создание новой проверочной операции для диагностирования некоего нового исхода. Решение этой задачи не входит в исследование, тем не менее такую возможность необходимо предусмотреть в связи с возникновением новых случаев в диагностической практике.

Ограничения преобразований алгоритма

В расширенном графе могут встречаться фрагменты, преобразование которых с математической точки зрения не составляет препятствий, в то же время с инженерной и практической точек зрения содержащие недопустимые операции.

1. Алгоритм может быть устроен только следующим образом: висячими вершинами могут являться лишь исходы, равно как элементарные проверки не могут быть висячими вершинами и всегда имеют исходящие связи.

2. Запрещается отделять исход от выявляющей его операции. Это связано с тем, что исходы диагностируются строго определенными проверками, которые позволяют однозначно утверждать, что тот или иной исход – причина отказа.

3. Запрещается помещать проверочные операции в иерархии выше операций, которые необходимы для их выполнения. Например, нельзя выполнять операцию, подразумевающую, что узел разобран, не выполнив предварительно разборку этого узла.

Теорема об уменьшении стоимости

Для получения минимальной ССД алгоритма в каждой ветви следует выстроить элементарные проверки в порядке возрастания отношения собственной стоимости проверки к суммарной вероятности исходов, для выявления которых требуется выполнение этой проверки. Продемонстрируем процесс оптимизации алгоритма на примере произвольного алгоритма. В качестве исходного материала имеется расширенный граф (рис. 3) с древовидной структурой.

Алгоритм оптимизации состоит из таких шагов, как:

1) расчет ССД по исходному графу. ССД исходного алгоритма, представленного в виде расширенного графа на рис. 3, рассчитанный по формуле (1), составит 15,45 у. е.;

2) анализ иерархии ветвей графа, выделение ветвей, которыми заканчивается иерархия, и оптимизация этих ветвей в соответствии с теоремой. Например, очевидно (рис. 3), что ветвь с индексами проверок 3–7 может быть оптимизирована, так как действия с индексами 3 и 5 допускают перестановку одного вместо другого;

3) выделение ветвей, предшествующих в иерархии модифицированным участкам, и их модификация, актуализация параметров предшествующих узлов и расчет ССД очередного шага. Другие ветви алгоритма анализируются аналогично предыдущему шагу на возможность перестановок. Такой ветвью является и основная вертикальная ветвь, состоящая из проверок с индексами 2, 8, 12 и 16;

4) расчет ССД оптимального модифицированного алгоритма и его визуализация.

После проведенных перестановок проверочных операций ССД оптимизированного алгоритма составила 14,65 у. е., т. е. удалось добиться ее снижения на 5,1 %. Структура оптимизированного графа представлена на рис. 4. При необходимости он может быть преобразован к виду изначально имевшейся диагностической карты.

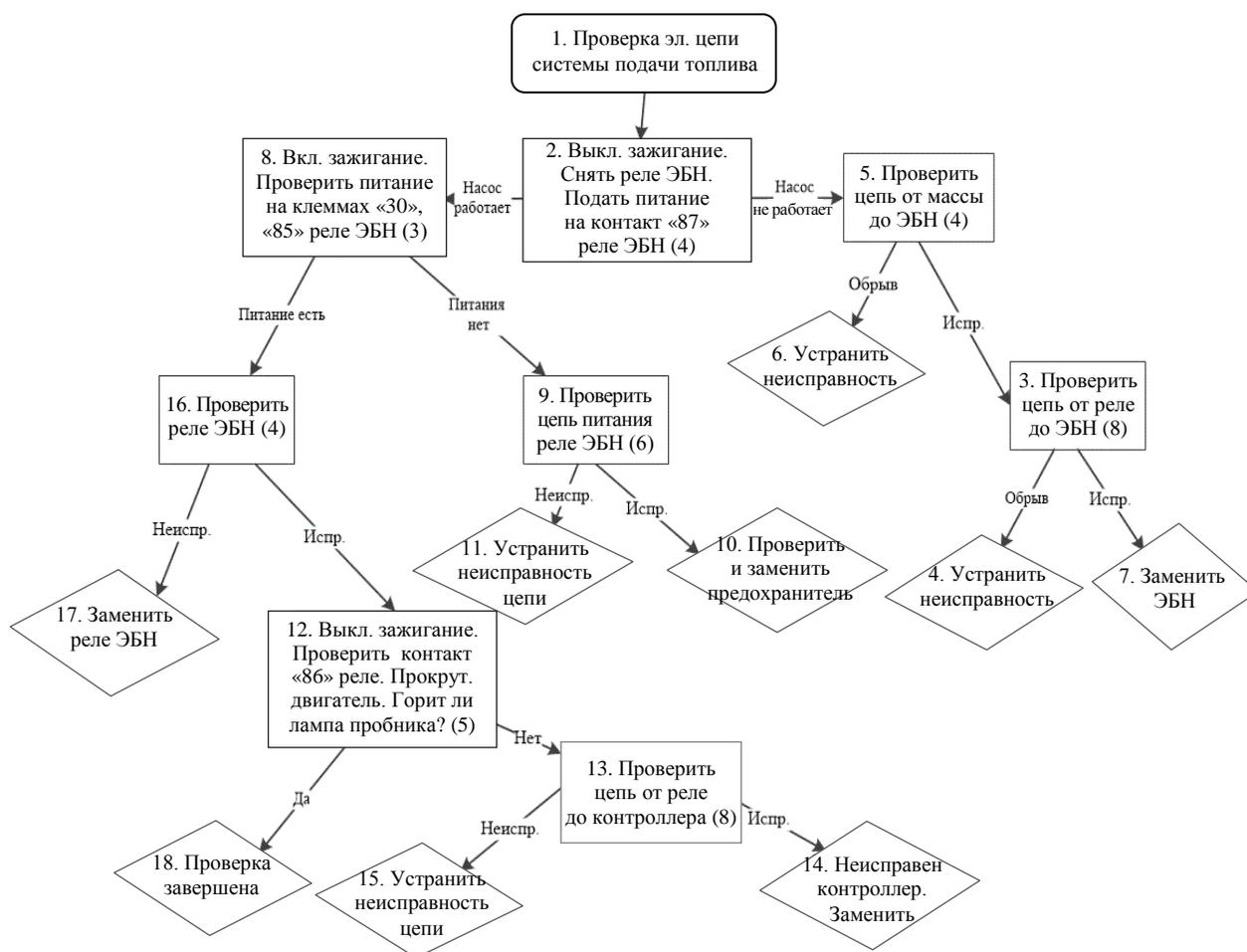


Рис. 4. Оптимизированный граф диагностической карты

Fig. 4. Optimized graph of diagnostic map

Согласно описанному порядку действий проанализированы 22 диагностические карты. Получены следующие результаты: в пяти диагностических картах величина ССД не изменилась, что свидетельствует об их оптимальной структуре, в остальных удалось добиться уменьшения ССД в среднем на 3–9 %. В одной из диагностических карт уменьшение ССД составило максимальную величину – 17 %.

ВЫВОДЫ

1. В качестве критерия оценки алгоритмов диагностирования целесообразно принять среднюю стоимость диагностирования, определяемую как математическое ожидание стоимости диагностической карты.

2. Для формализации диагностических карт разработано представление в виде расширен-

ных графов, включающих кроме структурных компонентов стоимостные и вероятностные параметры.

3. На основе анализа вариантов представления в качестве математического формата расширенного графа принята древовидная структура объектов, связанных родительскими – дочерними связями.

4. Создан алгоритм модификации диагностического графа, позволяющий минимизировать математическое ожидание себестоимости диагностирования, основанный на разработанных методах оптимизации.

5. На основе анализа результатов оптимизации выборки из 22 диагностических карт установлено, что предлагаемый метод позволяет уменьшить математическое ожидание средних затрат на диагностирование до 17 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Motorization Rate 2015 – Worldwide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>. Дата доступа: 17.10.2021.
2. Техническая диагностика. Термины и определения: ГОСТ 20911–89. Введ. 01.01.1991. М.: Гос. ком. СССР по управл. качест. продук. и стандартам, 1989. 10 с.
3. Пархоменко, П. П. Основы технической диагностики. Кн. 2. Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. М.: Энергия, 1981. 320 с.
4. Ефанов, Д. В. Оптимизация алгоритмов диагностирования технических объектов на основе комплексного использования информационного подхода и методов теории вопросников / Д. В. Ефанов // Известия Калининградского государственного технического университета. 2012. № 26. С. 96–103.
5. Дунаев, А. М. Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования / А. М. Дунаев // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 9. С. 82–90.
6. Серебряков, И. А. Анализ существующих алгоритмов диагностирования силовых установок и их эффективности / И. А. Серебряков // Изобретатель. 2021. № 1–2. С. 26–31.
7. Электронная система управления двигателем 21129 автомобилей семейства Lada Vesta с контроллером M86 EBPO-5 – устройство и диагностика [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://chiptuner.ru/wp-content/docs/m86_vesta.pdf. Дата доступа: 30.03.2021.
8. Хлебушкин, И. В. Лада Веста. Итоги ресурсного теста Авторевю / И. В. Хлебушкин // Авторевю. 2016. № 22. С. 47–51.
9. Казимиров, Н. И. Архетипы математики: общие методы, приемы, конструкции, идеи математики и ее оснований / Н. И. Казимиров. М.: Юстицинформ, 2019. 612 с.
10. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms / Т. Кормен; под ред. И. В. Красикова. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.
11. Структурирование данные с помощью JavaScript: Дерево [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.internet-technologies.ru/articles/strukturirovanie-dannyh-s-pomoschyu-javascript-derevo.html>. Дата доступа: 20.11.2021.
12. Двоичное дерево поиска на JavaScript [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://webdevblog.ru/dvoichnoe-derevo-poiska-na-javascript>. Дата доступа: 20.11.2021.

