

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. 20 / No 5 / 2021

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

Машиностроение и машиноведение

- Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И.,
Оковитый В. В., Асташинский В. М.**
Оптимизация процесса нанесения покрытий
из порошков металлокерамики методом
плазменного напыления на воздухе 369
- Шелег В. К., Минь Ма, Белоцерковский М. А.**
Технология получения и демпфирующие
свойства аэрированных полимерных покрытий . . . 375
- Иванов А. С., Пузырев М. С., Чикишев Е. М.**
Разработка и обоснование двухдискового
рабочего органа сельскохозяйственной
машины для обработки почвы 383
- Gorbunov A. V., Devoino O. G., Gorbunova V. A.,
Yatskevitch O. K., Koval V. A.**
Thermodynamic Estimation of the Parameters
for the C–H–O–N–Me-Systems as Operating
Fluid Simulants for New Processes
of Powder Thermal Spraying and Spheroidizing
(**Горбунов А. В., Девойно О. Г.,
Горбунова В. А., Яцкевич О. К., Коваль В. А.**
Термодинамическая оценка параметров
систем C–H–O–N–Me как имитаторов рабочей
среды в новых процессах газотермического
напыления и сфероидизации порошков) 390

CONTENTS

Mechanical Engineering and Engineering Science

- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V.,
Astashinsky V. M.**
Optimization of Coating Process from Cermet
Powders by Plasma Spraying in Air 369
- Sheleg V. K., Ma Min, Belotserkovsky M. A.**
Production Technology and Damping Properties
of Aerated Polymer Coatings 375
- Ivanov A. S., Puzyrev M. S., Chikishev E. M.**
Development and Rationale
of Two-Disk Operating Body
of Agricultural Machine for Tillage 383
- Gorbunov A. V., Devoino O. G., Gorbunova V. A.,
Yatskevitch O. K., Koval V. A.**
Thermodynamic Estimation of the Parameters
for the C–H–O–N–Me-Systems as Operating
Fluid Simulants for New Processes
of Powder Thermal Spraying and Spheroidizing . . . 390

Луговой В. П. Теоретический анализ перемещений тонких стержней изогнутой формы	399
---	-----

Строительство

Босаков С. В. К решению контактной задачи для упругой полуполосы	405
Ивашечкин В. В., Медведева Ю. А., Кондратович А. Н., Сацута Е. С. Основы расчета и проектирования двухколонных двухфилترных водозаборных скважин	410
Юхневский П. И. К вопросу о допустимом содержании ионов аммония в химических добавках для бетонов.	420

Транспорт

Kuharonak G. M., Klesso M., Predko A., Telyuk D. Organization of Six-Cylinder Tractor Diesel Working Process (Кухаренок Г. М., Клессо М., Предко А., Телюк Д. Организация рабочего процесса шестицилиндрового тракторного дизеля)	427
Груданов В. Я., Белохвостов Г. И., Ткачева Л. Т. Научно-практические подходы к совершенствованию конструкций глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел	434
Ильин А. П., Терентьев А. Н., Арсланов Ф. Р. Automobile Absorption Conditioner (Ильин А. П., Терентьев А. Н., Арсланов Ф. Р. Автомобильный абсорбционный кондиционер)	445

Экономика промышленности

Ковалев Я. Н., Савуха А. В., Гиринский В. В. Технико-экономическое сравнение конструкций дорожных одежд с использованием местных материалов	449
---	-----

Lugovoi V. P. Theoretical Analysis of Thin Curved Rod Displacements	399
--	-----

Civil and Industrial Engineering

Bosakov S. V. To Solution of Contact Problem for Elastic Half-Strip.	405
Ivashechkin V. V., Medvedeva J. A., Kondratovich A. N., Satsuta E. S. Basics of Calculation and Design of Two-Column Two-Filter Water Intake Wells	410
Yukhnevskiy P. I. On Issue of Permissible Content of Ammonium Ions in Chemical Additives for Concrete	420

Transport

Kuharonak G. M., Klesso M., Predko A., Telyuk D. Organization of Six-Cylinder Tractor Diesel Working Process	427
Grudanov V. Y., Belokhvostov G. I., Tkacheva L. T. Scientific and Practical Approaches to Improving Noise Muffler Designs of Piston Internal Combustion Engines Based on Theory of Numbers	434
Ilyin A. P., Terentiev A. N., Arslanov F. R. Automobile Absorption Conditioner	445

Economy in Industry

Kovalev Ya. N., Savukha A. V., Girinsky V. V. Feasibility Study Comparison of Pavement Designs Using Local Materials	449
--	-----

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*), заместитель главного редактора,
- Белый 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 «Гаююань», 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*),
- Опеляк М.** (*Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша*),
- Пенязьков 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, Комотини, Греческая Республика),

Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),

Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникайш Девелоппмент 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 17 292-65-14

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 30.09.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,25. 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, 2021

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

Address

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

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374>

УДК 621.793.71

Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методом плазменного напыления на воздухе

Канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
инж. В. В. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾

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

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Произведена оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики с различным содержанием твердой фазы методом плазменного напыления на воздухе для восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов, работающих в неблагоприятных условиях. Такие условия обычно создаются в тяжело нагруженных трибосопряжениях во время работы механизмов с небольшой скоростью относительного перемещения поверхностей при трении. Эксплуатируемые рабочие поверхности разрушаются в основном из-за микроконтактного схватывания и последующего отрыва сформированных частиц в точках их контакта. Нанесение специальных защитных покрытий с требуемыми свойствами возможно при изготовлении качественных исходных порошковых материалов и оптимизации технологии их нанесения. Получить такие порошки и порошковые композиции можно методом агломерирования мелкодисперсной порошковой шихты с ее последующим высокотемпературным спеканием. Для выявления механизма упрочнения сформированных газотермическим напылением композиционных покрытий из металлокерамики важные этапы – это оптимизация параметров процесса напыления и изучение свойств получаемых плазменных покрытий. При оптимизации технологических параметров плазменного напыления покрытий учитывали коэффициент использования порошкового материала как основного показателя эффективности процесса, структуру полученных слоев, морфологию отдельных нанесенных на полированную поверхность частиц. В статье приведены данные об элементах структуры напыленных материалов для износостойких покрытий, полученных плазменным напылением на оптимальных режимах. С учетом процессов, происходящих при изнашивании трибосопряжений, эти данные свидетельствуют об имеющихся предпосылках износостойкости исследуемых композиционных покрытий из металлокерамики. Специальные износостойкие покрытия из материалов с мягкой матрицей, упрочненных твердыми включениями $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y$, находят широкое применение в различных отраслях промышленности. На основе подробного анализа особенностей металлокерамических плазменных покрытий можно констатировать, что такие порошковые композиции (комплексные оксиды – металлическая составляющая) часто используются в качестве износостойких плазменных покрытий. Результаты исследований могут быть учтены в случаях нанесения износостойких плазменных покрытий из металлокерамики и композиций на их базе, содержащих твердые фазы в виде оксидов, а также изготовления целого спектра деталей, работающих в условиях интенсивного износа.

Ключевые слова: плазменное напыление, порошковые материалы, газотермически напыленные композиционные покрытия, твердые включения, металлокерамика, изнашивание трибосопряжений, элементы структуры, морфология, износостойкость

Для цитирования: Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методом плазменного напыления на воздухе / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374>

Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Address for correspondence

Okovity Vjacheslav A.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Optimization of Coating Process from Cermet Powders by Plasma Spraying in Air

V. A. Okovity¹, F. I. Panteleenko¹, V. V. Okovity¹, V. M. Astashinsky²

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

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents studies on the optimization of the process of applying coatings from cermet powders with different solid phase contents by plasma spraying in air to restore and harden parts of machines and mechanisms operating under adverse conditions. Such conditions are usually created in heavily loaded tribojoints when the mechanisms operate at a low speed of relative movement of surfaces during friction. At the same time, the destruction of the working surfaces is mainly due to the process of microcontact setting and subsequent detachment of the formed particles at their contact points. The application of special protective coatings with the required properties is possible with the manufacture of high-quality starting powder materials and optimization of the technology for their application. Such powders and powder compositions can be obtained by the method of agglomeration of a fine powder mixture with its subsequent high-temperature sintering. To identify the hardening mechanism of composite coatings made of cermet by gas-thermal spraying, important stages are the optimization of the deposition process parameters and the study of the properties of plasma coatings obtained in this case. When optimizing the technological parameters of plasma spraying of coatings, the utilization rate of the sprayed powder material has been taken into account as the main indicator of the process efficiency, the structure of the obtained layers, and the morphology of individual particles deposited on the polished surface. The paper provides data on the structural elements of sprayed materials for wear-resistant coatings obtained by plasma spraying at optimal conditions. Taking into account the processes that occur during the wear of tribological conjugations, the data indicate the existing prerequisites for the wear resistance of the studied composite coatings made of metal ceramics. Special wear-resistant coatings made of materials with a soft matrix hardened by solid inclusions $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y}$ are widely used in various industries. Based on the detailed analysis of the features of cermet plasma coatings, it can be stated that such powder compositions (complex oxides-metal component) are often used as wear-resistant plasma coatings. The research results can be taken into account in cases of application of wear-resistant plasma coatings made of metal-ceramics and compositions based on them, containing solid phases in the form of oxides, as well as the manufacture of a whole range of parts operating under conditions of intense wear.

Keywords: plasma spraying, powder materials, gas-thermally sprayed composite coatings, solid inclusions, metal ceramics, tribological conjugation wear processes, structural elements, morphology, wear resistance

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2021) Optimization of Coating Process from Cermet Powders by Plasma Spraying in Air. *Science and Technique*. 20 (5), 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374> (in Russian)

Введение

Для современных деталей один из главных критериев – низкая материалоемкость. Применение износостойких газотермических покрытий на деталях позволяет значительно снизить металлоемкость изделия, заменить стальные конструкции на более легкие материалы при сохранении и даже увеличении ресурса работы. Чтобы достичь поставленной цели, авторы проанализировали условия формирования структур плазменных покрытий, исследовали влияние основных технологических параметров (расхода плазмообразующего газа, температурного режима напыления) на формирование структур

плазменных покрытий из композиционных металлокерамических порошков, обобщили результаты исследований по плазменному напылению композиционных покрытий.

Износостойкие покрытия из материалов с мягкой матрицей, упрочненных твердыми включениями $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y}$, широко используются в промышленности [1–8]. На основе подробного анализа особенностей металлокерамических плазменных покрытий можно констатировать, что данные композиции (оксид-металлическая составляющая) часто применяются в качестве износостойких плазменных покрытий [9–11]. Предлагаемое авторами направление исследований касается технологии

плазменного нанесения износостойких покрытий для восстановления и упрочнения деталей, работающих в неблагоприятных условиях или в отсутствие достаточного количества смазочного материала, при значительных нагрузках и широком спектре изменения температур (моторостроение, металлургия, авиация, космические технологии). Согласно результатам экспериментов, для таких эксплуатационных условий эффективны упрочненные методом газотермического напыления покрытия, содержащие твердые тугоплавкие металлокерамические соединения [12–14].

Методика исследований

Получаемые покрытия наносили плазменным напылением на воздухе (APS) [1–4]. В качестве материала основы для проведения исследований брали сталь Ст45, которую часто применяют при изготовлении деталей. Процессы напыления осуществляли в атмосфере воздуха на установке УПУ-3Д с использованием специально разработанного авторами плазмотрона и питателя для подачи металлокерамических порошков TWIN-10. Структуру покрытий исследовали с помощью методов оптической металлографии (оптические микроскопы Polyvar (Австрия) и Neophot-20 (Германия)), а также изучали эксплуатационные характеристики покрытий. Пористость и твердость измеряли на оптическом микроскопе Mef-3 фир-

мы Reichert (Австрия). Порошки $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$ (рис. 1) изготавливались методом агломерирования из мелкодисперсной порошковой шихты с последующим высокотемпературным спеканием.

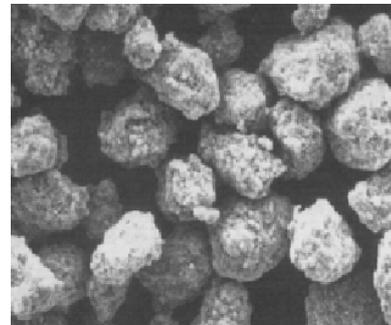


Рис. 1. Морфология частиц порошковой металлокерамической композиции 60 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta после гранулирования (×200)

Fig. 1. Particle morphology of 60 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta metal-ceramic powder after granulation (×200)

Вначале проводили оптимизацию параметров напыления на воздухе с учетом процесса растекания на основании теста (splat-test). Затем выполняли процедуру оптимизации технологических режимов напыления с целью получения максимального коэффициента использования порошковых материалов (КИМ) как критерия эффективности процесса. Технологические характеристики режимов напыления и их показателей приведены в табл. 1 и на рис. 2–5.

Таблица 1

Режимы напыления плазменных металлокерамических покрытий из порошковой композиции 60 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta
Spraying modes of plasma metal-ceramic coatings from powder composition of 60 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta

Параметр процесса	Режим напыления при расходе плазмообразующего газа N_2											
	45 л/мин				50 л/мин				55 л/мин			
Ток I , А	300	400	500	600	300	400	500	600	300	400	500	600
Расход транспортирующего газа Ag , л/мин	2,5				2,5				2,5			
Дистанция напыления L , мм	120				110				100			
Подача порошка $R_{пор}$, кг/ч	4,5				4,5				4,5			

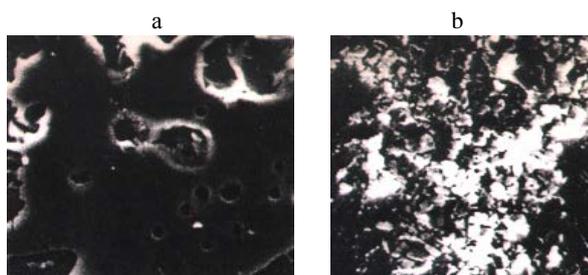


Рис. 2. Исследование процесса растекания композиций на основе металлокерамических порошков 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (a) и 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (b), нанесенных методом плазменного напыления на воздухе

Fig. 2. Investigation of spreading process of compositions based on metal-ceramic powders 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (a) and 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (b) sprayed by plasma spraying in air

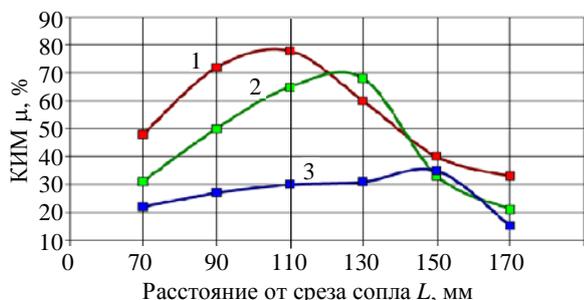


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошковых материалов от дистанции напыления для композиционных металлокерамических порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ с фракцией: 1 – 40–63 мкм; 2 – 63–100; 3 – 100–160 мкм ($I = 500 \text{ A}$; $R_{\text{N}_2} = 45 \text{ л/мин}$; $R_{\text{пор}} = 4,5 \text{ кг/ч}$)

Fig. 3. Dependence of utilization factor of powder materials versus spraying distance for composite metal-ceramic powders $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ with a fraction of: 1 – 40–63 μm ; 2 – 63–100; 3 – 100–160 μm ($I = 500 \text{ A}$; $R_{\text{N}_2} = 45 \text{ l/min}$; $R_{\text{pow}} = 4.5 \text{ kg/h}$)

Морфология участка поверхности сформированного покрытия из композиционного металлокерамического порошка 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta представлена на рис. 6. Анализ морфологии поверхности покрытия из $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$, проведенный с помощью растровой электронной микроскопии, показал наличие в нем довольно развитого рельефа сформированной поверхности с частичным ее оплавлением (рис. 6). Структура же самого плазменного покрытия представляет собой совокупность крупных (7–15 мкм) частиц оксидов и мелких (1–5 мкм) частиц М-кролей, спеченных между собой.

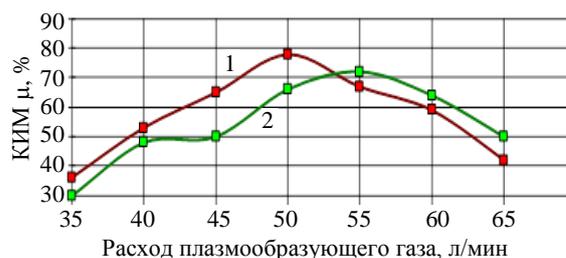


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования порошковых материалов от расхода плазмообразующего газа N_2 для композиционных металлокерамических порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ с фракцией: 1 – 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм ($L = 110 \text{ мм}$; $I = 500 \text{ A}$; $R_{\text{пор}} = 4,5 \text{ кг/ч}$)

Fig. 4. Dependence of utilization factor of powder materials on consumption of plasma-forming gas N_2 for composite ceramic-metal powders $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ with a fraction of: 1 – 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ($L = 110 \text{ mm}$; $I = 500 \text{ A}$; $R_{\text{pow}} = 4.5 \text{ kg/h}$)

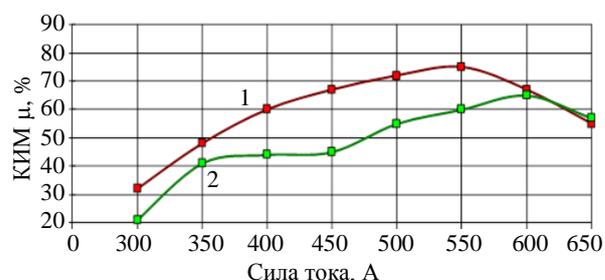


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования порошковых материалов от силы подводимого тока электрической дуги для композиционных металлокерамических порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ($L = 110 \text{ мм}$; $R_{\text{N}_2} = 50 \text{ л/мин}$, $R_{\text{пор}} = 4,5 \text{ кг/ч}$, фракция 40–63 мкм)

Fig. 5. Dependence of utilization factor of powder materials on strength of the supplied electric arc current for composite ceramic-metal powders $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ($L = 110 \text{ mm}$; $R_{\text{N}_2} = 50 \text{ l/min}$, $R_{\text{pow}} = 4.5 \text{ kg/h}$, fraction 40–63 μm)

Структуры напыленных плазмой покрытий из металлокерамических порошков 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (рис. 7a) и 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (рис. 7b), сформированные с использованием комплекта оборудования для плазменного напыления на воздухе, показаны на рис. 7.

В износостойких плазменных покрытиях из металлокерамических композиционных порошков, полученных методом агломерирования из мелкодисперсной порошковой шихты с последующим высокотемпературным спеканием, четко видны как межчастичные, так и межслойные границы.

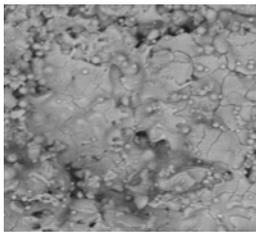


Рис. 6. Морфология участка поверхности сформированного покрытия из композиционного металлокерамического порошка 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta ($\times 1000$)

Fig. 6. Morphology of surface area of coating formed from composite metal-ceramic powder 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta ($\times 1000$)

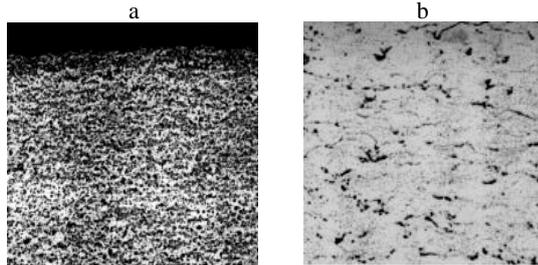


Рис. 7. Структуры напыленных плазмой на воздухе износостойких покрытий ($\times 400$) из композиций на основе металлокерамических порошков 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (a) и 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (b)

Fig. 7. Plasma-sprayed structures in air wear-resistant coatings ($\times 400$) from compositions based on metal-ceramic powders 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (a) and 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta (b)

Покрытия из порошков 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta характеризуются наличием общей пористости от 14 до 17 %, а из порошков 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta – пористостью от 9 до 12 %, а также равномерным распределением в них фазовых составляющих. Кроме того, наблюдается стабильное распределение твердой оксидной фазы в объемах, полученных напылением износостойких порошковых материалов. Практически отсутствуют поверхностные зоны с недостатком таких включений, что положительно влияет на работоспособность износостойких покрытий. При плазменном напылении порошковых композиций 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta формируемые покрытия имеют большую микротвердость по сравнению с порошковыми композициями 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta , что предопределено снижением общей пористости и соответственно увеличением однородности износостойких покрытий. Структура металлокерамических покрытий из порошковой композиции $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ламинарная со значительно выраженной гетерогенностью. Об этом свидетельствует постепенное изменение окраски фона оксидных ламелей по сечению от светлого до темного.

ВЫВОДЫ

1. Осуществлена оптимизация плазменно-го напыления на воздухе композиционного порошка 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta при изменении различных технологических параметров.

2. В процессе исследований изучено влияние на коэффициент использования порошкового материала:

– величины тока дуги при разных значениях расхода плазмообразующего газа;

– дистанции напыления;

– величины тока дуги при постоянном расходе плазмообразующего газа и разных значениях дистанции напыления.

3. Анализ морфологии оптимизированных по критерию эффективности плазменных износостойких покрытий из композиционных порошков на базе металлокерамики $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$, проведенный с помощью растровой электронной микроскопии, показал наличие в них развитого рельефа получаемой после напыления поверхности с частичным ее оплавлением. Структура же самого плазменного покрытия представляет собой совокупность крупных (7–15 мкм) частиц оксидов и мелких (1–5 мкм) частиц М-кролей, спеченных между собой.

4. В износостойких плазменных покрытиях из композиционных металлокерамических порошков, полученных методом агломерирования из мелкодисперсной порошковой шихты с последующим процессом их высокотемпературного спекания, четко видны как межчастичные, так и межслойные границы. Покрытия из композиционных порошков 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta характеризуются наличием общей пористости от 14 до 17 %, а из порошков 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta – пористостью от 9 до 12 %, а также равномерным распределением в них фазовых составляющих. Кроме того, наблюдается стабильное распределение твердой оксидной фазы в объемах, полученных напылением износостойких порошковых материалов. Практически отсутствуют поверхностные зоны с недостатком таких включений, что положительно влияет на работоспособность исследованных износостойких покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Results of Investigation APS Process of Formation Plasma Spraying / V. A. Okovity [et al.] // Powder Technology 95, V-the Baltic Conference, Nov. 7–8, 2005. Tallinn, 2005. P. 58–60.
2. Properties of Plasma Spraying Coatings / V. A. Okovity [et al.] // Nove Smery vo Vyrobných Technológiach 2000: Proc. of 6 Conference. Presov (Slovenska Republic), 2001. P. 221–225.

3. Получение композиционного керамического материала для газотермического напыления / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 181–188. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188>.
4. Пантелеенко, Ф. И. Исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий диоксид циркония – нихром / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, Е. Ф. Пантелеенко // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4, № 3. С. 100–105.
5. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO₂ слой) / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28>.
6. Способ получения композиционного керамического материала: пат. № 13690 РБ; МПК C04B 35/10 / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый. Оpubл. 30.10.2010.
7. Parameter Studies on High-Velocity Oxy-Fuel Spraying of CoNiCrAlY Coatings Used in the Aeronautical Industry / J. A. Cabral-Miramontes [et al.] // Int. J. Corros. 2014. P. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/703806>.
8. Identification of the High-Temperature Impact/Friction of Aeroengine Blades and Cases by Micro Raman Spectroscopy / P. Colomban [et al.] // Aerosp. Sci. Technol. 1999. Vol. 3, No 7. P. 447–459. [https://doi.org/10.1016/s1270-9638\(99\)00102-9](https://doi.org/10.1016/s1270-9638(99)00102-9).
9. Development of Oxide Dispersion Strengthened MCrAlY Coatings / K. Bobzin [et al.] // J. Therm. Spray Technol. 2008. Vol. 17, No 5–6. P. 853–857. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9244-7>.
10. Crawmer, D. E. Coating Structures, Properties, and Materials / D. E. Crawmer, ed. J. R. Davis // Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International. USA: Materials Park, OH, 2004. P. 47–53.
11. Effects of Boron Carbide Content on the Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C Composite Coatings / Y. Cao [et al.] // J. Therm. Spray Technol. 2014. Vol. 23, No 4. P. 716–724. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0061-x>.
12. Influence of the Microstructure of Plasma Deposited MCrAlY their Tribological Behaviour / S. Li [et al.] // Surf. Coat. Technol. 1998. Vol. 100–101. P. 7–11. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00579-3](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00579-3).
13. Zhao, L. Wear Behaviour of AbO₃ Dispersion Strengthened MCrAlY Coating / L. Zhao, M. Parco, E. Lugscheider // Surf. Coat. Technol. 2004. Vol. 184, No 2–3. P. 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.055>.
14. Zhao, L. High Temperature Frictional Wear Behaviors of Nano-Particle Reinforced NiCoCrAlY Cladded Coatings / L. Zhao, M. Parco, E. Lugscheider // Trans. Nonferr. Met. Soc. China. 2011. Vol. 21, No 6. P. 1322–1328. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60860-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60860-1).
5. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2017) Production of Composite Ceramic Material for Thermal Spraying. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 181–188. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188> (in Russian).
4. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko E. F. (2017) Study of Plasma Two-Layer Composite Zirconium Dioxide – Nichrome Coatings. *Aktualnye Problemy v Mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 4 (3), 100–105 (in Russian).
5. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chemik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2018) Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO₂ Layer). *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (1), 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28> (in Russian).
6. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoyno O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. (2009) *Method for Obtaining Composite Ceramic Material*. Patent No 13690 Republic of Belarus (in Russian).
7. Cabral-Miramontes J. A., Gaona-Tiburcio C., Almeraya-Calderón F., Estupiñan-Lopez F. H., Pedraza-Basulto G. K., Poblano-Salas C. A. (2014) Parameter Studies on High-Velocity Oxy-Fuel Spraying of CoNiCrAlY Coatings Used in the Aeronautical Industry. *International Journal of Corrosion*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/703806>.
8. Colomban P., Jullian S., Parlier M., Monge-Cadet P. (1999) Identification of the High-Temperature Impact/Friction of Aeroengine Blades and Cases by Micro Raman Spectroscopy. *Aerospace Science and Technology*, 3 (7), 447–459. [https://doi.org/10.1016/s1270-9638\(99\)00102-9](https://doi.org/10.1016/s1270-9638(99)00102-9).
9. Bobzin K., Schäfer T., Richardt K., Brühl M. (2008) Development of Oxide Dispersion Strengthened MCrAlY Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17 (5–6), 853–857. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9244-7>.
10. Crawmer D. E., Davis J. R. (2004) Coating Structures, Properties, and Materials. *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International. USA: Materials Park, OH, 47–53.
11. Cao Y., Huang C., Liu W., Zhang W., Du L. (2014) Effects of Boron Carbide Content on the Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C Composite Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23 (4), 716–724. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0061-x>.
12. Li S., Langlade C., Fayeulle S., Tréheux D. (1998) Influence of the Microstructure of Plasma Deposited MCrAlY their Tribological Behaviour. *Surface and Coatings Technology*, 100–101, 7–11. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00579-3](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00579-3).
13. Zhao L., Parco M., Lugscheider E. (2004) Wear Behaviour of AbO₃ Dispersion Strengthened MCrAlY Coating. *Surface and Coatings Technology*, 184 (2–3), 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.055>.
14. Zhao L., Parco M., Lugscheider E. (2011) High Temperature Frictional Wear Behaviors of Nano-Particle Reinforced NiCoCrAlY Cladded Coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21 (6), 1322–1328. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60860-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60860-1).