Поступила 14.12.2021

Подписана в печать 22.01.2022

Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. *Motorization Rate 2015 – Worldwide*. Available at: <https://www.oica.net/category/vehicles-in-use/> (Accessed 17 October 2021).
2. State Standard 20911–89. *Technical Diagnostics. Terms and Definitions*. Moscow, USSR State Committee on Quality Management of Products and Standards, 1989. 10 (in Russian).
3. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. (1981) *Fundamentals of Technical Diagnostics. Book 2. Optimization of Diagnostic Algorithms, Hardware*. Moscow, Energiya Publ. 320 (in Russian).
4. Efanov D. V. (2012) Optimization of Algorithms for Diagnosing Technical Objects Based on the Integrated Use of the Information Approach and Methods of the Theory of Questionnaires. *Izvestiya Kaliningradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [KSTU News], (26), 96–103 (in Russian).
5. Dunaev A. M. (2018) The Procedure for Constructing an Optimal Logical Algorithm for Diagnosing. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 22 (9), 82–90 (in Russian).
6. Serebryakov I. A. (2021) Analysis of Existing Algorithms for Diagnosing Power Plants and their Effectiveness. *Izobretatel* [Inventor], (1–2), 26–31 (in Russian).
7. *Electronic Engine Control System for 21129 Cars of the Lada Vesta Family with the M86 EBPO [EURO]-5 – Design and Diagnostics*. Available at: https://chiptuner.ru/wp-content/docs/m86_vesta.pdf (Accessed 30 March 2021) (in Russian).
8. Khlebushkin I. V. (2016) Lada Vesta. The Results of the Resource Test Autoreview. *Avtorevyu = Autoreview*, (22), 47–51 (in Russian).
9. Kazimirov N. I. (2019) *Archetypes of Mathematics: General Methods, Techniques, Constructions, Ideas of Mathematics and its Foundations*. Moscow, Yustitsinform Publ. 612 (in Russian).
10. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. (2009) *Introduction to Algorithms*. Cambridge, the MIT Press. 1292.
11. *Structuring Data with JavaScript: Tree*. Available at: <https://www.internet-technologies.ru/articles/strukturirovanie-dannyh-s-pomoschyu-javascript-derevo.html> (Accessed 20 November 2021) (in Russian).
12. *Binary Search Tree in JavaScript*. Available at: <https://webdevblog.ru/dvoichnoe-derevo-poiska-na-javascript> (Accessed 20 November 2021) (in Russian).

Received: 14.12.2021

Accepted: 22.01.2022

Published online: 29.07.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348>

УДК 662.7+662.8

Технология производства MSF-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук Б. М. Хрусталеv¹⁾, канд. техн. наук А. Н. Пехота²⁾,
канд. техн. наук Р. Н. Вострова²⁾, Е. А. Пехота²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье представлена разработанная авторами технология многокомпонентного брикетирования твердого топлива (MSF-топлива), позволяющая сократить экономические потери от неиспользования горючих отходов производственной и коммунальной жизнедеятельности человека. Рассмотрены вопросы энерго- и ресурсосбережения, рационального использования природных и вторичных ресурсов в соответствии с Национальной стратегией устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года. Проанализированы понятие, структура и принципы циркулярной экономики. Дана характеристика основным направлениям использования и переработки отходов, не нашедших применения в традиционных технологиях и энергетике. Представлены некоторые аспекты проведенных исследований по производству многокомпонентного твердого топлива. Описана технология брикетирования влажных смесей с добавлением различных связующих веществ, в том числе горючих отходов, с учетом факторов, влияющих на производительность брикетирующей установки и плотность топлива. Проанализированы различные соотношения компонентов брикетируемого топлива и определены составы, при которых достигаются наилучшие производственные, потребительские и экологические показатели. Исследованы энергетические и физико-химические характеристики производимого многокомпонентного топлива. Разработаны алгоритмы подбора компонентов топлива. Полученные результаты могут применяться для решения задач по рациональному использованию горючих производственных отходов путем производства многокомпонентного твердого топлива, соответствующего установленным энергетическим и экологическим требованиям.

Ключевые слова: горючие отходы, твердое топливо, многокомпонентный состав, связующее, осадок сточных вод, нефтесодержащие отходы, теплота сгорания, технология брикетирования, выбросы, энергоресурсы, древесные отходы

Для цитирования: Технология производства MSF-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике / Б. М. Хрусталеv [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 340–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348>

Technology for Production of MSF-fuel – Direction Providing Transition to Circular Economy

В. М. Khroustalev¹⁾, А. N. Pekhota²⁾, R. N. Vostrova²⁾, Е. А. Pekhota²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the technology of multi-component briquetting of solid fuel (MSF-fuel) developed by the authors, which makes it possible to reduce economic losses from the non-use of combustible waste from industrial and

Адрес для переписки

Пехота Александр Николаевич
Белорусский государственный университет транспорта
ул. Кирова, 34,
246653, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 23 231-93-45
1555522@mail.ru

Address for correspondence

Pekhota Alexander N.
Belarusian State University of Transport
34, Kirov str.,
246653, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 23 231-93-45
1555522@mail.ru

municipal human activities. The issues of energy and resource saving, rational use of natural and secondary resources in accordance with the National Strategy for Sustainable Development of the Republic for the period up to 2035 are considered in the paper. The concept, structure and principles of the circular economy are analyzed. The paper provides characteristics of the main areas of use and processing of waste that have not found application in traditional technologies and energy. Some aspects of the conducted research on the production of multicomponent solid fuels are presented in the paper. The technology of briquetting wet mixtures with the addition of various binders, including combustible waste, is described, taking into account the factors that affect the performance of the briquetting plant and the density of the fuel. Various ratios of the components of briquetting fuel have been analyzed and the compositions are determined, at which the best production, consumer and environmental indicators are analyzed. The paper studies the energy and physico-chemical characteristics of the produced multicomponent fuel. Algorithms for selecting fuel components have been developed. The results obtained can be used to solve problems of rational use of combustible industrial waste by producing a multicomponent solid fuel that meets the established energy and environmental requirements.

Keywords: combustible waste, solid fuel, multicomponent composition, binder, sewage sludge, oily waste, heat of combustion, briquetting technology, emissions, energy resources, wood waste

For citation: Khurstalev B. M., Pekhota A. N., Vostrova R. N., Pekhota E. A. (2022) Technology for Production of MSF-fuel – Direction Providing Transition to Circular Economy. *Science and Technique*. 21 (4), 340–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348> (in Russian).

Введение

Сегодня Республика Беларусь, исходя из невысокого уровня обеспеченности собственными энергоресурсами, проявляет стремление к переходу на разумные принципы функционирования зеленой экономики, что нашло отражение в Национальной стратегии устойчивого развития на период до 2035 г. Это предполагает многообразие подходов государства и бизнеса к повышению энерго- и ресурсоэффективности с учетом необходимости снижения экологических последствий в производственной деятельности.

Перспективной современной тенденцией для многих стран, ограниченных в ресурсах, в том числе для Беларуси, является переход к циркулярной экономике, нацеленной на повторное использование, восстановление и переработку уже задействованных ресурсов, что способствует увеличению жизненного цикла продукции. Иными словами, циркулярная экономика – это направление развития и функционирования эффективных бизнес-моделей, при которых производственная структура пытается повторить закрытую природную цепочку, где все, что произведено и использовано обществом, должно быть полностью переработано внутри этих звеньев без возникновения экологических проблем.

Для реализации принципов циркулярной экономики необходимо создавать максимально закрытые циклы производства, в которых ресурсы не выбывают, а превращаются в новые товарные продукты, и при этом используются экономически оправданные возобновляемые источники энергии. Вместе с тем реализация

полного рециклинга предполагает не только явные экологические преимущества, связанные с минимизацией отходов и загрязнения окружающей среды, но и экономическую выгоду, проявляющуюся на уровне как производства, так и потребления. В отличие от сложившихся тенденций, циркулярная экономика нацеливает производителей на выпуск долговечных и экологически безопасных товаров, которые не содержат вредных для здоровья и экологии веществ. Упрощенная структура циркулярной экономики с учетом биологического и технологического циклов представлена на рис. 1.

Циркулярная экономика основана на принципах [1]:

- сохранения и увеличения естественного капитала путем управления ограниченными запасами и балансирования потоков возобновляемых ресурсов;
- оптимизации выбывания ресурсов за счет циркуляции продуктов, компонентов и материалов с наивысшей полезностью на протяжении всего времени на всех этапах как в техническом, так и в биологическом циклах;
- содействия повышению эффективности систем путем выявления негативных внешних факторов и последующего перепроектирования производственной деятельности.

В большинстве стран развитие безотходного производства и потребления находится на невысоком уровне. Однако постепенное внедрение безотходных технологий и эффективных бизнес-моделей переработки отходов, а также международная кооперация и сотрудничество могут ускорить переход от традиционной линейной экономики к перспективной и действенной экономике замкнутого цикла.