Поступила 14.10.2019

Подписана в печать 28.01.2020

Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

Received: 14.10.2019

Accepted: 28.01.2020

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-375-382>

УДК 62-752.2

Технология получения и демпфирующие свойства аэрированных полимерных покрытий

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾,
Ма Минь¹⁾, докт. техн. наук, проф. М. А. Белоцерковский²⁾

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

²⁾Государственное научное объединение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Разработан и исследован процесс получения аэрированных (наполненных пузырьками воздуха) полимерных покрытий методом газопламенного напыления с оценкой их способности к демпфированию колебаний. Используя возможности конструкции полимерного термораспылителя модели ОИМ 050, заключающиеся в обеспечении подачи спутного воздушного потока между факелом пламени и струей порошкового материала, разработана технология управляемого формирования аэрированных полимерных покрытий. Эксперименты выполнялись с такими термопластичными полимерами, как полиэтилентерефталат, полиэтилен высокого давления, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиамид. Установлено, что коэффициент аэрирования растет практически прямо пропорционально с увеличением количества воздуха в спутном потоке у всех исследуемых полимерных покрытий. Отмечено, что на процесс аэрирования оказывают влияние реологические свойства жидких полимеров, а точнее, величина показателя текучести расплава полимера. Определены предельные значения воздуха в спутном потоке, которые позволяют не снижать значения адгезии полимерных покрытий со стальными подложками менее 6 МПа и не уменьшать их твердость более чем на 25–30 %. Исследования демпфирующих свойств образцов с полимерными покрытиями осуществляли на стенде, кинематическая схема которого основана на нагружении свободного конца консольно закрепленного образца, резком снятии нагрузки и регистрации свободных затухающих колебаний бесконтактным датчиком индукционного типа, связанным с компьютером. Показано, что использование аэрирования при формировании шумопоглощающих покрытий на стальных образцах позволяет увеличить их логарифмический декремент затухания на 18–26 %.

Ключевые слова: газопламенное напыление, порошки полимеров, аэрированные покрытия, шумопоглощение, логарифмический декремент, затухание колебаний

Для цитирования: Шелег, В. К. Технология получения и демпфирующие свойства аэрированных полимерных покрытий / В. К. Шелег, Ма Минь, М. А. Белоцерковский // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 375–382. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-375-382>

Production Technology and Damping Properties of Aerated Polymer Coatings

V. K. Sheleg¹⁾, Ma Min¹⁾, M. A. Belotserkovsky²⁾

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

²⁾State Scientific Institution “The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The process of obtaining aerated (filled with air bubbles) polymer coatings has been developed and investigated by the method of flame spraying with an assessment of their ability to damp vibrations. A technology for the controlled formation of aerated polymer coatings has been developed while using the capabilities of the ОИМ (OIM) 050 polymer thermal

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleg Valery K.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

atomizer design which consists in providing a concurrent air flow between the flame torch and the jet of powder material. The experiments have been carried out with such thermoplastic polymers as polyethylene terephthalate, high pressure polyethylene, ultra high molecular weight polyethylene, polyamide. It has been found that the aeration coefficient grows almost in direct proportion with an increase in the amount of air in the concurrent flow for all investigated polymer coatings. It is noted that the aeration process is influenced by the rheological properties of liquid polymers, or rather, the value of the polymer melt flow rate. The limiting values of air in the concurrent flow have been determined, which make it possible not to reduce the adhesion of polymer coatings to steel substrates by less than 6 MPa and not to decrease their hardness by more than 25–30 %. Studies of the damping properties of samples with polymer coatings have been carried out on a stand, the kinematic diagram of which is based on loading the free end of a cantilever sample, abrupt removal of the load and registration of free damped oscillations by an induction-type contactless sensor connected to a computer. It is shown that the use of aeration when forming noise-absorbing coatings on steel samples can increase their logarithmic damping decrement by 18–26 %.

Keywords: flame spraying, polymer powders, aerated coatings, noise absorption, logarithmic decrement, vibration damping

For citation: Sheleg V. K., Ma Min, Belotserkovsky M. A. (2021) Production Technology and Damping Properties of Aerated Polymer Coatings. *Science and Technique*. 20 (5), 375–382. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-375-382> (in Russian)

Введение

Развитие техники, связанное с увеличением скоростей и мощностей машин и механизмов, привело к значительному возрастанию вредных шумов и вибраций, понижающих надежность работы механизмов, ухудшающих условия труда. Один из основных способов эффективного снижения вредных шумов и вибраций – применение в конструкциях, подверженных воздействию динамических нагрузок, покрытий из материалов с высокими вибропоглощающими свойствами. Многолетний опыт борьбы с шумами и вибрациями показал, что полимеры являются наиболее эффективными вибропоглощающими материалами [1].

Свойство полимеров проявлять ярко выраженное вязкоупругое поведение способствует эффективному рассеиванию энергии вибрации, что положительно выделяет их из числа прочих материалов [1, 2]. Именно благодаря этому уникальному симбиозу свойств упругого тела и вязкой жидкости в полимерах возникает сдвиг приложенного напряжения по фазе относительно деформации на фазовый угол δ , основной характеристикой которого является коэффициент потерь или тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$.

Независимо от строения природа поглощения энергии колебаний для всех полимеров одинакова. В [1, 3, 4] молекулярный механизм поглощения и распространения колебаний в полимерах объяснен, исходя из существующей теории релаксации, базирующейся на том, что релаксацию материала вызывают изменения молекулярной структуры. В релаксирующей среде при постоянной деформации вызвавшее

ее напряжение постепенно спадает, в результате чего происходит его рассеивание в виде теплоты. В основе этого явления лежит процесс перехода системы к состоянию термодинамического равновесия после снятия внешней нагрузки, а время, необходимое для установления равновесия, называется временем релаксации.

Способность к релаксации, а соответственно и к вибропоглощению у полимеров сильно различается. Все полимеры условно разделили по величине коэффициента потерь $\operatorname{tg}\delta$ на три группы [4, 5]. Первая – полимеры с наиболее высоким значением коэффициента потерь ($\operatorname{tg}\delta \geq 1,4$), к которым относят сложные и простые эфиры поливинилового спирта. Вторая – полимеры со значением тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ в диапазоне от 0,8 до 1,4. К данной группе относятся различные синтетические каучуки и резины, поливинилхлорид и его пластифицированные композиции. Третья группа – полимеры с высокой степенью кристалличности, например полиэтилен, политетрафторэтилен; значение тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ – в пределах от 0,1 до 0,2, редко до 0,5.

Диссипация энергии колебаний может происходить в объеме всего изделия, выполненного из полимера, либо полимерные материалы используют как вибропоглощающие покрытия на металлических машиностроительных деталях или узлах. Применение полимерных покрытий, полученных различными методами, позволяет существенно улучшить эффективность поглощения колебаний, при этом нанесение полимерных материалов в виде покрытий на стали, чугуны, цветные металлы рацио-

нально совмещает механическую прочность основы и демпфирующую способность покрытия [6–8].

Совершенствование составов полимеров, а также развитие методов формирования полимерных демпфирующих покрытий привели к созданию высокопористых композитов и покрытий [9, 10], которые были названы аэрированными (англ. aerated coating), т. е. наполненными воздухом [11]. Отмечается, что аэрированные полимерные покрытия обладают наибольшей способностью шумопоглощения среди всех полимеров, относящихся к третьей группе.

Целью исследований, результаты которых приведены в данной статье, явились разработка приемов получения аэрированных полимерных покрытий методом газопламенного напыления и определение их способности к демпфированию колебаний.

Оборудование для нанесения покрытий

Формирование покрытий осуществлялось с помощью установки газопламенного напыления полимерных порошков модели ОИМ 050 [12], разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси (усовершенствованная модель установки ТЕРКО-П). Установка используется для формирования покрытий из порошков термопластичных полимеров с температурой плавления от 90 до 400 °С. Размер напыляемых частиц 50–300 мкм. Частицы нагреваются в пропано-воздушном факеле пламени, ускоряются и осаждаются на подготовленной поверхности, образуя покрытие (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид термораспылителя установки ОИМ 050 и процесс нанесения покрытия

Fig. 1. External view of OIM 050 thermal atomizer and coating process

Конструкция термораспылителя обеспечивает возможность использования практически всех применяемых порошков термопластов, имеющих различные теплофизические характеристики, без замены соплового наконечника. Регулируемое изменение в достаточно широком диапазоне состава горючей смеси и управление формой факела пламени позволяют добиться необходимой для каждого напыляемого материала величины плотности теплового потока. Кроме того, по сравнению с известными установками типа УПТР, УГПД, ТЕРКО и другими в данном термораспылителе гораздо качественнее происходит процесс смешения пропан-воздушной смеси, обеспечиваются равномерность подачи порошковой шихты в факел и высокий коэффициент использования напыляемого материала.

Газосмесительная камера имеет форму кольцевой канавки (рис. 2), позволяющей в движущихся перемешивающихся газах образовывать циркуляционные токи, обуславливающие возможность появления эффекта турбулентности, что положительно сказывается на качестве горючей смеси. Конструкция соплового наконечника предусматривает обеспечение попадания частиц в самый высокотемпературный участок факела, что также позволило улучшить качество покрытий. Охлаждение мундштука осуществляется за счет потока воздуха, проходящего через зазор между мундштуком и сопловым наконечником. Кроме того, этот поток не позволяет полимерным частицам оседать на торце мундштука.

Основные элементы распылительного узла установки ОИМ 050 представлены на рис. 2. Сопловой наконечник 3, содержащий хвостовик 4, крепится гайкой 2 на корпусе 1. Воздух по каналу 5 и пропан по каналу 6 подаются в газосмесительную камеру 10, образованную винтовой канавкой с внутренней поверхностью корпуса. Обратному выходу смеси из камеры препятствует прокладка 11. Выпуск пропан-воздушной смеси для поджига и образования факела пламени осуществляется через сопла 14. Выполненные на наружной поверхности кольцевые ребра 13 служат для дополнительного охлаждения корпуса. В сопловой наконечник, имеющий канал 9 для подачи полимерного порошка, вставлен мундштук 7 с определенным зазором 8, который играет важнейшую роль в данной конструкции, а именно – позволяет изменять форму пламени и управлять его теплофизическими характеристиками.

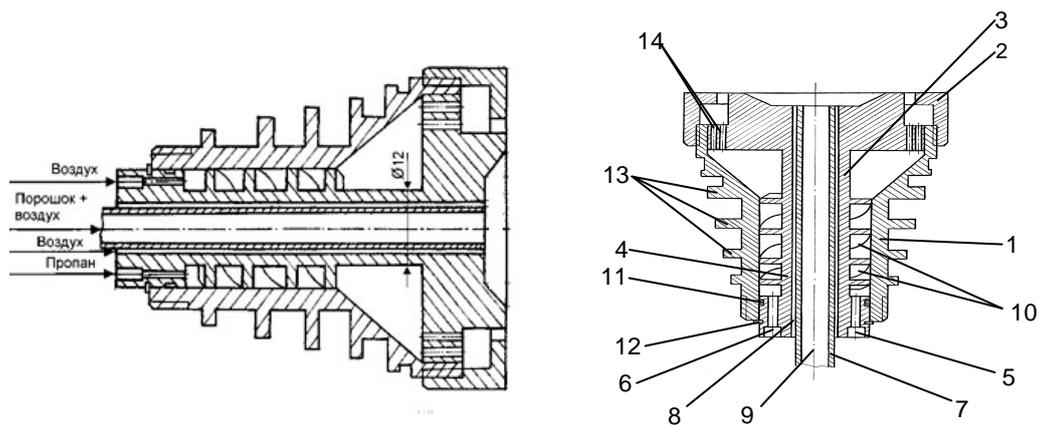


Рис. 2. Схема распылительного узла установки ОИМ 050

Fig. 2. Scheme of OIM 050 spraying unit

Изменяя соотношения скоростей выхода горючей смеси, воздушного потока с полимерным порошком и воздуха в зазоре 8, можно

«сжимать» или «разжимать» факел, управляя процессами теплообмена между напыляемым порошком и факелом пламени (рис. 3, табл. 1).

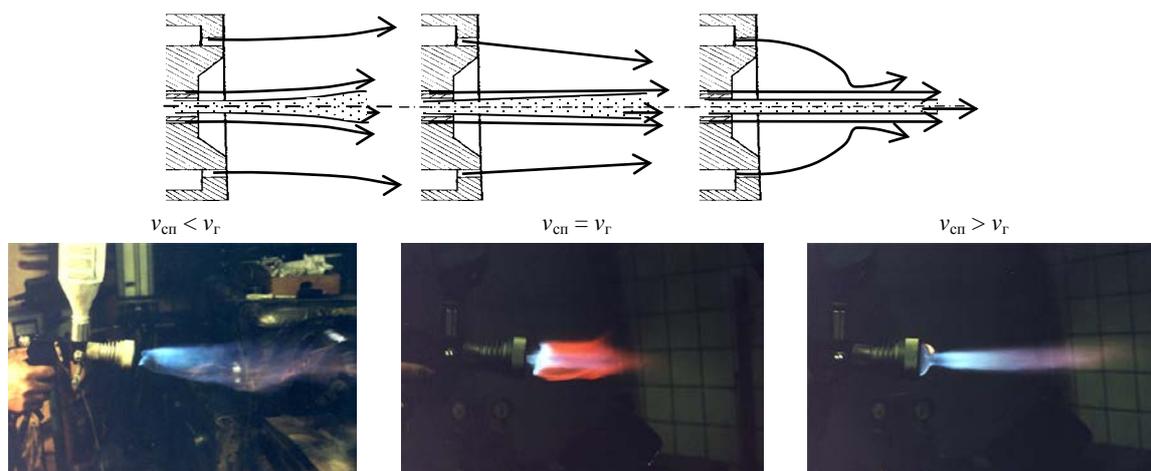


Рис. 3. Формы факела в зависимости от варианта газодинамической активации:

v_{cp} , v_r – скорость воздушного потока в зазоре и истекающей горючей смеси

Fig. 3. Torch shapes depending on variant of gas-dynamic activation:

v_{cp} , v_r – air flow rate in the gap and outflowing combustible mixture

Таблица 1

Режимы напыления полимеров с различной температурой плавления

Modes of spraying polymers with different melting points

Температура плавления полимера, К	Плотность теплового потока, Вт/м ²		Размер частицы, мкм			Форма факела **
			До 100	100–200	200–400	
360–410	$2 \cdot 10^6$	β	24/1	23,5/1	23/1	«Веник»
		*	90/6/4	88/8/4	86/10/4	
420–510	$3,4 \cdot 10^6$	β	22,5/1	22/1	21,5/1	«Конус»
		*	82/13/5	80/15/5	78/17/5	
Более 510	Более $5 \cdot 10^6$	β	21/1	20,5/1	20/1	«Бутон»
		*	75/19/6	73/21/6	71/23/6	

* Распределение воздуха, % (± 1 %): в горючую смесь/на транспортировку порошка/в кольцевой зазор.