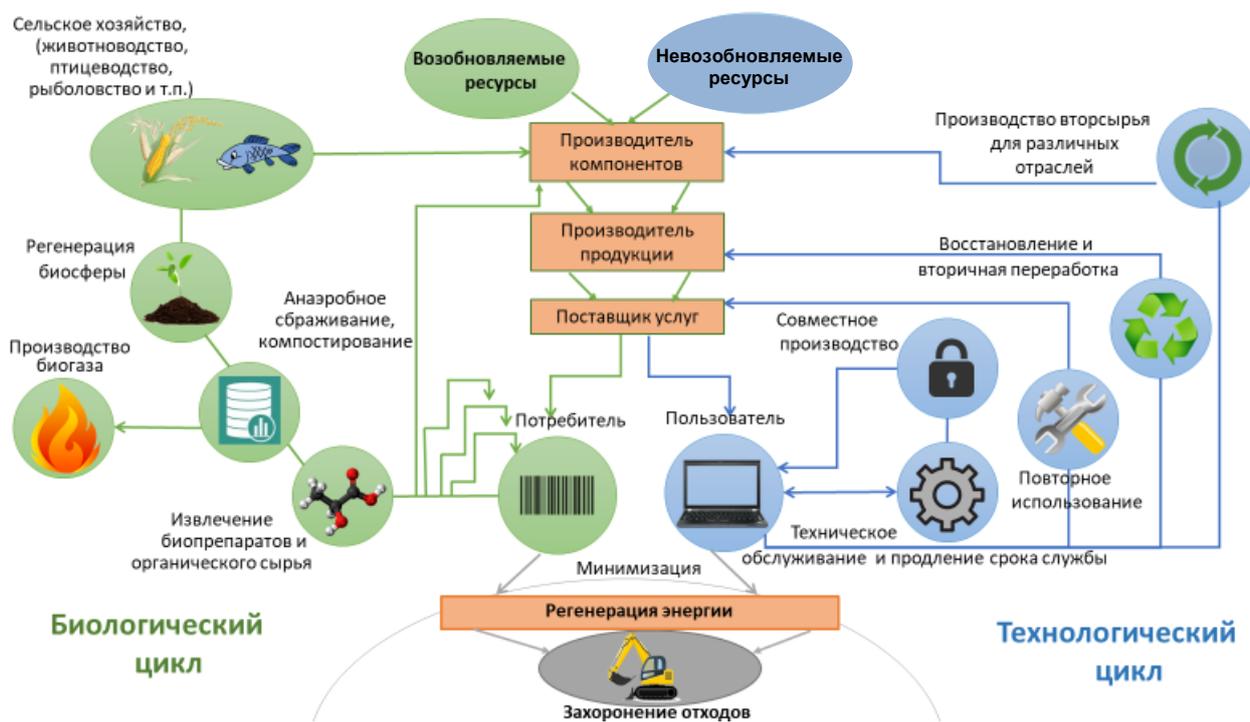


Рис. 1. Структура циркулярной экономики

Fig. 1. Structure of Circular Economy

Аспекты применения горючих отходов для получения твердого топлива

В связи с вышеизложенным возникает необходимость разработки технологий производства топлива на основе горючих отходов и их составов, соответствующего требованиям экологической безопасности при сжигании. Сложность задачи заключается в том, что различные виды горючих отходов отличаются происхождением, дисперсностью, структурой, наличием в составе механических примесей и включений, степенью влажности, гранулометрическим составом. К тому же в них имеются нежелательные вещества, в том числе антропогенного характера, затрудняющих экологически безопасное сжигание. Указанные особенности не позволяют перерабатывать такого рода отходы в оборудовании, применяемом в традиционных технологиях производства брикетированного и гранулированного топлива.

Проведенные ранее исследования показали, что в ситуации с отходами, не нашедшими применения в других технологиях, решением проблемы может стать специализированный подбор оптимального многокомпонентного состава с обязательным использованием в брикетированной смеси экологически чистых отходов в определен-

ной пропорции с загрязненными [2–5]. Такой подход при формировании многокомпонентных смесей в пределах заданной влажности обеспечивает оптимальное и сбалансированное соотношение химических элементов в конечном составе топлива и нормированные параметры содержания вредных веществ в выбросах при сжигании в котлоагрегатах.

Разработанная и смоделированная открытая система многокомпонентного брикетирования базируется и на таком обязательном факторе, как использование связующего в составе топливной смеси. Продолжительный опыт экспериментальных исследований, изучение моделей процесса и практика брикетирования позволили определить широкую группу отходов производства и жизнедеятельности человека, успешно применяемых в качестве связующего. К ним можно отнести гидролизный лигнин, отходы очистных сооружений предприятий деревообработки, целлюлозно-бумажных производств, городской коммунально-бытовой канализации (осадок сточных вод) и др. Кроме того, связующими свойствами обладают различные углеродсодержащие (УВД) отходы, применение которых в составе топлива допускается ТКП 17.11-01–2009. Многокомпонентное брикетированное твердое топливо со связую-

щим все шире применяется под брендовым названием MSF-топливо (multicomponent solid fuel) [2, 3].

Проблемы использования горючих отходов и методы их решения

В настоящее время введены ряд государственных программ, связанных с организацией сбора, обезвреживания и использования обширного спектра отходов, образующихся и накопленных в производственном секторе и коммунальном хозяйстве. При этом для некоторых видов отходов практически нет экономически доступных технологий, позволяющих в полной мере превратить их в предмет бизнеса с возможностью получения прибыли.

Значительный энергетический потенциал имеют нефтесодержащие, древесные, сельскохозяйственные и иные вторичные горючие отходы, не нашедших применения в других технологиях. Поэтому комплексная переработка таких отходов путем получения многокомпонентного твердого топлива является эффективным решением актуальных задач, имеющих научную новизну и важное практическое значение для увеличения доли местных топливно-энергетических ресурсов, создания дополнительных рабочих мест, стабильной сырьевой базы для энергетических установок [2–4].

Углеродсодержащие отходы – это отходы продуктов переработки нефти, а также отходы (шламы, остатки, смеси), содержащие нефтепродукты или насыщенные ими (рис. 2). Наиболее эффективные методы их использова-

ния – сжигание и регенерация. Однако ввиду того, что такие вещества (смеси веществ) образуются в результате производственной деятельности, т. е. относятся к отходам производства, зачастую их регенерация проблематична или экономически нецелесообразна.

Стоит отметить, что УВД-отходы имеют различные химический состав и физические свойства. Кроме того, в них присутствуют механические примеси, тяжелые металлы, сера, избыточное содержание воды, что затрудняет их применение в традиционных технологиях переработки или требует подготовительных мероприятий для использования их в качестве топлива [5].

Осадок сточных вод (ОСВ) – это отходы, образующиеся в результате очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод. В настоящее время они в основном складываются на территории очистных сооружений, что создает неблагоприятную экологическую ситуацию вблизи мест их размещения. Основные направления использования и переработки ОСВ представлены на рис. 3.

ОСВ является видом энергетически насыщенных горючих отходов, состоит из органических (до 80 %) и минеральных (около 20 %) веществ, выделенных из воды в результате механической, биологической и физико-химической очистки. Ежегодное количество осадков, выделяющихся при очистке сточных вод на очистных сооружениях различной степени оснащённости, составляет 2–10 % от объема поступающих вод [2, 6–8].

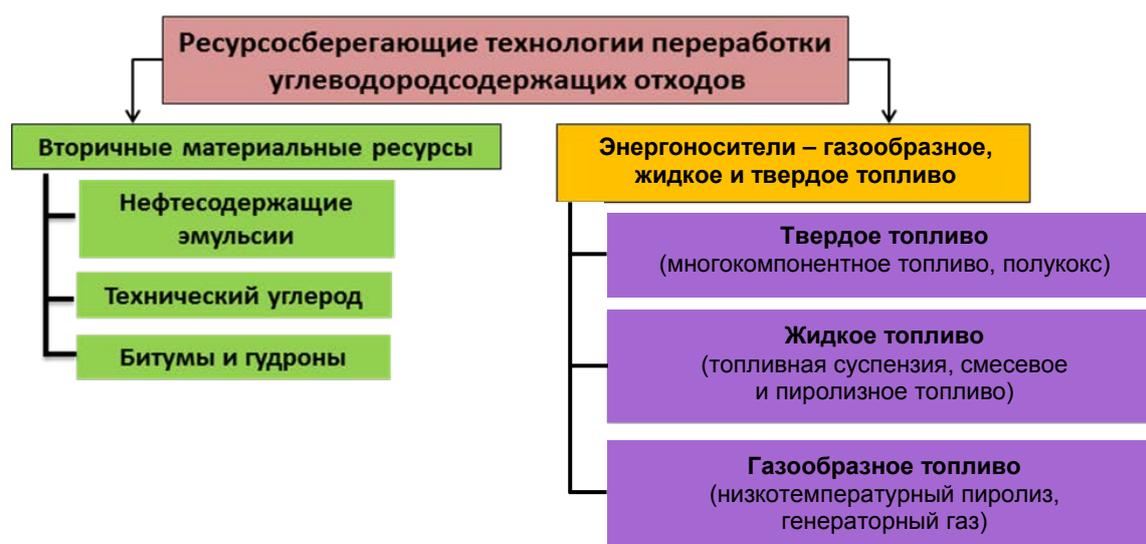


Рис. 2. Основные направления получения вторичных ресурсов после переработки углеводородсодержащих отходов

Fig. 2. Main directions for obtaining secondary resources after processing of hydrocarbon-containing waste

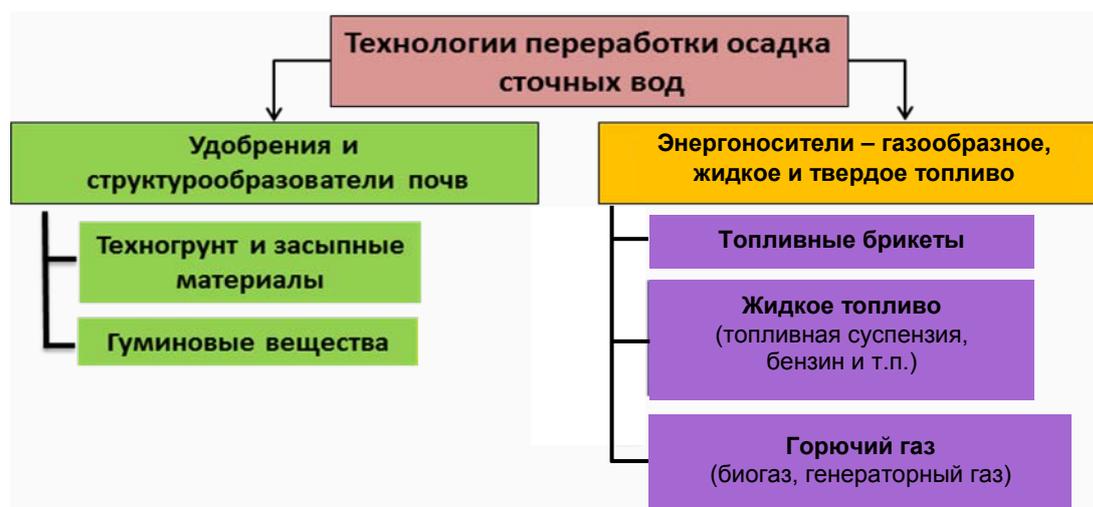


Рис. 3. Основные направления использования и переработки осадка сточных вод

Fig. 3. Main areas of use and processing of sewage sludge

В то же время для производственных и коммунальных предприятий все более актуальным становится вопрос выбора технологии, позволяющей сократить площади для размещения ОСВ или обеспечить его полную переработку в процессе поступления.

Древесные отходы – это мелкие остатки лесоматериалов, древесного сырья, образующихся в процессе производства основной продукции лесозаготовок, лесопиления, деревообработки, рубок ухода за лесом. Основной их особенностью является средняя теплота сгорания, обеспечивающая низкий уровень выбросов загрязняющих веществ при сжигании, а также малое процентное содержание зольного остатка.

Научные исследования потенциала MSF-топлива

Научные исследования по использованию горючих отходов ведутся кафедрами «Теплогазоснабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета и «Физика и энергоэффективные технологии» Белорусского государственного университета транспорта с 2005 г. Разработана технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием образующихся на предприятиях и в коммунальном хозяйстве осадков сточных вод, вязких углеводородсодержащих и древесных отходов. Преимуществами полученного MSF-топлива являются полное сжигание используемых в нем горючих компонентов с выделением заданных тепло-

технических характеристик и соответствие требованиям транспортировки и хранения.

Представленная технология получения твердого топлива позволяет использовать в качестве связующего компонента нефтешламы, насыщенные нефтепродуктами опилки, ветошь, сорбирующие материалы, эмульсии нефтепродуктов, отработанные смазки, отходы очистки мазутных и нефтяных резервуаров, нефтеловушек очистных сооружений. При этом доля УВД-отходов в топливе при совместном использовании ОСВ и древесных отходов составляет 3,0–7,9 %. Пределы варьирования зависят от содержания ОСВ, причем для эффективного и экологически безопасного сжигания MSF-топлива долевое соотношение указанного компонента должно быть 32,8–48,6 %. Соблюдение нормированных параметров при сжигании многокомпонентного топлива обеспечивается в основном за счет повышенного использования чистых отходов, например отходов деревообработки, лесопиления и переработки древесины, по разным причинам не находящих технологического применения (механические примеси, высокая влажность, разный морфологический состав, биохимические процессы), сельскохозяйственного производства и переработки продукции.

В основу научных исследований положено изменение подходов к брикетированию и совершенствование технологических схем и процессов производства твердого топлива. Схема процесса брикетирования в упрощенном виде состоит из операций, представленных на рис. 4.



Рис. 4. Последовательность операций получения брикетированного MSF-топлива

Fig. 4. Sequence of operations for obtaining briquetted MSF-fuel

Для реализации указанной технологической схемы создана опытно-промышленная установка, обеспечивающая все необходимые циклы технологического регламента производства топлива. Поставлен ряд научных экспериментов [2–10], позволивших выявить закономерности и впоследствии создать промышленную установку, которая работает в г. Речице. Принципиальная технологическая схема производства MSF-топлива с использованием ОСВ методом непрерывного брикетирования влажных многокомпонентных составов представлена в [9].

Проведено имитационное моделирование процесса брикетирования, учитывающее особенности работы установки и технологии получения твердого топлива на основе многокомпонентных смесей. Целесообразность имитационного моделирования обусловлена необходимостью исследовать основные параметры технологического процесса и определить его характеристик, рассмотреть варианты модели, отвечающие различным сторонам функционирования опытно-промышленной установки, и получить значения количественных характеристик разработанного технологического процесса. Моделирование позволяет проанализировать различные сценарии путем проведения экспериментов в режиме реального времени на имитационной модели установки, а не на реальном объекте. Это дает возможность сэкономить ресурсы, избежав слишком дорогих экспериментов, и вместе с тем проиграть любые ситуации, включая те, при которых установка может выйти из строя.

Для моделирования технологического процесса по производству твердого топлива на ос-

нове смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов предложена математическая модель массового обслуживания, реализованная в пакете автоматизации имитационного моделирования GPSSWorld. Испытание включало два этапа: верификацию и проверку адекватности. Последний этап проведен на реальных данных по статистике работы опытно-промышленной установки. Затем осуществлена оценка: погрешности имитации, обусловленной наличием в имитационной модели генераторов псевдослучайных чисел; длины переходного периода в модели, устойчивости результатов моделирования; чувствительности откликов к изменениям входных параметров.

Разработанная имитационная модель технологического процесса для производства твердого топлива на основе смеси ОСВ, древесных и вязких углеводородсодержащих отходов позволила определить:

- оптимальное соотношение компонентного состава брикетируемой массы (ОСВ 48 %, древесных отходов 49 %, отходов нефтепродуктов 3 %);

- оптимальную влажность брикетируемой массы (38–43 %), при которой производительность установки будет максимальной и составит не менее 18,2 кг/мин.

Полученные данные использованы для имитационного моделирования экспериментов с многокомпонентными составами твердого топлива с обработкой в программе Statistica 7. Кроме того, они позволили в процессе подготовки многокомпонентных смесей достигать гомогенизации с выделением природных связующих

компонентов без химического и термического воздействия. Так, при обработке отходов импульсным искровым разрядом методом электрогидравлической обработки можно снижать содержание нежелательных химических веществ, что обеспечивает экологичность получаемого топлива. За счет определенной частоты и силы разряда достигается необходимая консистенция влажной смеси с мелкодисперсными частицами и связующими веществами, образующими коллоидно-дисперсные растворы, пригодные к брикетированию [7].

Поскольку некоторые компоненты в составе твердого топлива на основе горючих отходов малоизучены, помимо традиционных параметров дополнительно исследованы фазовые со-

стояния теплотехнических характеристик и фактические значения основных показателей твердого топлива. Лабораторные исследования проведены изотермическими и неизотермическими методами термического разложения веществ многокомпонентного топлива с применением дифференциально-термического анализа (ДТА) и термогравиметрического анализа. Это позволило рассчитать кинетические константы соответствующих процессов, тепловые эффекты реакции, определить температуру начала разложения и другие характеристики [9]. На рис. 5, 6 представлены дериватограммы многокомпонентного твердого топлива разных марок, позволяющие оценить его качество.