** Формы факелов представлены на рис. 3.

Примечание. β – соотношение окислителя (воздуха) и горючего газа (пропана) в смеси.

Материалы, оборудование и методики исследований

Для напыления покрытий были использованы порошки полиэтилена ПЭВД (ГОСТ 16338–85) марки 10703-20, полиэтилентерефталата ПЭТФ (ГОСТ Р 51695–2000), полиамида марки ПА-6 (ОСТ 6-06-09–93), полученные криогенным измельчением гранул полимеров, и порошок сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) марки Hostalen GUR 412. Размер напыляемых частиц 100–200 мкм.

Образцы для исследования демпфирующих свойств покрытий представляли собой пластины размерами 135×20×3 мм (рис. 4а), выполненные из стали 20. Подготовку поверхности образцов перед нанесением покрытий осуществляли струйно-абразивной обработкой дробью чугунной колотой ДЧК 1 545 (ГОСТ 11964–81) при давлении сжатого воздуха 0,55–0,60 МПа и расходе 40–50 м³/ч.

Коэффициент аэрирования a_r , характеризующий количество пузырьков воздуха в покрытии, определяли оптическим методом на микроскопе «Альтами МЕТ 1 МТ», а также путем гидростатического взвешивания в этиловом спирте отделенных от подложки элементов покрытий, используя широко применяемый в практике порошковой металлургии метод исследования пористости спеченных материалов. Коэффициент аэрирования a_r показывает, какую часть объема покрытия занимают пузырьки воздуха.

Прочность сцепления покрытий оценивали методом отрыва штифта нормально приложен-

ной нагрузкой на адгезиметре модели ELCOMETER 506. Исследования демпфирующих свойств образцов с полимерными покрытиями осуществляли на стенде, разработанном и изготовленном в ОИМ НАН Беларуси (рис. 4б).

Кинематическая схема стенда основана на нагружении свободного конца консольно закрепленного образца, резком снятии нагрузки и регистрации свободных затухающих колебаний бесконтактным датчиком индукционного типа, связанным с компьютером. Стенд состоит из измерительной и регистрирующей частей. Измерительная часть включает узел крепления образца и узел нагружения, которые жестко закреплены на общей станине. Для калибровки деформации образцов при нагружении используется индикатор часового типа, расположенный на магнитном штативе. Регистрирующая часть стенда состоит из индуктивного датчика IF 6028 (фирма IFM Electronic, Германия), аналого-цифрового преобразователя E-154 (фирма LCard, Россия) и платы усилителя сигнала. Для отображения полученных виброграмм и дальнейшей их обработки используется персональный компьютер.

Основным измеряемым параметром является амплитуда затухающих колебаний образца, которая отображается на мониторе компьютера и представляет собой отображение мгновенных значений напряжения, фиксируемых индуктивным датчиком при изменяющемся расстоянии до поверхности образца в процессе колебаний. Регистрируемые значения напряжения поступают на аналого-цифровой преобразователь, в котором аналоговый сигнал преобразуется в цифровой для отображения на мониторе компьютера.

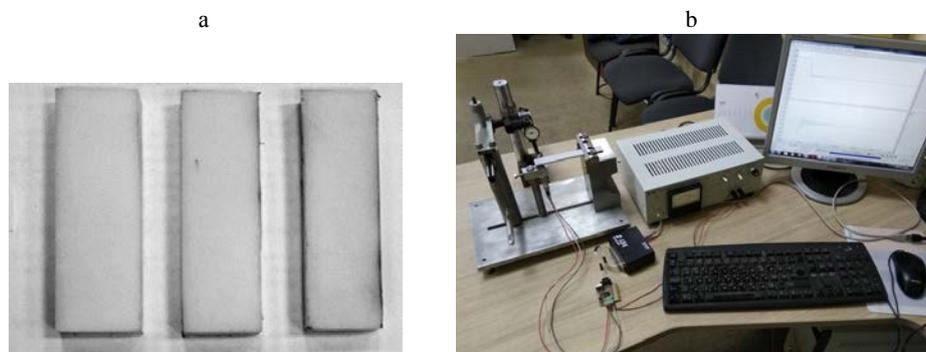


Рис. 4. Внешний вид образцов с полимерными покрытиями (а) и экспериментального стенда (б) для испытаний демпфирующих свойств

Fig. 4. Appearance of samples with polymer coatings (a) and experimental stand (b) for testing damping properties

Образец устанавливается покрытием вверх и жестко крепится на держателе с помощью прижимной планки двумя винтами. Длина свободного конца образца 90 мм. Индуктивный датчик выставляется по нижней поверхности образца на расстоянии приблизительно 1 мм с помощью крепежных гаек, позволяющих вертикально перемещать датчик. Для регистрации затухающих колебаний образца отклоняли свободный конец от положения равновесия на величину 1 мм, фиксируя напряжение сигнала от индуктивного датчика в соответствии с калибровочным графиком. Затем резко снимали нагрузку и останавливали запись виброграммы.

В процессе испытаний формируется массив данных, который записывается в память компьютера. Из этого массива выделяется и копируется участок, на котором записаны затухающие колебания образца. Дальнейшая обработка происходит в программе, разработанной в Excel. Для этого задают начальное, конечное значения амплитуд, а также количество выбранных циклов – обычно до 10.

Основным показателем демпфирующих свойств является логарифмический декремент затухания, который определяется по формуле

$$\delta = 1/(n - 1) \ln A_0/A_k,$$

где n – количество выбранных циклов; A_0, A_k – начальное и конечное значения амплитуд сигнала.

Программа Excel автоматически вычисляет логарифмический декремент затухания δ , и его значение отображается в заданной ячейке.

Исследование процесса получения аэрированных полимерных покрытий

Предварительными экспериментами, выполненными при разработке конструкции термораспылителя [13, 14], установлено, что при увеличении количества воздуха, подаваемого в спутный поток, проходящий через кольцевой зазор 8 (рис. 2), в покрытии образуются воздушные пузырьки, количество которых пропорционально объему воздуха, проходящему через зазор. Регулируя объем воздуха, проходящего в спутном потоке, можно получать покрытия с достаточно большой степенью аэрирования (рис. 5).



Рис. 5. Поверхность аэрированного покрытия из ПЭВД (а) и вид пузырьков воздуха внутри покрытия при освещении «на просвет» (б) (×10)

Fig. 5. LDPE aerated coating surface (a) and type of air bubbles inside coating under illumination “in the light” (b) (×10)

Коэффициент аэрирования оценивался так же, как и пористость, т. е. как отношение объема пузырьков к объему покрытия. Исследовали зависимость коэффициента аэрирования a_r от количества воздуха, проходящего в спутном потоке. Чтобы исключить влияние конструктивного, температурного и других факторов, решили использовать не абсолютную величину объема воздуха в спутном потоке, а относительную – отношение проходящего объема воздуха в единицу времени в спутном потоке к объему воздуха, затрачиваемому в единицу времени на формирование факела пламени (K_Q).

Установлено (рис. 6), что коэффициент аэрирования растет практически прямо пропорционально с увеличением показателя K_Q до 9–10 % у всех исследуемых полимерных покрытий.

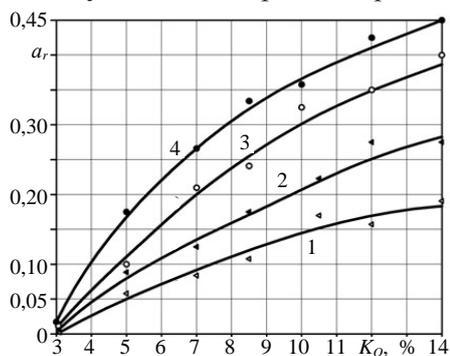


Рис. 6. Влияние количества воздуха в спутном потоке на коэффициент аэрирования наносимых покрытий из порошков:

- 1 – сверхвысокомолекулярного полиэтилена;
- 2 – полиэтилена высокого давления;
- 3 – полиамида ПА-6; 4 – полиэтилентерефталата

Fig. 6. Influence of air amount in the concurrent flow on aeration coefficient of applied coatings from powders: 1 – ultra-high molecular polyethylene; 2 – high-pressure polyethylene; 3 – polyamide ПА-6 [PA-6]; 4 – polyethyleneterephthalate

Отличие угла наклона у графиков, вероятно, связано с реологическими свойствами жидких

полимеров, а точнее, с величиной показателя текучести расплава (ПТР), характеризующего вязкость полимера в расплавленном состоянии. Данный показатель, согласно ГОСТ 11645–73, определяет, сколько термопластичного полимера в граммах под определенным давлением и при заданной температуре за 10 мин экструдирован через калиброванный капилляр. Чем выше данный показатель, тем полимер более текучий и менее вязкий.

У выбранных полимерных материалов самый низкий ПТР имеет СВМПЭ (0,04 г/10мин), а самый высокий – ПЭТФ (9,8 г/10мин), что полностью соответствует полученным результатам.

Образование пузырьков воздуха и их количество не могут не сказаться на физико-механических характеристиках полимерных покрытий. Для определения предельных значений воздуха в спутном потоке, которые вызывают значительное уменьшение механических характеристик покрытий, выполнили исследования адгезии и твердости аэрированных покрытий. Исходя из результатов (рис. 7), полученных для полимеров с наиболее высокими показателями ПТР (ПА-6 и ПЭТФ), а также из условия сохранения адгезии покрытий не менее 6 МПа, установлено, что значения K_Q не должны превышать 6–7 %. При этом твердость покрытий уменьшается на 25–30 %.

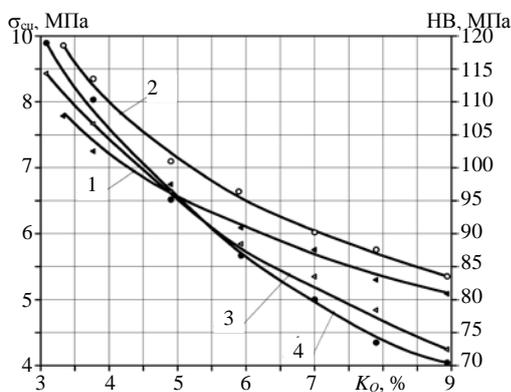


Рис. 7. Влияние количества воздуха в спутном потоке на прочность сцепления (1, 2) и твердость (3, 4) покрытий из полиамида ПА-6 (1, 4) и полиэтилентерефталата (2, 3)

Fig. 7. Influence of air amount in concurrent flow on adhesion strength (1, 2) and hardness (3, 4) of coatings from polyamide PA-6 [PA-6] (1, 4) and polyethyleneterephthalate (2, 3)

Оценка демпфирующих свойств покрытий

Как показали исследования декремента затухания колебаний стальных образцов, полимерные

покрытия могут обеспечивать значительное повышение демпфирующих свойств (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость декремента затухания колебаний от толщины полимерных покрытий

Dependence of oscillation damping decrement on polymer coating thickness

Материал покрытия	Толщина покрытия, мм	Декремент затухания	Эффективность демпфирования, %
Без покрытия		0,0063	
ПЭВД	0,5	0,0074	17,5
	1,0	0,0082	30,2
	1,4	0,0099	57,1
ПЭТФ	0,5	0,0077	22,2
	1,0	0,0086	36,5
	1,4	0,0103	63,5

Исследование изменения декремента затухания колебаний у образцов с аэрированными покрытиями толщиной 1 мм показало (рис. 8), что при увеличении коэффициента аэрирования от 0 до 0,18–0,20 логарифмический декремент затухания колебаний пропорционально повышается на 18–26 %. Таким образом, предложенный метод насыщения полимерных покрытий воздушными пузырьками позволяет значительно повысить их демпфирующую способность.

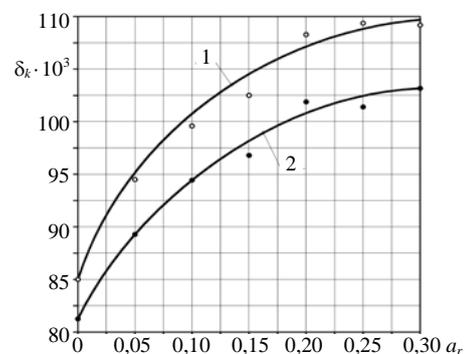


Рис. 8. Влияние степени аэрирования покрытий из полиэтилентерефталата (1) и полиэтилена высокого давления (2) на логарифмический декремент затухания колебаний

Fig. 8. Influence of aeration degree of coatings from polyethyleneterephthalate (1) and high-pressure polyethylene (2) on logarithmic decrement of oscillation damping

ВЫВОДЫ

1. С помощью особенностей конструкции полимерного термораспылителя модели ОИМ 050 показана возможность управляемого насыщения воздушными пузырьками (аэрирования) напыляемых полимерных покрытий.

2. Определено, что насыщение пузырьками воздуха в количестве 15–20 % от общего объема полимерных покрытий позволяет сохранить величину их адгезии со стальными подложками до 6 МПа и уменьшить твердость не более чем на 30 %.

3. Установлено, что степень аэрирования покрытий при прочих равных условиях прямо пропорционально зависит от показателя текучести расплава используемого полимера.