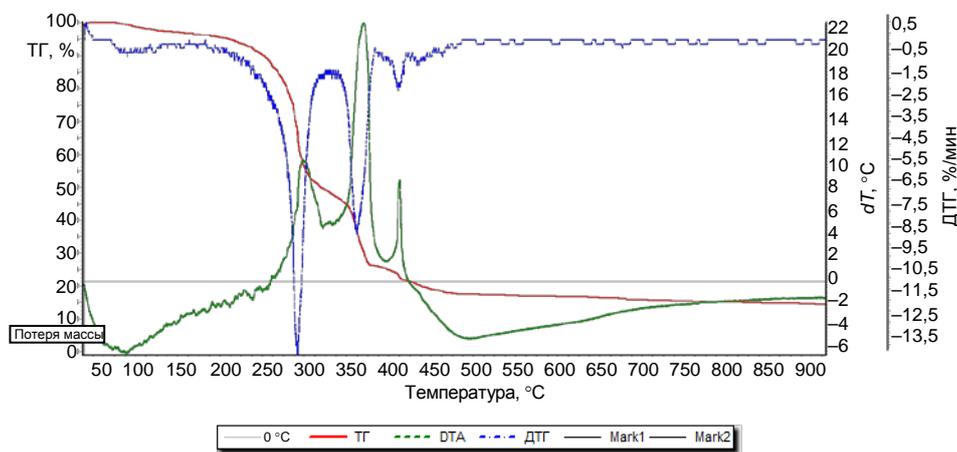


Рис. 5. Дериватограмма двухкомпонентного твердого топлива марки МКУ1-1с

Fig. 5. Derivatogram of two-component solid fuel of MKU[MKU]1-1c grade

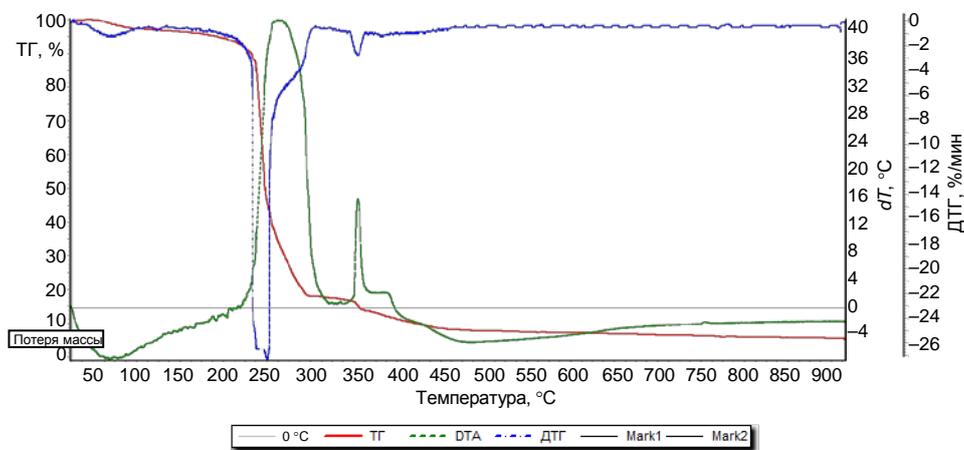


Рис. 6. Дериватограмма трехкомпонентного твердого топлива марки МСУ8-1с

Fig. 6. Derivatogram of three-component solid fuel of MSU[MSU]8-1c grade

Термический анализ двухкомпонентного топлива марки МКУ1-1с, полученного на основе смеси древесных опилок (50 %) и ОСВ очистных сооружений (50 %) (рис. 6), показывает, что терморазложение топлива начинается с испарения свободной влаги (содержание 2 %). Это заметно по пику ДТА при достижении максимальной температуры 100 °С. При температуре около 260 °С начинается интенсивная деструкция основных компонентов топлива и отмечается первый эндотермический пик горения 320 °С. В результате на графике образуется ступенчатый пик в интервале 260–320 °С, сопровождаемый выделением основной массы летучих веществ с потерей 40,0 % массы. При этом наблюдаются еще два эндотермических пика горения, указывающие на реакции вторичного пиролиза топлива: в интервалах 350–380 °С с дополнительной потерей 20 % массы и 400–420 °С с потерей 5 % массы летучих продуктов. Зольность топлива составила 18 %.

Термический анализ трехкомпонентного топлива марки МСУ8-1с, полученного на основе смеси древесных опилок (70 %), лигнина (15 %), нефтешламов (15 %) (рис. 7), также показывает, что терморазложение топлива начинается с испарения свободной влаги (содержание 3 %). Это заметно по пику ДТА при достижении максимальной температуры 120 °С. При температуре около 230 °С начинается интенсивная деструкция основных компонентов топлива и отмечается первый эндотермический пик горения 300 °С. В результате на графике образуется ступенчатый пик в интервале 230–300 °С, сопровождаемый выделением основной массы летучих веществ с потерей 75,0 % массы. При этом наблюдаются еще два эндотермических пика горения, указывающие на реакции вторичного пиролиза топлива в интервалах 350–370 °С с потерей 3 % массы и 380–390 °С с потерей 1 % массы летучих продуктов. Зольность топлива составила 8 %.

Зольности трехкомпонентного топлива марки МСУ8-1с, определенная согласно реакции горения, на 10 % выше, чем у двухкомпонентного топлива марки МКУ1-1с, что объясняется

наличием минеральных составляющих в используемых нефтешламах. При этом показатели зольности обеих исследованных марок твердого топлива, полученного на основе различного соотношения коммунальных, углеродсодержащих и древесных отходов, с хорошим запасом (от 2 до 12 %) соответствуют требованиям норм и допусков, изложенных в ГОСТ 11022–95 и ГОСТ 33511.

ВЫВОДЫ

1. В современном мире как никогда актуален вопрос утилизации промышленных и бытовых отходов и обеспечения экологической безопасности. Его решением может стать внедрение принципов циркулярной экономики, что в долгосрочной перспективе позволит снизить импортозависимость и укрепить экономическую безопасность государства.

2. Разработана технология многокомпонентного брикетирования твердого топлива (MSF-топлива), позволяющая сократить экономические потери от неиспользования горючих отходов производственной и коммунальной жизнедеятельности человека, не нашедших технологического применения. Исследованы оптимальные составы топлива, включающего полидисперсные твердые коммунальные отходы и связующие, в том числе на основе отходов нефтепродуктов.

3. Использование математических моделей и имитационного моделирования технологического процесса производства позволяет рассчитать оптимальное с энергетической и экологической точек зрения соотношение компонентного состава топлива. Особенностью реализации такой технологической разработки является подбор компонентов для брикетирования твердого топлива с учетом основных характеристик энергоустановок и возможность достижения высокой производительности брикетирования при наибольшей плотности топливных брикетов. Результаты численного моделирования по определению оптимального состава брикетированного многокомпонентного топлива подтверждаются данными проведенного термического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сочеева, В. Е. Циркулярная модель экономики как новый подход к проблеме устойчивого развития / В. Е. Сочеева // Экономика и бизнес: теория и практика. 2018. № 7. С. 122–125.
 2. Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов / Б. М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>.
 3. Хрусталева, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергоэффективность. 2016. № 4. С. 18–22.
 4. Хрусталева, Б. М. К вопросу применения эксергетического метода термодинамического анализа при оценке и разработке энергоиспользования в промышленных теплотехнологиях / Б. М. Хрусталева, В. Н. Романюк, А. Н. Пехота // Энергетическая стратегия. 2017. № 1. С. 50–56.
 5. Хрусталева, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158>.
 6. Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water / A. N. Pekhota [et al.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 6. С. 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>.
 7. Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо: моногр. / А. Н. Пехота. Гомель: БелГУТ, 2021. 243 с.
 8. Пехота, А. Н. Определение эффективности параметров брикетирования и сушки многокомпонентных составов твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева // Энергетическая стратегия. 2022. № 2. С. 34–38.
 9. Пехота, А. Н. Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива / А. Н. Пехота, С. А. Филатов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155>.
 10. Пехота, А. Н. Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием некондиционных горючих коммунальных и производственных отходов / А. Н. Пехота // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. С. 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174>.
- Поступила 06.04.2022
Подписана в печать 10.06.2022
Опубликована онлайн 29.07.2022
1. Socheeva V. E. (2018) Circular Economy Model as a New Approach to the Problem of Sustainable Development. *Ekonomika i Biznes: Teoriya i Praktika* [Economics and Business: Theory and Practice], (7), 122–125 (in Russian).
 2. Khrustalev B. M., Pekhota A. N., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap (2021) Solid Fuel Based on Waste of Low-Utilized Combustible Energy Resources. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 20 (1), 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65> (in Russian).
 3. Khrustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Composite Solid Fuel Based on Secondary Combustible Waste. *Energoeffektivnost* [Energy Efficiency], (4), 18–22 (in Russian).
 4. Khrustalev B. M., Romaniuk V. N., Pekhota A. N. (2017) On the Issue of Applying the Exergy Method of Thermodynamic Analysis in the Assessment and Development of Energy use in Industrial Heat Technologies. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (1), 50–56 (in Russian).
 5. Khrustalev B. M., Pekhota A. N. (2017) Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158> (in Russian).
 6. Pekhota A. N., Khrustalev B. M., Vu Minh Phap, Romaniuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen Thuy Nga (2021) Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (6), 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>.
 7. Pekhota A. N. (2021) *Multicomponent Solid Fuel*. Gomel, Publishing House of the Belarusian State University of Transport. 243 (in Russian).
 8. Pekhota A. N., Khrustalev B. M. (2022) Determination of the Efficiency of Briquetting and Drying Parameters of Multicomponent Solid Fuel Compositions. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (2), 34–38 (in Russian).
 9. Pekhota A. N., Filatov S. A. (2022) Investigation of Energy Properties of Briquetted Multicomponent Fuel by Thermo-Analytical Methods. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65, (2), 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155> (in Russian).
 10. Pekhota A. N. (2022) Study of Energy Characteristics of Multicomponent Solid Fuel Using Substandard Municipal and Industrial Waste Fuels. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 21 (2), 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174> (in Russian).