4. Использование аэрирования при формировании шумопоглощающих покрытий на стальных образцах позволяет увеличить их логарифмический декремент затухания на 18–26 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нашиф, А. Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. Хендерсон. М.: Мир, 1988. 488 с.
2. Chung, D. D. L. Review. Materials for Vibration Damping / D. D. L. Chung // *Journal of Materials Science*. 2001. Vol. 36. P. 5733–5737. <https://doi.org/10.1023/A:1012999616049>.
3. Соломатов, В. И. Вибропоглощающие композиционные материалы / В. И. Соломатов, В. Д. Черкасов, Н. Е. Фомин. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 96 с.
4. Берлин, А. А. Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) / А. А. Берлин // *Соросовский образовательный журнал*. 1995. № 1. С. 57–65.
5. Бартевев, Г. М. Релаксационные свойства полимеров / Г. М. Бартевев, А. Г. Бартевева. М.: Химия, 1992. 384 с.
6. Евстафьев, В. А. Демпфирование колебаний стержневых систем вибропоглощающими покрытиями / В. А. Евстафьев. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2011. 28 с.
7. Чернышев, В. М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов / В. М. Чернышев. М.: Наука, 2004. 288 с.
8. Ганбаров, А. Б. Обоснование и разработка вибродемпфирующего покрытия с упруго-волокнистой структурой / А. Б. Ганбаров. Воронеж: ВГЛА, 2004. 130 с.
9. Платонов, М. М. Акустические полимерные материалы нового поколения / М. М. Платонов, Е. М. Шульдешев, Т. А. Нестерова // *Труды ВИАМ*. 2016. № 4. С. 76–84.
10. Эксплуатационные свойства пористых изделий из эластомеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://niirp.com/articles/proizvodstvo_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/ekspluatacionnye_svoystva_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/. Дата доступа 24.02.2021.
11. Whelan, T. *Polymer Technology Dictionary* / T. Whelan. First ed. Chapman and Hall. London, 1994. 561 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1292-5>.
12. Белоцерковский, М. А. Анализ конструкций распылителей для напыления композиционных полимерных порошковых покрытий / М. А. Белоцерковский, И. В. Макаревич // *Технология – оборудование – инструмент – качество: тезисы докл. 32-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, БНТУ, 7–8 апр. 2016 г.* / редкол. В. К. Шелег [и др.]. Минск: Бизнессофт, 2016. С. 25–26.
13. Свойства газопламенных полимерных покрытий, полученных с использованием различных горючих смесей / М. А. Белоцерковский [и др.] // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2015. № 1. С. 25–29.
14. Упругодиссипативные характеристики газопламенных покрытий / В. М. Рудько [и др.] // *Вестник Полоцкого*

государственного университета. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. 2006. № 12. С. 71–76.

Поступила 20.04.2021

Подписана в печать 24.06.2021

Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. Nashif A., Jones D., Henderson J. (1988) *Vibration Damping*. Moscow, Mir Publ. 488 (in Russian).
2. Chung D. D. L. (2001) Review. Materials for Vibration Damping. *Journal of Materials Science*, 36, 5733–5737. <https://doi.org/10.1023/A:1012999616049>.
3. Solomatov V. I., Cherkasov V. D., Fomin N. E. (2001) *Vibration-Absorbing Composite Materials*. Saransk, Publishing House of Mordovia State University. 96 (in Russian).
4. Berlin A. A. (1995) Modern Polymer Composite Materials (PCM). *Sorosovskii Obrazovatelnyi Zhurnal* [Soros Educational Journal], (1), 57–65 (in Russian).
5. Bartenev G. M., Barteneva A. G. (1992) *Relaxation Properties of Polymers*. Moscow, Khimiya Publ. 384 (in Russian).
6. Evstafiev V. A. (2011) *Damping of Vibrations of Neural Rod Systems with Vibration-Absorbing Coatings*. Saint-Petersburg, Publishing House of Baltic State Technical University. 28 (in Russian).
7. Chernyshov V. M. (2004) *Damping of Vibrations of Mechanical Systems with Coatings Made of Polymer Materials*. Moscow, Nauka Publ. 288 (in Russian).
8. Ganbarov A. B. (2004) *Justification and Development of Vibration-Damping Coating with Elastic-Fibrous Structure*. Voronezh, Publishing House of Voronezh State Forestry Academy. 130 (in Russian).
9. Platonov M. M., Shuldeshev E. M., Nesterova T. A. (2016) New Generation Acoustic Polymer Materials. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, (4), 76–84 (in Russian).
10. Performance Properties of Porous Elastomer Products. Available at: https://niirp.com/articles/proizvodstvo_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/ekspluatacionnye_svoystva_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/. (Accessed 24 February 2021) (in Russian).
11. Whelan T. (1994) *Polymer Technology Dictionary*. First ed. Chapman and Hall. London. 561. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1292-5>.
12. Belotserkovsky M. A., Makarevich I. V. (2016) Analysis of Spray Gun Designs for Spraying Composite Polymer Powder Coatings. *Tekhnologiya – Oborudovanie – Instrument – Kachestvo: Tezisy Dokl. 32-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, BNTU, 7–8 Apr. 2016 g.* [Technology – Equipment – Tools – Quality: Abstracts of 32nd International Scientific and Technical Conference, Minsk, Belarusian National Technical University, April 7–8, 2016]. Minsk, BusinessSoft Publ., 25–26 (in Russian).
13. Belotserkovsky M. A., Chekulayev A. V., Sheleg V. K., Makarevich I. V. (2015) Properties of the Flame Spraying Polymer Coatings Applied Using Various Combustible Mixtures. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, (1), 25–29 (in Russian).
14. Rudko V. M., Sheleg V. K., Belotserkovsky M. A., Levantsevich M. A. (2006) Elastic Dissipative Characteristics of Flame Coatings. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya V. Prikladnye Nauki. Promyshlennost' = Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, (12), 71–76 (in Russian).

Received: 20.04.2021

Accepted: 24.06.2021

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-383-389>

УДК 631.3

Разработка и обоснование двухдискового рабочего органа сельскохозяйственной машины для обработки почвы

Канд. техн. наук, доц. А. С. Иванов¹⁾, М. С. Пузырев¹⁾,
канд. техн. наук, доц. Е. М. Чикишев²⁾

¹⁾Государственный аграрный университет Северного Зауралья (Тюмень, Российская Федерация),

²⁾Тюменский индустриальный университет (Тюмень, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Одна из главных проблем при проектировании сельскохозяйственных машин, в том числе почвообрабатывающих, – обеспечение оптимальной энергоёмкости выполнения различных технологических операций. Конструктивные, кинематические и технологические параметры ротационных почвообрабатывающих машин оказывают существенное влияние на показатели энергоёмкости процесса и качество обработки почвы. К этим параметрам относятся диаметр рабочего органа сельскохозяйственной машины, угловая скорость и частота вращения дисков, количество режущих элементов, поступательная скорость рабочего органа, высота образуемого при обработке почвы гребня, толщина срезаемой стружки. Важной агротехнической характеристикой почвообрабатывающей ротационной машины является гребнистость дна борозды. Высота образуемых гребней должна быть менее 20 % глубины обрабатываемой почвы. В настоящее время для обеспечения требуемой высоты гребней в конструкциях ротационных машин имеется ряд ограничений, которые обуславливают режим работы и параметры агрегатов. В процессе исследований оценивали степень влияния параметров разработанного рабочего органа и затрачиваемой энергии на качество обработки почвы. Опыты проводили на установке, включавшей рабочий орган, силовой агрегат, регулируемую и контрольно-измерительную аппаратуру. В качестве силовой части использовали электродвигатели переменного тока с фазовым ротором, мощность которых составляла 0,75 и 1,50 кВт, а частота вращения – 920, 1500 и 3000 об/мин. Установлены параметры, позволяющие на 11–17 % уменьшить затраты энергии на обработку почвы по сравнению с существующими машинами и обеспечить выравнивание дна борозды до 80 %.

Ключевые слова: почвообрабатывающая машина, двухдисковый рабочий орган, качество, энергоёмкость, обработка почвы

Для цитирования: Иванов, А. С. Разработка и обоснование двухдискового рабочего органа сельскохозяйственной машины для обработки почвы / А. С. Иванов, М. С. Пузырев, Е. М. Чикишев // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 383–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-383-389>

Development and Rationale of Two-Disk Operating Body of Agricultural Machine for Tillage

A. S. Ivanov¹⁾, M. S. Puzyrev¹⁾, E. M. Chikishev²⁾

¹⁾Northern Trans-Ural State Agricultural University (Tyumen, Russian Federation),

²⁾Tyumen Industrial University (Tyumen, Russian Federation)

Abstract. One of the main problems in the design of agricultural machines, including tillage machines, is to ensure the optimal energy intensity of various technological operations. The design, kinematic and technological parameters of rotary tillage machines have a significant impact on the indicators of the energy intensity of the process and the quality of tillage. These parameters include the diameter of the operating body of the agricultural machine, the angular speed and rotational speed of the disks, the number of cutting elements, the translational speed of the operating body, the height of the ridge formed during soil cultivation, the thickness of the cut chips. An important agrotechnical parameter of a rotary tillage machine is

Адрес для переписки

Иванов Андрей Сергеевич
Государственный аграрный университет Северного Зауралья
ул. Республики, 7,
625003, г. Тюмень, Российская Федерация
Тел.: +7 3452 46-16-43
ivanovas@gausz.ru

Address for correspondence

Ivanov Andrei S.
Northern Trans-Ural State Agricultural University
7, Republiki str.,
625003, Tyumen, Russian Federation
Tel.: +7 3452 46-16-43
ivanovas@gausz.ru

the ridging of the furrow bottom. The height of the ridges formed should not be less than 20 % of the depth of the cultivated soil. Currently, in order to ensure the required height of the ridges in the designs of rotary machines, there are a number of restrictions that determine the operating mode and parameters of the units. The degree of influence of the parameters of the developed operating body and the energy consumption on the quality of tillage has been assessed in the process of the research. The experiments have been carried out on an installation that included an operating body, a power unit, control and instrumentation equipment. As the power section, AC motors with a phase rotor were used, the power of which was 0.75 and 1.50 kW, and the speed of rotation was 920, 1500 and 3000 rpm. The parameters have been set that allow to reduce the energy consumption for tillage by 11–17 %, compared to existing machines, and ensure the alignment of the furrow bottom by up to 80 %.

Keywords: tillage machine, two-disk operating body, quality, energy intensity, tillage

For citation: Ivanov A. S., Puzyrev M. S., Chikishev E. M. (2021) Development and Rationale of Two-Disk Operating Body of Agricultural Machine for Tillage. *Science and Technique*. 20 (5), 383–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-383-389> (in Russian)

Введение

Качество технологических операций и обеспечение оптимальной энергоёмкости – одни из главных проблем при разработке конструкций почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин. Совершенствование конструкций оборудования, как правило, направлено на повышение безотказности и надёжности в процессе работы, ресурса самих машин и их рабочих органов, на ресурсосбережение в ходе обработки почвы и увеличение производительности.

Конструктивные, кинематические и технологические параметры ротационных сельскохозяйственных машин оказывают существенное влияние на показатели энергоёмкости процесса и качество обработки почвы. К таким параметрам относятся диаметр рабочего органа машины, угловая скорость и частота вращения дисков, число режущих элементов, поступательная скорость рабочего органа, высота образуемого при обработке почвы гребня, толщина срезаемой стружки [1–9]. Важной агротехнической характеристикой почвообрабатывающей ротационной машины является гребнистость дна борозды. При этом высота образуемых гребней должна быть менее 20 % глубины обрабатываемой почвы. В связи с этим имеется ряд ограничений, которые обуславливают режим работы и параметры ротационных машин.

Цель исследований авторов – установить закономерности влияния кинематических и конструктивных параметров двухдискового ротационного рабочего органа на качество и энергоёмкость обработки почвы. Эти задачи решались в процессе резания почвы активно-пассивным ротационным рабочим органом. Определены влияние установочных и конструктивных характеристик двухдискового ро-

тационного рабочего органа на энергоёмкость его рабочего процесса, силовые характеристики рабочего органа, приводящие к разрушению гребня дна борозды. Дана оценка энергетических параметров рабочего процесса комбинированного двухдискового рабочего органа.

Методика исследований

В процессе выполнения исследований определяли профили и размеры гребней дна борозды и потенциал синхронизации работы активного и пассивного дисков, выявляли режимы, обеспечивающие ровное дно борозды. Кроме того, устанавливали кинематические и конструктивные параметры двухдискового рабочего органа, при которых обеспечивалась оптимальная энергоёмкость процесса.

Исследования проводились в почвенном канале Института агроинженерии ЮУрГАУ (Россия). Твёрдость почвы определялась в трех точках с трехкратной повторностью при помощи твердомера на глубине 0,00–0,10 и 0,10–0,20 м согласно ГОСТ 29269–91 [10]. Количество замеров 20 в разных участках ящика с почвой. Влажность почвы измеряли в соответствии с ГОСТ 28268–89 [11] в период проведения лабораторных исследований по горизонтам в пяти точках канала и ящика с трехкратной повторностью по каждому горизонту.

Поскольку основным ограничением в исследованиях рабочего процесса почвообрабатывающих орудий является сезонность проведения опытов, то для того, чтобы обеспечить приближение к реальным условиям в осенне-зимний период, выемку образцов почвы производили предварительным оттаиванием на глубину промерзания (до перехода почвы из мерзлого состояния в пластичное) без нарушения ее

естественного сложения. Почву укладывали в деревянные ящики с габаритными размерами 200×200×1500 мм на глубину 20–22 см. Ящики с почвенными образцами устанавливали в почвенном канале на уровень дневной поверхности.

Приборы и оборудование

Опыты проводили на установке, включавшей рабочий орган, силовой агрегат, регулируемую и контрольно-измерительную аппаратуру (рис. 1).

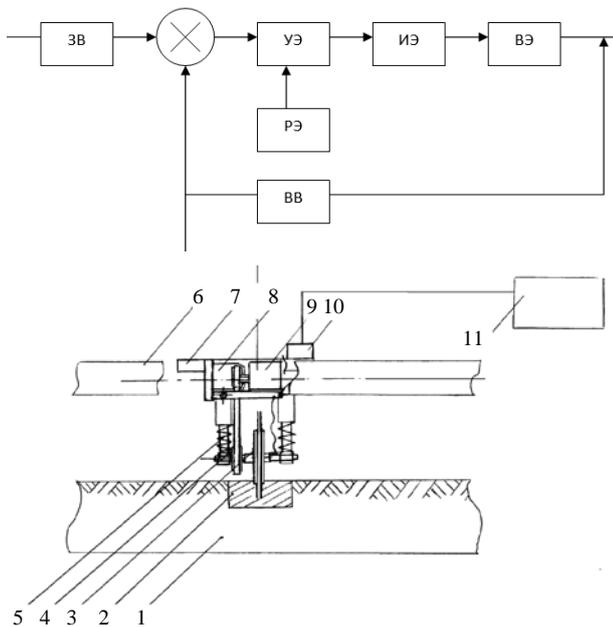


Рис. 1. Структурная и принципиальная схемы установки:

УЭ – управляющий элемент; РЭ – регулирующий элемент; ИЭ – рабочий орган, исполняющий элемент; ВЭ – воспринимающий элемент; ВВ – интерфейс выходной величины; ЗВ – электродвигатель, элемент задающей величины; 1 – почвенный канал; 2 – исследуемый массив грунта; 3 – двухдисковый рабочий орган; 4 – плоскоременная передача; 5 – механизм регулирования глубины и устойчивости хода; 6 – тележка; 7 – рама установки; 8 – электродвигатель; 9 – червячный редуктор; 10 – система автоматического управления; 11 – контрольно-измерительные приборы

Fig. 1. Structural and schematic diagram of the installation:

УЭ – control element; РЭ – regulating element; ИЭ – рабочий орган, executing element; ВЭ – receiving element; ВВ – output quantity interface; ЗВ – electric motor, reference variable element; 1 – soil channel; 2 – investigated soil mass; 3 – two-disc operating body; 4 – flat belt transmission; 5 – mechanism adjusting depth and stability of course; 6 – cart; 7 – installation frame; 8 – electric motor; 9 – worm gear; 10 – automatic control system; 11 – instrumentation

В качестве силовой части использовали электродвигатели серии АИР-80 переменного тока с фазовым ротором, мощность которого составляла 0,75 и 1,50 кВт, частота вращения – 920, 1500, 3000 об/мин. Рабочий орган состоял из двух дисков с режущими элементами (рис. 2) [12]: один жестко закреплен на валу болтовым соединением, второй свободно вращался в подшипнике. Регулирующую и в то же время приводящую роль выполнял электродвигатель с автоматическим управлением частоты вращения вала от 0 до 900 об/мин с помощью частотного преобразователя E-MINI LP7 (рис. 3).



Рис. 2. Общий вид двухдискового рабочего органа

Fig. 2. General view of two-disk operating body



Рис. 3. Установка для проведения эксперимента с автоматическим преобразованием частоты электродвигателя на основе E-MINI LP7

Fig. 3. Experiment setup with automatic frequency conversion of electric motor on the basis of E-MINI LP7

В программе исследований в качестве контрольно-измерительной части использовали цифровой измеритель переменного тока MD-1614В с возможностью передачи данных на персональный компьютер. Цифровой измеритель включал вольтметр, амперметр, ваттметр стрелочного типа. Измеряли активную мощность, потребляемую из сети. Частоту вращения рабочих органов измеряли фототахометром DT-2234А. Калибровку тахометра проводили часовым тахомет-

ром Т410-Р с классом точности 1,0. В качестве режущих элементов использовали прямые ножи различной конфигурации. Значения углов принимались исходя из минимально допустимых: $\gamma_1 = 20^\circ$; $\gamma_2 = 22^\circ$; $\alpha_1 = 25^\circ$; $\alpha_2 = 45^\circ$; $\alpha_3 = 30^\circ$ (γ – угол заточки ножей; α – угол, на который изменяет свою траекторию нож рабочего органа). Материал ножей – сталь Ст45. В качестве основания рабочего органа были выбраны плоские диски зерновой сеялки СЗ-3,6. Для исключения забивания почвой зазора между дисками применяли вырезной плоский диск.

Результаты исследований

В работах таких ученых, как Ю. И. Мятшин, И. М. Гринчук, Г. М. Егоров и другие, исследованы частные случаи общих уравнений движения рабочих органов ротационных почвообрабатывающих машин [13]. Для описания траектории движения активного диска примем следующие параметры: привод от вала отбора мощности трактора, цилиндрический барабан, ось которого расположена фронтально и горизонтально:

$$\left. \begin{aligned} x &= R(\alpha/\lambda \mp \sin \alpha); \\ y &= R(1 - \cos \alpha), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\alpha = \omega t$ – угол, на который изменяет свою траекторию рабочий диск, рад; ω – угловая скорость рабочего органа, рад/с; t – время, затрачиваемое на поворот рабочего диска на угол α , с; R – радиус окружности цилиндрического барабана, м.

Для пассивного диска:

$$\left. \begin{aligned} x &= R(\alpha - \sin \alpha); \\ y &= R(1 - \cos \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Рассмотрим общее влияние элементарных сил сопротивления на уменьшение частоты вращения пассивного диска. По заданным уравнениям построим траекторию движения концевых точек ножей при следующих параметрах: кинематический показатель $\lambda = 3$; радиусы по концам ножей $d_1 = d_2 = 0,2$ м.

Траектория передвижения концевых точек ножей двухдискового рабочего органа показана на рис. 4. Из рисунка видно, что за один оборот пассивного диска совершаются три оборота

второго активного диска. Такая разница наблюдается вследствие заданного значения кинематического показателя $\lambda = 3$. На практике эта разница между положением ножей отличается от теоретической, поскольку вращение пассивного диска осуществляется за счет реакции почвы на нож и части диска на глубину обработки. При этом реакция почвы на пассивный диск зависит от контролируемых, но не регулируемых и случайных факторов, которые достаточно трудно установить в режиме автоматического регулирования процесса, а в некоторых ситуациях – не представляется возможным.

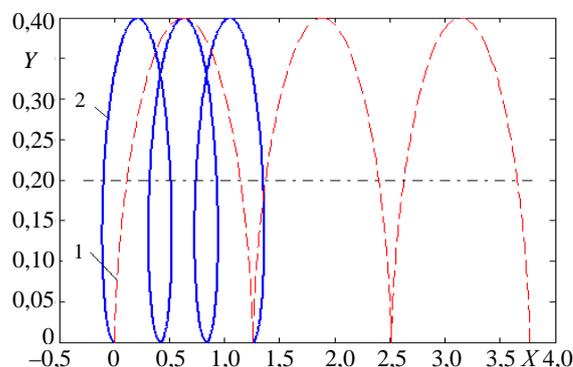


Рис. 4. Траектория передвижения концевых точек ножей двухдискового рабочего органа: 1 – пассивного диска; 2 – активного диска; X, Y – расстояние, на которое перемещается концевая точка ножа в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно

Fig. 4. Trajectory of end point movements of two-disk operating body knives: 1 – passive disk; 2 – active disk; X, Y – distance by which the end point of the knife moves in horizontal and vertical planes, respectively

При фрезеровании барабаном по ходу движения машины для условий $\gamma = 0$, $\beta = 0$ высоту гребня можно вычислить по формулам:

$$\pi / m = \lambda \sin \alpha_2 \mp \alpha_2; \quad (3)$$

$$h_2 / R = 1 - \cos \alpha_2. \quad (4)$$

При движении по полю трактора с ротационной почвообрабатывающей машиной происходит поступательное движение (подача S) рабочего органа. В случае, когда для ножа пассивного диска двухдискового рабочего органа концевая точка B располагается в интервале между ножами активного диска при его подаче S_1 и условии $h_2 \rightarrow 0$ (рис. 5), будет иметь место следующая зависимость:

$$B \in [x_1; x_1 + S_1]. \quad (5)$$

От подачи пассивного диска зависит частота нахождения точки B в интервале S_1 . Поскольку кинематический показатель $\lambda_2 < 1$, это означает, что траектория движения концевых точек ножа пассивного диска имеет отличие от траектории движения активного диска (рис. 5).

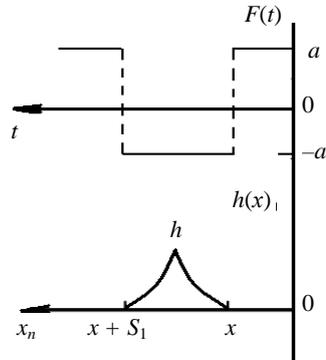


Рис. 5. Диапазон гребнеобразования активным рабочим диском

Fig. 5. Range of ridge formation by active operating disk

Исходя из того, что от реакции почвы зависит частота вращения пассивного диска, можно сделать вывод, что в образовавшемся дне борозды концевые точки данного диска будут распределяться по аналогии непрерывного увеличения и уничтожения, описываемых в марковских процессах. А если концевая точка любого ножа не попадает в интервал подачи S_1 , влияние силы резания на гребень будет незначительным или равным нулю [14]. Отсюда очевидно, что частота подачи дисковых ножей будет напрямую влиять на степень разбиения гребня борозды, а процесс уничтожения, описываемый в марковских процессах, сформирует оптимальное распределение точек, нахо-

дящихся на концах ножей дисков. Траектории, описывающие движение точек, находящихся на концах ножей дисков двухдискового рабочего органа, представлены на рис. 6 [14].

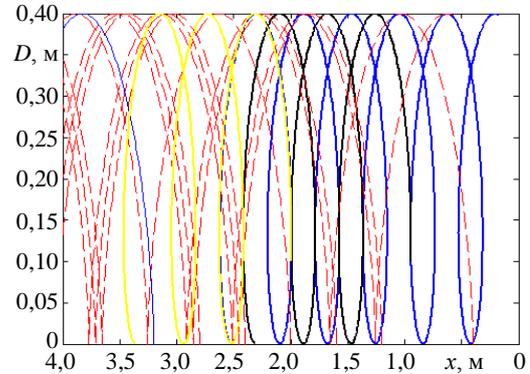


Рис. 6. Траектории концевых точек ножей двухдискового рабочего органа при $z_1 = 3, z_2 = 8$

Fig. 6. Trajectory of knife end points of two-disk operating body at $z_1 = 3, z_2 = 8$

Из графической зависимости рис. 6 прослеживается неравномерность распределения точек, находящихся на концах ножей активного диска, и количество попаданий составляет от одного до трех. Поэтому с целью обеспечения оптимального воздействия со стороны пассивного диска для разрушения гребня борозды необходимы соотношения его ножей в количестве 4:8, 7:7, 8:8 и 3:6. Мощность фрезерования при варьировании конструктивными и кинематическими параметрами приведена в табл. 1.

Для установления влияния коэффициента разрушения гребня борозды на изменение кинематического показателя активного рабочего диска выполнили несколько опытов. Результаты моделирования представлены в табл. 2.

α_i^2 Таблица 1

Мощность фрезерования при варьировании конструктивными и кинематическими параметрами

Milling power with varying design and kinematic parameters

Угол атаки ножей, град	Поступательная скорость v_m , м/с	Кинематический показатель λ	Мощность фрезерования, кВт				
			n_1	n_2	n_3	n_{cp}	σ_i^2
0	1,0	4,1	0,45	0,50	0,55	0,50	0
15°	1,0	2,7	0,49	0,34	0,50	0,44	0,299
15°	1,5	2,7	0,30	0,54	0,70	0,51	0,202
20°	1,0	4,1	0,15	0,20	0,35	0,23	0,156
20°	1,5	2,7	0,30	0,35	0,25	0,38	0,346

Примечание. Влажность почвы 15–18 %, плотность 1,545 кг/м³, глубина обработки 10–12 см.

Обозначения: n_1, n_2, n_3 – порядковый номер измерения мощности фрезерования; n_{cp} – среднее значение мощности фрезерования; σ_i^2 – среднеквадратичное отклонение при измерении.

Матрица планирования и результат моделирования

Planning matrix and simulation result

Номер эксперимента	Соотношение ножей активного и пассивного дисков x_1 (шт.)	Коэффициент разрушения гребня x_2	Кинематический показатель активного диска	
			экспериментальный λ	минимальный λ_{\min}
1	1 (3:3)	0,3	0,972	3,24
2	0,428 (3:7)	0,5	0,726	2,42
3	0,714 (5:7)	0,7	1,260	1,80
4	1 (3:3)	0,5	1,620	3,24
5	0,428 (3:7)	0,7	1,690	2,42
6	0,714 (5:7)	0,3	1,540	1,80
7	1 (3:3)	0,7	2,270	3,24
8	0,428 (3:7)	0,3	0,726	2,42
9	0,714 (5:7)	0,5	0,900	1,80

К активным рабочим органам почвообрабатывающих ротационных машин предъявляют ряд конструктивных требований, позволяющих оценить эффективность их работы, самое важное из которых – значение кинематического показателя. Опыты 1, 2 и 9 (табл. 2) свидетельствуют о том, что данный показатель для разработанного органа меньше допустимого значения. Результаты экспериментов 3, 4, 5 (табл. 2) показывают, что в них было достигнуто оптимальное воздействие (наименьшее значение удельной энергоёмкости почвообработки) со стороны пассивного диска для разрушения гребня борозды при соотношении ножей в количестве 3:3, 3:7 и 5:7. Что касается оптимальной величины коэффициента разрушения гребня, то его значение располагается в диапазоне от 0,5 до 0,7.

Результат определения разницы затрат энергии при фрезеровании и ротационной обработке двухдисковым рабочим органом представлен на рис. 7.



Рис. 7. Сравнение затрат энергии двухдисковым рабочим органом и активным диском: 1 – фрезерование; 2 – ротационная обработка двухдисковым рабочим органом

Fig. 7. Comparison of energy consumption of two-disk operating body and active disk: 1 – milling; 2 – rotary processing with two-disk operating body

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность математической модели реальному процессу, о чем свидетельствует сходимость сопоставления.

2. Определены режимы и конструктивные параметры, обеспечивающие уменьшение ротационной обработки двухдисковым рабочим органом до 20–30 % по сравнению с фрезерованием.

3. Найдены кинематические и конструктивные параметры, при которых наблюдается выравнивание дна борозды до 80 %.

4. Обосновано уменьшение на 11–17 % удельной энергоёмкости фрезерования по сравнению с серийными машинами.