REFERENCES

1. Socheeva V. E. (2018) Circular Economy Model as a New Approach to the Problem of Sustainable Development.

Received: 06.04.2022

Accepted: 10.06.2022

Published online: 29.07.2022

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-349-356>

УДК 656.032, 338.47

Развитие систем оплаты проезда на общественном транспорте в Республике Беларусь

Асп. К. В. Синютич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В Республике Беларусь применяются традиционные и современные системы оплаты проезда на общественном пассажирском транспорте. Традиционная система распространена во всех населенных пунктах страны, в качестве подтверждения оплаты в ней используются билеты на проезд на бумажном носителе. В современных системах оплаты проезда для подтверждения оплаты транспортной услуги применяются электронные билеты, сформированные в мобильных приложениях различных электронных систем, на физических носителях – бесконтактных смарт-картах, а также записи о соответствующих транзакциях со счетов банковских карт. В виде электронного билета или электронной записи на бесконтактных смарт-картах могут быть записаны как разовые поездки, так и многоразовые проездные билеты. В статье предложены мероприятия, направленные на повышение уровня окупаемости общественного пассажирского транспорта, проанализированы объем пассажирских перевозок за 2016–2020 гг., действующие в городах Беларуси решения местных органов власти, устанавливающие нормативно-правовые и стоимостные показатели по оплате проезда в общественном пассажирском транспорте. Выполнено сравнение реализованных в городах современных систем оплаты проезда. На основании сравнения положительных и отрицательных сторон функционирования электронных систем оплаты проезда с позиций пассажира и перевозчика для распространения на общественном пассажирском транспорте городов Беларуси рекомендованы системы TapXphone и T-PAУ.

Ключевые слова: оплата проезда, пассажирские перевозки, проездной билет, транспортная карта

Для цитирования: Синютич, К. В. Развитие систем оплаты проезда на общественном транспорте в Республике Беларусь / К. В. Синютич // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 349–356. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-349-356>

Development of Public Transport Fare Payment Systems in the Republic of Belarus

К. V. Siniutsich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The Republic of Belarus uses traditional and modern systems of fare payment for public passenger transport. In the traditional system, paper tickets are used as proof of payment; such a system is common in all settlements of the country. Electronic tickets generated in mobile applications of various electronic systems, on physical media – contactless smart cards,

Адрес для переписки

Синютич Кирилл Валерьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-31
Kirylasiniutsich@gmail.com

Address for correspondence

Siniutsich Kirill V.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-31
Kirylasiniutsich@gmail.com

as well as records of relevant transactions from bank card accounts are used in modern fare systems to confirm payment for a transport service. Both single trips and multiple travel tickets can be recorded in the form of an electronic ticket or an electronic entry on the contactless smart cards. The paper proposes measures aimed at increasing the level of payback of public passenger transport, analyzes the volume of passenger traffic for 2016–2020, the decisions of local authorities in force in the cities of Belarus that establish regulatory and cost indicators for fares in public passenger transport. The comparison of modern fare payment systems implemented in cities is carried out. TapXphone and T-PAY systems are recommended for distribution on public passenger transport in Belarusian cities on the basis of the comparison of the positive and negative aspects of the functioning of electronic fare collection systems from the position of a passenger and a carrier.

Keywords: fare, passenger transportation, travel tickets, transport card

For citation: Siniutich K. V. (2022) Development of Public Transport Fare Payment Systems in the Republic of Belarus. *Science and Technique*. 21 (4), 349–356. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-349-356> (in Russian)

Введение

Основными мероприятиями, направленными на повышение уровня окупаемости предприятий общественного пассажирского транспорта и соответственно уменьшение размера субсидий из местных бюджетов на покрытие части затрат, не покрываемых доходами транспортных предприятий, являются следующие:

- снижение себестоимости перевозок;
- повышение производительности труда сотрудников;
- оптимизация маршрутной сети без ухудшения условий транспортного обслуживания пассажиров;
- разработка и реализация маркетинговых стратегий, направленных на увеличение спроса на транспортные услуги;
- создание справедливого и комфортного с позиции пассажира перечня доступных билетов для разовых поездок и проездных документов;
- создание условий для оплаты проезда всеми возможными и удобными пассажирам способами (как один из способов снижения количества пассажиров, не оплачивающих проезд).

Последние три мероприятия также влияют на привлекательность общественного пассажирского транспорта, стимулируют рост пассажиропотока. При этом в настоящее время уровень окупаемости общественного транспорта не превышает 70 %. Изложенное свидетельствует об актуальности данного исследования.

Изменение объема перевозок пассажиров общественным транспортом в Республике Беларусь

По данным Национального статистического комитета за период с 2016 по 2020 г., объем перевозок пассажиров автомобильным (автобусами), городским электрическим транспортом и метрополитеном варьировался в пределах от 1541,4 до 1885,5 млн чел. (рис. 1) [1].

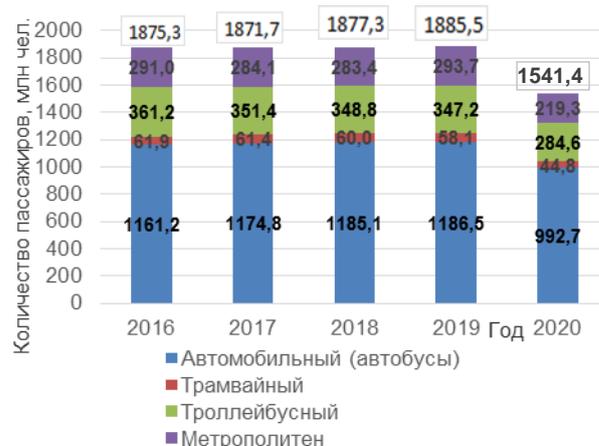


Рис. 1. Объем перевозок пассажиров разными видами транспорта за 2016–2020 гг.

Fig. 1. Volume of passenger traffic by different kinds of transport in 2016–2020

До 2019 г. количество перевезенных пассажиров всеми видами транспорта ежегодно увеличивалось, при этом наблюдались некоторые колебания в долях перевозок различным транспортом: росло число перевезенных пассажиров автобусами при ежегодном уменьшении их числа трамваями и троллейбусами. Снижение доли перевозок пассажиров последними можно объяснить оптимизацией маршрутной сети

с частичной заменой перевозок, осуществляемых городским электрическим транспортом, на перевозки автобусным с целью уменьшения общих расходов на транспортное обслуживание населения. В 2020 г. произошло падение объема пассажирских перевозок почти на 20 %, что связано с изменением эпидемиологической обстановки и натуральным сокращением количества населения в Республике Беларусь.

Системы оплаты проезда на общественном транспорте в городах Беларуси

Решениями местных органов власти устанавливаются нормативно-правовые и стоимостные показатели по оплате проезда в общественном пассажирском транспорте [2–8]. Так, определены стоимость проезда, перечень проездных документов и особенности их изменения с учетом целого ряда факторов, включающих территорию проезда, вид транспорта, сроки действия проездных документов и пр.

Проведенное исследование показало, что имеются различия в стоимости одной поездки в Минске и других городах Беларуси. Изменение тарифов на одну поездку в течение последних пяти лет происходило практически одновременно по всей территории страны на величину от 0,05 до 0,10 руб. Действующие по состоянию на 24.12.2021 тарифы на городские перевозки в регулярном сообщении в городах республики представлены в табл. 1.

В настоящее время в Беларуси на городском транспорте применяются традиционные (с использованием билетов на проезд на бумажном носителе) и современные способы оплаты. К последним можно отнести бесконтактные

смарт-карты (БСК) с записанными на них разовыми поездками и/или проездными, билеты в форме электронной записи в специализированных приложениях для мобильных телефонов («Оплати. Транспорт» [9], М-Belarusbank (финтех-стартап Cashew) [10], Т-РАУ [11]), с помощью технологии TapXphone [12] и банковских карт [13].

Билеты на одну поездку на бумажном носителе (традиционная система оплаты проезда) для осуществления поездок на общественном пассажирском транспорте реализуются во всех городах страны. При этом в столице на бумажном носителе продаются билеты только на одну поездку.

Следует отметить, что во многих городах Беларуси реализованы автоматизированные системы, позволяющие совершать оплату проезда посредством электронных билетов. Так, в коммунальном городском пассажирском транспорте Минска действует автоматизированная система оплаты проезда IBA Automated Fare Collection (АСОП IBA AFC), которая предназначена для оплаты и контроля оплаты проезда, продажи и пополнения электронных проездных документов на базе бесконтактных технологий, а также для сбора и анализа статистической информации о работе общественного транспорта [14]. Для работы данной системы общественный пассажирский транспорт оснащается валидаторами (считывателями информации) бесконтактных смарт-карт. Во время реализации билета в пунктах продажи на карту записывается выбранный пассажиром тариф или несколько тарифов. Необходимый тариф на карту можно также записать удаленно через единое расчетное и информационное пространство (ЕРИП) [15].

Таблица 1

Стоимость одной поездки в городском регулярном сообщении в городах Беларуси
Cost of one trip in urban regular traffic in the cities of Belarus

Территория действия тарифа	Вид транспорта	Тариф, руб.
г. Минск	Автобус (в обычном и скоростном сообщении), троллейбус, трамвай	0,75
	Автобус категории МЗ в экспрессном сообщении (далее – автобус-экспресс)	0,90
	Метрополитен	0,80
Остальные города республики	Автобус, троллейбус, трамвай	0,70
	Автобус-экспресс	0,80

Для совершения оплаты проезда в транспорте пассажир подносит карту к валидатору, при наличии на карте действующего тарифа оплата подтверждается валидатором, а информация об оплате заносится на карту и передается в процессинговый центр перевозчика.

Данная система поддерживает возможность введения других видов тарификации, например дифференцированной оплаты поездки по расстоянию, льготных тарифов с использованием персонализированных карт. Однако эти дополнительные возможности не реализованы в настоящее время. Подробнее о преимуществах и принципе работы БСК изложено в [16].