ЛИТЕРАТУРА

1. CIGR Handbook of Agricultural Engineering / ed. Bill A. Stout. Texas A&M University: Published by ASAE, 1999, 660 p.
2. Power Consumption Experiment of Rotary Tillage and Stubble-Mulch Knife Roller / Z. Wang [et al.] // Nongye Jixie Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. 2010. Vol. 41, Iss. 12. P. 44–47.
3. Research of the Torque Testing System in the Spiral Rotary Tillage and Stubble-Mulch Roller Based on Virtual Instrument / G. Zhang [et al.] // American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting-2012. 2012. Vol. 7. P. 5893–5909. <https://doi.org/10.13031/2013.42099>.
4. Захаров, П. В. Моделирование рабочего процесса ротационного культиватора / П. В. Захаров, М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–2. С. 127.

5. Купряшкин, В. Ф. Исследование устойчивости движения подвижного модуля экспериментальной установки при испытании активных ротационных рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. Ф. Купряшкин, Н. И. Наумкин, В. В. Купряшкин // Вестник Мордовского государственного университета. 2016. Т. 26, № 2. С. 246–258.
 6. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков. М.: Машиностроение, 1977. 325 с.
 7. Смирнов, Ю. Г. Нетрадиционные рабочие органы сельскохозяйственных машин / Ю. Г. Смирнов. М.: ВНИИПИ, 1992. 108 с. (Сер. Сельское хозяйство).
 8. Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров комбинированного пахотного агрегата / А. Н. Эрменов [и др.] // Научный журнал КубГАУ. 2012. Т. 3, № 77. С. 1–10.
 9. Яцук, Е. П. Ротационные почвообрабатывающие машины / Е. П. Яцук, И. М. Панов, Д. Н. Ефимов. М.: Машиностроение, 1971. 255 с.
 10. Почвы. Общие требования к проведению анализов: ГОСТ 29269–91. Введ. 01.07.1993. М.: Стандартиформ, 2005. 4 с.
 11. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений: ГОСТ 28268–89. Введ. 01.06.1990. М.: Стандартиформ, 2006. 8 с.
 12. Стерневая сеялка с комбинированным ротационным рабочим органом: пат. 97239 Рос. Федерации, МПК А01С 7/00, А01В 49/06, А01В 33/10 / А. С. Иванов. Опубл. 10.09.2010.
 13. Матяшин, Ю. И. Расчет и проектирование ротационных почвообрабатывающих машин / Ю. И. Матяшин, И. М. Гринчук, Г. М. Егоров. М.: Агропромиздат, 1988. 176 с.
 14. Пузырев, М. С. Исследование качественно-энергетических параметров двухдискового ротационного почвообрабатывающего рабочего органа / М. С. Пузырев, Б. Г. Котляр, В. А. Стрижов // Достижения науки и техники АПК. 2006. № 2. С. 36–38.
- Поступила 14.05.2018
 Подписана в печать 06.12.2018
 Опубликовано онлайн 30.09.2021
- REFERENCES
1. Bill A. Stout (ed.) (1999) *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*. Texas A&M University: Published by ASAE. 660.
 2. Wang Z., Xia J., Xu Q., Hu R. (2010) Power Consumption Experiment of Rotary Tillage and Stubble-Mulch Knife Roller. *Nongye Jixie Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 41 (12), 44–47.
 3. Zhang G., Zhou Y., Xia J., Xu Q., Huang H., Yao X. (2012) Research of the Torque Testing System in the Spiral Rotary Tillage and Stubble-Mulch Roller Based on Virtual Instrument. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting-2012*, 7, 5893–5909. <https://doi.org/10.13031/2013.42099>.
 4. Zakharov P. V., Lysych M. N., Shabanov M. L. (2015) Modeling of Working Process for Rotary Cultivator. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (2–2), 127 (in Russian).
 5. Kupryashkin V. F., Naumkin N. I., Kupryashkin V. V. (2016) Stability of Motion of Mobile Module of Experimental Setup in the Study of Active Rotary Working of Machines for Soil Treatment. *Vestnik Mordovskogo Gosudarstvennogo Universiteta [Bulletin of Mordovia State University]*, 26 (2), 246–258 (in Russian).
 6. Sineokov G. N. (1977) *Theory and Calculation of Soil-Working Machines*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 325 (in Russian).
 7. Smirnov Yu. G. (1992) *Unconventional Working Bodies of Agricultural Machinery. Series: Agriculture*. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute for Patent Information Publishing House. 108 (in Russian).
 8. Erkenov A. N., Shekikhachev Yu. A., Hazhmetov L. M., Gergokaev D. A., Sabanchiev H. H. (2012) Theoretical Substantiation of Constructive-Regime Parameters of the Combined Arable Unit. *Nauchnyi Zhurnal KubGAU = Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 3 (77), 1–10 (in Russian).
 9. Yatsuk E. P., Panov I. M., Efimov D. N. (1971) *Rotary Tillage Machines*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 255 (in Russian).
 10. State Standard 29269–91. *Soils. General Requirements for Analysis*. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 4 (in Russian).
 11. State Standard 28268–89. *Soils. Methods for Determination of Moisture Content, Maximum Hygroscopic Moisture Content and Moisture Content of Stable Wilting of Plants*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 8 (in Russian).
 12. Ivanov A. S. (2010) *Combined Rotary Stubble Seeder Working Body*: Patent No 97239 of Russian Federation (in Russian).
 13. Matyashin Yu. I., Grinchuk I. M., Egorov G. M. (1988) *Calculation and Design of Rotary Tillage Machines*. Moscow, Agropromizdat Publ. 176 (in Russian).
 14. Puzyrev M. S., Kotlyar B. G., Strizhov V. A. (2006) Investigation of Qualitative and Energy Parameters of Two-Disc Rotary Soil Cultivating Body. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*, (2), 36–38 (in Russian).
- Received: 14.05.2018
 Accepted: 06.12.2018
 Published online: 30.09.2021

Thermodynamic Estimation of the Parameters for the C–H–O–N–Me-Systems as Operating Fluid Simulants for New Processes of Powder Thermal Spraying and Spheroidizing

A. V. Gorbunov¹⁾, O. G. Devoino²⁾, V. A. Gorbunova²⁾, O. K. Yatskevitch²⁾, V. A. Koval²⁾

¹⁾Aeronautics Institute of Technology (Sao Jose dos Campos, Brazil),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. Over the past few years, a group of new processes was developed for high-temperature, including plasma electric arc spraying (at ambient pressure) and spheroidizing of some ceramic and metal powder materials with the use of gaseous hydrocarbons in the heat carriers as well as with feeding of organic additions into a high-temperature jet, in particular, polymeric ones, to control porosity of sprayed metallic functional coatings. The paper considers the possibility to modify such technological processes by introducing solid fuel additions of a polymer type into the operating fluid of an apparatus for gas-thermal (plasma or other) treatment, which provides melting of metal or oxide powders. For this, with the help of thermodynamic analysis, the processes have been evaluated at temperatures (300–3000) K for the set of such reacting five component systems as C–H–O–N–Me (at ambient pressure 0.101 MPa) with five variants of Me – aluminum, titanium, chrome, copper, nickel. This makes it possible to consider these systems as simulants for potential technologies for the treatment of oxide powders (Al₂O₃, TiO₂, Cr₂O₃) as well as metallic ones (Cu, Ni and their alloys). In order to obtain high exothermic contribution to the heating of powders, the combination “air + polymeric addition (polyethylene) of LDPE grade” was chosen as mixed heat carrier (operating fluid) for the basic version of simulated process. During the analysis of equilibria for the considered multicomponent systems (17 variants), a set of following parameters has been used to characterize the energy intensity of the target powder heating process: the equivalence ratio for reacting mixture and its adiabatic temperature; the energy efficiency of material heating with and without taking into account the effect of fuel addition; specific energy consumption for the powder melting; autothermicity degree of the process during the combined heating (electrothermal heating by the arc of plasma torch and heat flux from the “air + solid fuel additions” mixture) of refractory powders. As a result of the assessment, the preferred (from thermodynamic standpoint) regimes of the considered processes have been found and the possibility to realize an energy-efficient heating of these oxide and metal materials (without oxidation of the latter to CuO, NiO) with a reduced part of the electric channel of energy transfer, resulted from the carrying out of appreciable effect of the fuel-initiated mechanism of heating in the analyzed C–H–O–N–Me-systems, has been shown in the paper.

Keywords: multicomponent C–H–O–N–Me-systems, thermal spraying, spheroidizing, ceramic and metal powder materials, aluminum and chromium oxides, titanium dioxide, copper, nickel, fuel additions, polymers, polyethylene, thermodynamic equilibria, adiabatic temperature, energy efficiency, energy consumptions, autothermicity degree of heating

For citation: Gorbunov A. V., Devoino O. G., Gorbunova V. A., Yatskevitch O. K., Koval V. A. (2021) Thermodynamic Estimation of the Parameters for the C–H–O–N–Me-Systems as Operating Fluid Simulants for New Processes of Powder Thermal Spraying and Spheroidizing. *Science and Technique*. 20 (5), 390–398. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-390-398>

Термодинамическая оценка параметров систем C–H–O–N–Me как имитаторов рабочей среды в новых процессах газотермического напыления и сфероидизации порошков

Канд. техн. наук А. В. Горбунов¹⁾, докт. техн. наук О. Г. Девойно²⁾,
канд. хим. наук В. А. Горбунова²⁾, кандидаты техн. наук О. К. Яцкевич²⁾, В. А. Коваль²⁾

¹⁾Технологический институт аэронавтики (Сан Жозе дус Кампус, Бразилия),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В последнее время ведется разработка группы новых технологий высокотемпературного, в том числе плазменного электродугового, напыления (при атмосферном давлении) и сфероидизации некоторых керамических

Адрес для переписки

Горбунова Вера Алексеевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-71
ecology@bntu.by

Address for correspondence

Gorbunova Vera A.
Belarusian National Technical University
67, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-71
ecology@bntu.by

и металлических порошковых материалов как с использованием углеводородных газов в качестве теплоносителей, так и с внесением в высокотемпературную струю органических добавок (в частности, полимерных) для регулирования пористости напыляемых металлических покрытий. В статье рассмотрена возможность модификации процессов данной группы за счет ввода твердотопливных добавок полимерного типа в рабочую среду аппарата для газотермической (плазменной или другой) обработки, обеспечивающей плавление металлических или оксидных порошков. Для этого с помощью термодинамического анализа проведена оценка процессов при температурах (300–3000) К для набора реагирующих пятикомпонентных систем типа C–H–O–N–Me (при давлении 0,101 МПа) с пятью вариантами Me – алюминий, титан, хром, медь, никель. Это позволяет рассматривать данные системы как имитаторы для потенциальных технологий обработки как оксидных (Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3), так и металлических (Cu, Ni и их сплавы) порошков. С целью получения высокого экзотермического вклада в нагрев порошков в качестве смешанного теплоносителя для базового варианта моделируемого процесса выбрано сочетание «воздух + полимерная добавка (полиэтилен марки LDPE)». В ходе анализа равновесий в рассмотренных многокомпонентных системах (17 вариантов) для характеристики энергоемкости целевого процесса нагрева порошков использовали набор параметров: фактор эквивалентности реакционной смеси и ее адиабатическую температуру, энергетический КПД нагрева материала с учетом и без учета вклада топливной добавки, удельные энергозатраты на плавление порошка, степень автотермичности процесса при комбинированном нагреве (электротермическое нагревание через дугу плазмотрона и тепловыделение от смеси «воздух + твердотопливная добавка») тугоплавких порошков. В результате проведенной оценки найдены предпочтительные (с термодинамических позиций) режимы рассмотренных процессов и показана возможность реализации энергоэффективного нагрева данных оксидных и металлических материалов (без окисления последних до CuO_x , NiO) с пониженной долей электрического канала энергопереноса за счет существенного вклада топливного механизма нагрева в C–H–O–N–Me-системах.

Ключевые слова: многокомпонентные системы C–H–O–N–Me, газотермическое напыление, сфероидизация, керамические и металлические порошковые материалы, оксиды алюминия и хрома, диоксид титана, медь, никель, топливные добавки, полимеры, полиэтилен, термодинамические равновесия, адиабатическая температура, энергетический КПД, удельные энергозатраты, степень автотермичности нагрева

Для цитирования: Термодинамическая оценка параметров систем C–H–O–N–Me как имитаторов рабочей среды в новых процессах газотермического напыления и сфероидизации порошков / А. В. Горбунов [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 390–398. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-390-398>

Introduction

Over the last 5–10 years, specialists in a number of countries (at University of Toronto, Canada, and others) have been intensively developing a group of new high-temperature technologies, including electric arc spraying (at atmospheric pressure, APS) and melting/spheroidizing several ceramic (Al_2O_3 , WC, ZrO_2) and metal (copper and its alloys for antibacterial coatings, nickel-based superalloy Inconel 625) powder materials, both using hydrocarbon-based gases (including $CH_4 + CO_2$ -mixtures), and with feeding of solid or liquid organic additions to high-temperature jet [1–8]. Some polymeric materials can

be used as these additions in order to control porosity and microstructure of sprayed metal and composite functional coatings (including transpiration cooled ones for heat-resistant blades of gas turbines) [1]. A schematic diagram of a thermal spray system of this type is shown in Fig. 1a.

In this regard, the opportunity to modify the processes of this group is obvious by using the feeding of solid fuel additions (SFA) of polymeric type (which are typically low cost ones) into the operating fluid of these apparatuses for thermal (plasma or other) treatment, purposed for melting of metal or refractory oxide powders under the conditions of gas-powder flow.