Анализ такой системы оплаты проезда в Минске выявил ряд недостатков организационного и технического характера, среди которых следует отметить следующие:

- для масштабирования данной системы на другие города требуется оборудовать общественный транспорт дорогостоящим оборудованием – валидаторами, а пассажиру необходимо приобрести БСК;

- записать нужный билет (или билеты) на смарт-карту можно только в пунктах продажи билетов, в которых должно быть установлено специальное оборудование, а при записи нужного билета с использованием ЕРИП смарт-карту в общественном пассажирском транспорте можно будет использовать только после активации билета в специальных устройствах, расположенных на ограниченном числе остановок в Минске;

- активация многоразовых проездных документов происходит с начала суток, в которые был приобретен проездной билет, а не с момента приобретения билета или совершения первой поездки.

В ряде городов республики билеты на одну поездку можно приобрести с использованием приложений для мобильных телефонов. Города, в которых оплата разовой поездки может быть совершена с помощью мобильных приложений (в качестве альтернативы оплаты наличными денежными средствами), представлены на рис. 2.

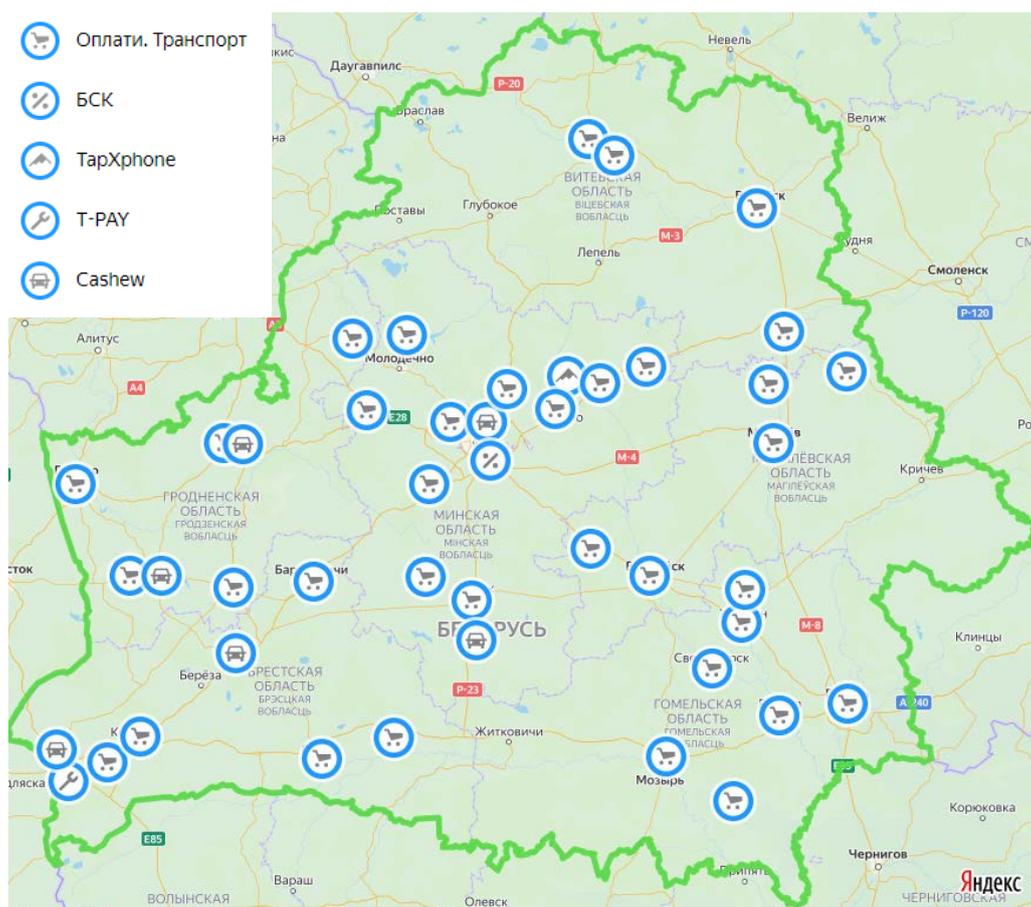


Рис. 2. Системы оплаты проезда в городах Беларуси

Fig. 2. Fare payment systems in the cities of Belarus

Преимущества и недостатки систем оплаты проезда

Система «Оплати. Транспорт» нацелена на реализацию электронных билетов на проезд в общественном транспорте с использованием банковских приложений на смартфонах пассажиров. Для идентификации транспортного средства и соответственно перевозчика или оператора, на счет которого должна быть осуществлена оплата проезда, используются уникальные QR-коды. При этом оплата производится с отдельного счета в приложении, на который предварительно нужно перевести деньги с банковской платежной карты белорусского банка. Можно выделить следующие преимущества данной системы по сравнению, например, с АСОП ИВА АС:

- минимальные финансовые затраты на внедрение системы в общественном транспорте (задействуется существующее у перевозчиков оборудование), организационные действия помогают разрешить банк-оператор данной системы;

- возможность относительно быстрого развертывания системы на общественном транспорте любого города и реализации в системе всех существующих на общественном транспорте тарифов, в том числе проездных билетов;

- большинство пассажиров имеет необходимые устройства (смартфоны), на которых может работать соответствующее банковское приложение.

Недостатки системы «Оплати. Транспорт»:

- осуществление оплаты проезда невозможно без работающего смартфона или при отсутствии доступа в сеть Интернет;

- сложная процедура регистрации при первом использовании банковского приложения с предоставлением персональных данных в Межбанковскую систему идентификации [17];

- при наличии приложений с пройденной процедурой регистрации для каждой оплаты проезда необходимо совершить ряд дополнительных действий, которые сложны для пожилых пассажиров, людей с ментальной инвалидностью;

- наличие комиссии для перевозчика за продажу каждого билета;

- невозможность использования ее иностранными гражданами.

Система оплаты проезда «Финтех-стартап Cashew» так же, как и «Оплати. Транспорт», реализована через функционал банковского мобильного приложения и для идентификации транспортного средства использует уникальные QR-коды. Оплата производится с банковской платежной карты, которую предварительно нужно привязать к мобильному приложению М-Belarusbank. Система реализована на ряде экспрессных маршрутов Минска в транспортных средствах категории М2, а также на коммунальном транспорте Бреста, Ивацевичей, Волковыска, Лиды и других городов. Cashew позволяет реализовывать только билеты на одну поездку, в остальном преимущества и недостатки этой системы те же, что и в «Оплати. Транспорт».

Исследование показало, что для общественного пассажирского транспорта в 2021 г. разработана система оплаты проезда Т-РАУ. Как и системы «Оплати. Транспорт» и «Финтех-стартап Cashew», работа Т-РАУ построена на взаимодействии мобильного приложения Т-РАУ на смартфонах пассажиров и QR-кодов в салонах пассажирских транспортных средств. Отличие данной системы от «Оплати. Транспорт» и «Финтех-стартап Cashew» состоит в том, что процесс оплаты проезда совершается через ЕРИП с использованием любого банковского мобильного приложения (в том числе приложений «Оплати», М-Belarusbank и др.). После успешного совершения оплаты через ЕРИП приложением Т-РАУ автоматически генерируется электронный билет на одну поездку. Проездные билеты с использованием данной системы не реализуются. В остальном Т-РАУ имеет преимущества и недостатки, схожие с системами «Оплати. Транспорт» и «Финтех-стартап Cashew».

Значительный практический интерес представляют собой системы, ориентированные на оплату проезда без необходимости использования пассажирами специальных мобильных приложений для смартфонов. Примером такой системы оплаты проезда является TapXphone,

при помощи которой транспортные организации могут принимать оплату проезда бесконтактными банковскими платежными картами. Для возможности приема оплаты разовых поездок с применением TapXphone перевозчик приобретает для водителей или кондукторов смартфоны с NFC-модулем. Эти устройства дешевле, чем современные платежные терминалы.

В валидаторах, установленных в Минске для оплаты проезда АСОП ИВА AFC, технически предусмотрена опция приема оплаты разовой поездки бесконтактными банковскими платежными картами. При этом в минском метрополитене непосредственно при проходе через турникет с помощью валидаторов, размещенных на турникетах, и в поездах городских линий через валидаторы у выходов из вагона разовые поездки можно оплатить банковской пластиковой картой. В то же время на таких же устройствах наземного общественного пассажирского транспорта Минска данная опция отключена перевозчиком.

Основными причинами слабого распространения удобных для пассажиров систем оплаты проезда, по мнению автора, являются:

– высокая стоимость оборудования для организации возможности приема к оплате непосредственно в транспортном средстве бесконтактных банковских карт;

– большие затраты на эквайринг и комиссионное вознаграждение банка при относительно небольшой стоимости разовой поездки в общественном транспорте (комиссионное вознаграждение за каждую операцию может составлять сумму, равную стоимости поездки).

С позиции минимизации затрат транспортных предприятий на приобретение дополнительного оборудования, упрощения процедуры оплаты проезда пассажирами с помощью электронных билетов для распространения на общественном пассажирском транспорте городов Беларуси оптимальными являются системы TapXphone и T-PAУ.

ВЫВОДЫ

1. Во всех городах Беларуси традиционно применяются системы оплаты проезда билетами

на одну поездку на бумажном носителе. Вместе с тем в мире развиваются современные системы оплаты проезда с использованием электронных билетов на одну поездку. Наибольшее развитие в республике получают системы с минимальными затратами перевозчиков на оборудование для их работы. При оплате проезда наиболее простыми с позиции удобства для пассажиров являются системы с использованием бесконтактных банковских карт, которые получили развитие только в двух городах – Минске и Борисове.

2. Важно произвести комплексное исследование данной проблемы и распространить опыт оплаты проезда в общественном транспорте и на другие города республики. Это позволит повысить уровень окупаемости общественного пассажирского транспорта, создать комфортные условия для пассажиров, сократив время на приобретение билетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экономическая статистика. Транспорт. Годовые данные [Электронный ресурс] // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/transport/godovye-dannye/>. Дата доступа: 24.12.2021.
2. О тарифах на городские перевозки пассажиров и ручной клади всеми видами транспорта (за исключением железнодорожного) в регулярном сообщении: решение Минского гор. исп. ком. от 12 декабря 2016 г. № 3715 [Электронный ресурс] // Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://etalon.by/document/?regnum=r916o0080367>. Дата доступа: 24.12.2021.
3. О тарифах на городские и пригородные перевозки в регулярном сообщении: решение Брестского обл. исп. ком. от 20 ноября 2018 г. № 746 [Электронный ресурс] // Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r918b0092620>. Дата доступа: 24.12.2021.
4. О тарифах на городские перевозки пассажиров и ручной клади всеми видами транспорта в регулярном сообщении: решение Витебского обл. исп. ком. от 9 декабря 2016 г. № 760 [Электронный ресурс] // Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r916v0080284>. Дата доступа: 24.12.2021.
5. О тарифах на городские перевозки пассажиров и ручной клади всеми видами транспорта в регулярном сообщении: Решение Гомельского обл. исп. ком. от 19 ноября 2020 г. № 918 [Электронный ресурс] // Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Режим досту-

- па: <https://etalonline.by/document/?regnum=r920g0105324>. Дата доступа: 24.12.2021.
6. О тарифах на городские перевозки пассажиров и ручной клади всеми видами транспорта в регулярном сообщении на территории Гродненской области: решение Гродненского обл. исп. ком. от 20 декабря 2016 г. № 729 [Электронный ресурс] // Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r916r0080424>. Дата доступа: 24.12.2021.
 7. О тарифах на городские перевозки пассажиров и ручной клади автобусами в регулярном сообщении: решение Минского обл. исп. ком. от 27 ноября 2020 г. № 1015 [Электронный ресурс] // Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r920n0105423>. Дата доступа: 24.12.2021.
 8. О тарифах на городские перевозки пассажиров и ручной клади всеми видами транспорта в регулярном сообщении и пригородные автомобильные перевозки пассажиров, багажа и (или) ручной клади в регулярном сообщении на территории Могилевской области: решение Могилевского обл. исп. ком. от 23 декабря 2016 г. № 51-9 «» [Электронный ресурс] // Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=r916m0080633>. Дата доступа: 24.12.2021.
 9. Инструкция, как пользоваться сервисом [Электронный ресурс] // Оплати. Транспорт. Режим доступа: <https://www.o-plati.by/instruction>. Дата доступа: 24.12.2021.
 10. Банк реализовал возможность оплаты проезда по QR-коду в автобусах и троллейбусах Бреста [Электронный ресурс] // АСБ Беларусбанк. Режим доступа: https://belarusbank.by/ru/33139/press/bank_news/38096. Дата доступа: 24.12.2021.
 11. IBA Group запустила в Бресте систему оплаты проезда в транспорте AFC [Электронный ресурс] // IBA Group. Режим доступа: <https://iba.by/news/t-pay-brest-09-12-21/>. Дата доступа: 24.12.2021.
 12. IBA Group предложила транспортникам принимать оплату за проезд через NFC-смартфоны [Электронный ресурс] // IBA Group. Режим доступа: <https://iba.by/news/tarxphone-wecon-24-04-20/>. Дата доступа: 24.12.2021.
 13. Оплата проезда [Электронный ресурс] // Государственное предприятие «Минсктранс». Режим доступа: <https://minsktrans.by/oplata-proezda/>. Дата доступа: 24.12.2021.
 14. Автоматизированная система оплаты проезда IBA AFC [Электронный ресурс] // IBA Group. Режим доступа: <https://iba.by/solutions-and-products/asokp-iba-afc/>. Дата доступа: 24.12.2021.
 15. Об АИС «Расчет» [Электронный ресурс] // Небанковская кредитно-финансовая организация «ЕРИП». Режим доступа: <https://www.raschet.by/o-sisteme/ob-ais-raschet/>. Дата доступа: 24.12.2021.
 16. Степаненко, А. А. Развитие системы оплаты транспортных услуг / А. А. Степаненко // Студент: наука, профессия, жизнь: материалы II Всерос. студ. науч. конф. с междунар. участием, Омск, 20–30 апр. 2015 г. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. С. 417–422.
 17. Регистрация в межбанковской системе идентификации Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Межбанковская система идентификации. Режим доступа: <https://ioauth.raschet.by/autoregister/>. Дата доступа: 24.12.2021.

Поступила 05.04.2022

Подписана в печать 28.06.2022

Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. Economic Statistics. Transport. Annual data. *National Statistical Committee of the Republic of Belarus*. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/transport/godovye-dannye/> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
2. Decision of the Minsk City Executive Committee No 3715 dated December 12, 2016 “On Tariffs for Urban Transportation of Passengers and Hand Luggage by All Modes of Transport (Except for Railway) in Regular Traffic”. *National Center for Legal Information of the Republic of Belarus*. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=r916o0080367> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
3. Decision of the Brest Regional Executive Committee No 746 dated November 20, 2018 “On Tariffs for Urban and Suburban Transportation in Regular Traffic”. *National Center for Legal Information of the Republic of Belarus*. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=r918b0092620> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
4. Decision of the Vitebsk Regional Executive Committee No 760 dated December 09, 2016 “On Tariffs for Urban Transportation of Passengers and Hand Luggage by All Modes of Transport in Regular Traffic”. *National Center for Legal Information of the Republic of Belarus*. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=r916v0080284> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
5. Decision of the Gomel Regional Executive Committee No 918 dated November 19, 2020 “On Tariffs for Urban Transportation of Passengers and Hand Luggage by All Modes of Transport in Regular Traffic”. *National Center for Legal Information of the Republic of Belarus*. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=r920g0105324> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
6. Decision of the Grodno Regional Executive Committee No 729 dated December 20.2016 “On Tariffs for Urban Transportation of Passengers and Hand Luggage by All Modes of Transport in Regular Traffic on the Territory of the Grodno Region”. *National Center for Legal Information of the Republic of Belarus*. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=r916r0080424> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
7. Decision of the Minsk Regional Executive Committee No 1015 dated November 27, 2020 “On Tariffs for Urban Transportation of Passengers and Hand Luggage by Buses in Regular Traffic”. *National Center for Legal Information of the Republic of Belarus*. Available at: <https://etalonline.by/>

- document/?regnum=r920n0105423 (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
8. Decision of the Mogilev Regional Executive Committee No 51-9 dated December 23, 2016 "On Tariffs for Urban Transportation of Passengers and Hand Luggage by All Modes of Transport in Regular Traffic and Suburban Road Transportation of Passengers, Baggage and (or) Hand Luggage in Regular Traffic on the Territory of the Mogilev Region". *National Center for Legal Information of the Republic of Belarus*. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=r916m0080633> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
 9. Instructions on How to Use the Service. *Pay. Transport*. Available at: <https://www.o-plati.by/instruction> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
 10. The Bank Has Implemented the Possibility of Paying for Travel by QR-Code in Buses and Trolleybuses of Brest. *ASB Belarusbank*. Available at: https://belarusbank.by/ru/33139/press/bank_news/38096 (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
 11. IBA Group Has Launched AFC Transport Fare Payment System in Brest. *IBA Group*. Available at: <https://iba.by/news/t-pay-brest-09-12-21/>. (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
 12. IBA Group has offered carriers to accept tolls via NFC smartphones. *IBA Group*. Available at: <https://iba.by/news/tapxphone-wecon-24-04-20> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
 13. Fare Payment. *State Enterprise "Minsktrans"*. Available at: <https://minsktrans.by/oplata-proezda/> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
 14. IBA AFC Automated Fare System. *IBA Group*. Available at: <https://iba.by/solutions-and-products/asokp-iba-afc/> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
 15. About AIS "Calculation". *Non-Banking Credit and Financial Organization "ERIP"*. Available at: <https://www.raschet.by/o-sisteme/ob-ais-raschet/> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).
 16. Stepanenko A. A. (2015) Development of Payment System for Transport Services. *Student: Nauka, Professiya, Zhizn': Materialy II Vseros. Stud. Nauch. Konf. S Mezhdunar. Uch., Omsk, 20–30 Apr. 2015 g.* [Student: Science, Profession, Life: Proceedings of the 2nd All-Russian Student Scientific Conference with International Participation, Omsk, April 20–30, 2015]. Omsk, Omsk State Transport University, 417–422 (in Russian).
 17. Registration in the Interbank Identification System of the Republic of Belarus. *Interbank Identification System*. Available at: <https://ioauth.raschet.by/autoregister/> (Accessed 24 December 2021) (in Russian).

Received: 05.04.2022

Accepted: 28.06.2022

Published online: 29.07.2022