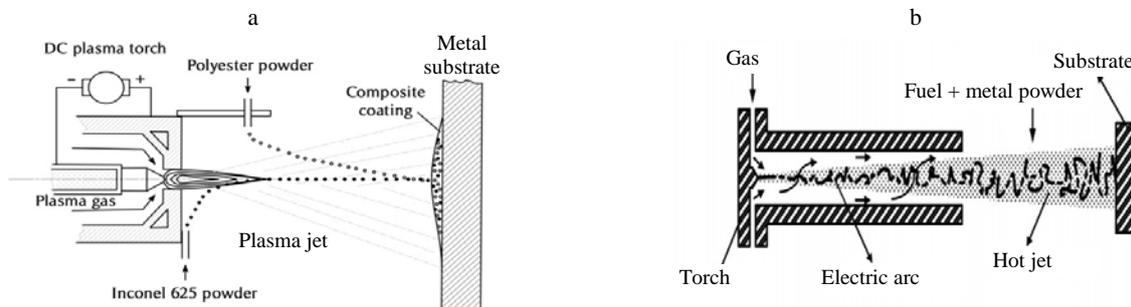


Fig. 1. Variants of schematics of the systems for high temperature processing of metal and ceramic powders, using the polymeric particle additions: a – on the technical description [1] for the process of electric arc plasma spraying of metal/alloy powders; b – analyzed by authors schematic diagram for potential technologies for thermal plasma spraying or spheroidizing of oxide and metal powders with additional feeding of SFA-addition in the processing zone

At the same time, it seems acceptable to consider (initially, at a theoretical level) the case of air heat carrier (it acts simultaneously as an oxidizer). It was efficiently used during the recent few years by Russian group [9, 10], based on new arc plasma torches with a power of up to 52 kW for powder spraying of some alloys, oxides and cermet compositions, and, as one of the variants, this technology was used with the combination of air with injection of hydrocarbons (propane-butane or methane) additions into the torch. The chosen variant of the process to consider is schematically illustrated in Fig. 1b.

To execute this task, at the first stage it is expediently to use only thermodynamic analysis of energy consumption parameters of chosen variant of the thermal process. As the simulants of typical thermal treated powders in a high temperature flow, it is suitable to consider a set of three oxide compounds – Al₂O₃, TiO₂, Cr₂O₃ and two metals – copper and nickel. These substances are widely used in conventional industrial technologies [11] as well as newly developed ones for spheroidizing and plasma spraying of powder materials [1, 2, 4, 8–10, 12].

Methodology of analysis

We used the variant of thermodynamic method, which is based on finding the maximum of entropy of reacting system (i. e. minimization of the Gibbs free energy/thermodynamic potential) in the considered equilibrium or quasi-equilibrium systems at specified pressure and temperature regime at the inlet, using such code for chemical thermodynamics analysis as TERRA, developed at Bauman MSTU, Moscow [13, 14]. An algorithm for calculation of thermodynamic states in multicomponent systems with organic and inorganic components is based on the equations:

$$TdS \geq dU + \delta A \quad \text{or} \quad TdS - dU - pdv \geq 0; \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^k S_i^{(p_i)} n_i + \sum_{l=1}^L S_l n_l = \sum_{i=1}^k \left(S_i^0 - R_0 \ln \frac{R_0 T n_i}{p} \right) n_i + \sum_{l=1}^L S_l^0 n_l - U + \sum_{i=1}^{k+L} U_i n_i = 0; \quad (2)$$

$$-U + \sum_{i=1}^{k+L} U_i n_i = 0; \quad (3)$$

$$U_i = \int_{T_0}^T C_{vi} dT + \Delta_f H_i^0(T_0); \quad (4)$$

$$b_j = \sum_{i=1}^{k+L} a_{ji} n_i, \quad j=1, 2, \dots, m; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k a_{ei} n_i = 0; \quad (6)$$

$$pv = R_0 T \sum_{i=1}^k n_i, \quad (7)$$

where T – temperature, K; S – total entropy of the mixture, J·kg⁻¹·K⁻¹; U – complete internal energy, J·kg⁻¹; A – pressure-volume work of the system, J·kg⁻¹; p – pressure, Pa; v – specific volume, m³·kg⁻¹; $S_i^{(p_i)}$ – entropy of gas phase component at the partial pressure which it will have in an equilibrium condition; k – quantity of components of the gaseous phase; L – quantity of condensed phases accounted at calculation; n_i – concentration of the i^{th} component of the mixture, mol·kg⁻¹; S_i – entropy of the i^{th} component of the mixture, J·mol⁻¹·K⁻¹; S_i^0 – standard entropy of gas phase component at temperature T and $p = 0.101$ MPa; R_0 – the universal gas constant, J·mol⁻¹·K⁻¹; C_{vi} – specific heat capacity of the i^{th} component of mixture at $v = \text{const}$, J·mol⁻¹·K⁻¹; H_i^0 – standard enthalpy of the i^{th} component of mixture, J·mol⁻¹; b_j – mole content of the j^{th} chemical element at the system, mol·kg⁻¹; a_{ji} – stoichiometric coefficient, i. e. numbers of atoms of chemical element j in substance i .

During the analysis of thermodynamic equilibria in the multicomponent systems (17 of their variants were considered), a set of the following parameters was used to characterize the energy intensity of desired process of heating and melting of metal-containing powders: the equivalence ratio (ER) of the reacting mixture and its adiabatic temperature T_{ad} ; such output parameters as the energy efficiency EnE of the material heating (in various versions – with and without taking into account the contribution of the fuel addition to the efficiency), specific electrical energy consumption for the heating and melting EC , the degree of autothermicity (in a variant on temperature AD_T and in a variant on enthalpy AD_H) for total allothermal process of combined heating of refractory powders (electrothermal heating through an arc of plasma torch and heat transfer from the oxidizing mixture “air + SFA”). Part of these parameters was tested

earlier for characterization of processes of thermochemical and plasma assisted pyrolysis, gasification and combustion of a number of industrial fuels and wastes, including solid ash-rich fuels [15–21].

The temperature T_{ad} for mixtures with established components of equilibrium system was found based on the following dependences derived from the law of conservation of energy [21]:

$$I_{pr}(T_{ad}) = I_{in}(T_0); \quad (8)$$

$$I_{in}(T_0) = \sum_j (M_j \Delta_f H_j^0); \quad (9)$$

$$I_{pr}(T_{ad}) = \sum_i (M_i \Delta_f H_i^0) + \sum_i \left(M_i \int_{T_0}^{T_{ad}} C_{pi}(T) dT \right), \quad (10)$$

where $I_{pr}(T_{ad})$ – sum of the standard enthalpies of formation of obtained products $\Delta_f H_i^0$ (with taking into account their fractions M_i in the product mixture) and the enthalpies of their heating from initial temperature $T_0 = 298.15$ K to adiabatic T_{ad} ; $I_{in}(T_0)$ – sum of the standard enthalpies of formation for the initial components $\Delta_f H_j^0$ (with taking into account their molar fractions M_j in the initial mixture); C_{pi} – specific heat capacity for the products.

First variant of the energy efficiency was determined on the basis of the first law of thermodynamics, by analogy with the dependence previously used to describe a similar efficiency (which coincides with CGE (cold gas efficiency)) [16] for plasma gasification of fuels [15–18] with syngas production (based on CO and H₂) as the main product

$$EnE = \frac{LHV_{SG}}{LHV_F + Electricity}, \quad (11)$$

where LHV_{SG} , LHV_F – lower heating values for the main product and for the initial fuel; *Electricity* – total electrical energy consumption in this process during the operation of arc plasma torch and auxiliary electrical equipment. To determine *Electricity*, the calculated difference $(H_{T_2}^0 - H_{T_{ad}}^0)_{pr}$ was used (it was assumed to be equal to the required power of the torch P_{pl}) between total

enthalpy of the main product at desired operating temperature T_2 and the enthalpy of the product at T_{ad} .

For the currently considered case of heating of metal or ceramic powders in (11) was modified by introducing into the numerator (instead of LHV_{SG}) the quantity of difference of the enthalpies $\Delta H_{Me} = (H_{T_2}^0 - H_{298}^0)_{Me}$, which is required to heat the metal or oxide from the temperature of its standard state T_0 to the desired specified temperature T_2 , which exceeds the powder melting temperature T_1 by the variable (that characterizes the degree of overheating of the reacting system beyond T_1 , given below in Part 4), approximately representing the degree of non-adiabaticity of real thermal apparatus in quasi-cylindrical zone between the plasma torch nozzle and the end of the powder heating area (i. e. the substrate in a case of spraying process). The modified expression was established as the following:

$$EnE_1 = \frac{G_{Me} \Delta H_{Me}}{(G_{FA} LHV_{FA}) + (P_{pl} / (\eta_{el} \eta_{pl}))} \rightarrow \frac{G_{Me} \Delta H_{Me}}{+ (N_{aeq} / \eta_{el})}, \quad (12)$$

where G_{Me} , G_{FA} – mass flow rates of the metal (ceramic) powder and fuel addition; LHV_{FA} – lower heating value of the fuel addition; P_{pl} – electric power on an arc of plasma torch; N_{aeq} – power of the auxiliary electrical equipment (in this case, an air compressor); η_{pl} – thermal efficiency of the torch (assumed equal to 0.80 based on aggregated data for non-transferred arc plasma torches, including ones for thermal spraying [22]); η_{el} – energy efficiency of commercial-scale solid fuel power plants CPP (it was chosen as 0.393 according to the actual reference data from DOE/NETL of USA) [23]. The thermodynamic properties of the reagents (in particular, ΔH_{Me}) were determined using the NIST’s thermodynamic database [24].

The calculated values for the case of the energy efficiency EnE_3 (assuming a zero contribution of the “fuel term” to the efficiency value) represent one of the feasible scenarios in which the cost of the consumed fuel addition will be close to negligible level, that will ensure an increase of the EnE_3 efficiency magnitude in the considered regime of combined heating.

Moreover, the equivalence ratio for the mixture was used (that contains a fuel addition, which is decomposed in a redox reaction during the heating) as a useful initial parameter to characterize oxygen-containing reacting mixtures [19]

$$ER = \frac{G_{ox} / G_f}{R_{st}}, \quad (13)$$

where G_{ox}/G_f – ratio of the mass flow rates of oxidizer and fuel for the analyzed reacting mixture; R_{st} – ratio of the flow rates of these reagents in the stoichiometric mixture, which is sufficient for complete fuel oxidation.

The calculation of energy consumption during the operation of a low-pressure compressor for air blowing into the thermal treatment system (in this case, to the plasma torch) was carried out according to the conventional method [25], at the value of polytropic index of 1.40. Also, for the “basic” (further labeled as “bas”) modes (in the N_2 environment, that simulates the regimes of industrial plasma spraying units [11] without fuel additions) of high-temperature processing of powders, we took into account the energy consumption in the

technological chain for producing nitrogen from air, and by analogy with [20] it was assumed at the level of 0.3 kW·h/kg (ignoring the contribution of the CPP energy efficiency).

Choice of polymeric solid fuel addition for the analyzed process

The combination of air + (polymer addition – polyethylene (commercial LDPE grade, i. e. low density PE)) was chosen as a mixed heat carrier for the main variant of the simulated thermal process to ensure high exothermic effect to the powder heating. At the same time, it is important that reclaimed powdery (dusty) polyethylene of technical purity, according to the environmental classifiers of some regions (e. g. CIS countries), belongs to non-hazardous industrial wastes [26] and is typically supplied from petrochemical (organic synthesis) plants to large-scale consumers at prices close to zero. Tab. 1 demonstrates the characteristics of this variant of polymer addition in a comparison with the properties of some related substances to illustrate the preference of LDPE as a potentially better solid fuel.

Table 1

Composition and some thermodynamic properties (standard enthalpy of formation $\Delta_f H^0$, lower and higher heating values LHV , HHV) for typical calorific polymeric materials in a comparison with simple ordinary fuels (the values are shown on dry and ash free basis)

Material or compound (commercial grade)	Formula; mass fraction of non-carbon part	HHV, MJ/kg	LHV, MJ/kg	$\Delta_f H^0$, MJ/kg
Polystyrene (PS, PS-waste)	$(C_8H_8)_n$; 0.077	40.00–43.65 [27–28]	38.30–41.96 [27–29] (†)	–1.18 (at $HHV = 40.0$ [27]), and the close value on [30]
Low density polyethylene (LDPE, LDPE-waste)	$(C_2H_4)_n$; 0.144	46.00–47.74 [27–29]	42.8–44.6 [27–29] (†)	–2.073 [31]
Polyamide oxygen-containing polymer (polycaprolactam grade, PA6)	$(C_6H_{11}NO)_n$; 0.363	30.0–30.9 [28, 32]	28.8 [28, 32]	–2.911 (on the data [24]) [*]
Cellulose	$(C_6H_{10}O_5)_n$; 0.556	17.5 [33–34]	16.0 [35–36] (†)	–5.95 [37]
Graphite	C; 0	32.8 [24]	32.8 [24]	0
Methane	CH ₄ ; 0.251	55.5 [24]	50.0 [24]	–4.67 [24]

^{*} Data for monomer.
Symbol: † – calculated on the equation: $LHV = HHV - 0.21978H$ [38] (H – hydrogen fraction in the compound, wt. %).

Results of thermodynamic modeling

The obtained results for the energy consumption parameters of the heating (with melting of processed oxide and metal powders) for different variants of the C–H–O–N–Me systems (Me = Al, Ti, Cr, Cu, Ni; and the minor fraction of Ar was

also taken into account (as air component) for all systems) are presented in the Tab. 2, and the examples of calculated data on equilibrium chemical composition of products during heating of the systems of this class (in a temperature range up to 3000 K) are shown in Fig. 2–4 (condensed phases are indicated by the symbol “c”).

Table 2

Established energy consumption parameters for heating of different variants of the C–H–O–N–Me-systems (Me = Al, Ti, Cr, Cu, Ni) at pressure $p = 0.101$ MPa

Number of calculated reacting mixture and heated ceramic/metal powder	1 – Cr ₂ O ₃	2 – Cr ₂ O ₃	3 (bas) – Cr ₂ O ₃	4 – Al ₂ O ₃	5 (bas) – Al ₂ O ₃	6 – TiO ₂	7 (bas) – TiO ₂	8 – Cu	9 (bas) – Cu	10 – Ni	11 – Ni	12 – Ni	13 (bas) – Ni
Initial parameters													
Operating gas / use of fuel addition in the mixture	Air / +	Air / +	N ₂ / –	Air / +	N ₂ / –	Air / +	N ₂ / –	Air / +	N ₂ / –	Air / +	Air / +	Air / +	N ₂ / –
Mass fraction of (MeO _x /Me)-powder in the mixture	0.584	0.483	0.667	0.483	0.667	0.483	0.667	0.631	0.800	0.358	0.317	0.323	0.800
Mass fraction of fuel addition in the mixture	0.027	0.034	0	0.034	0	0.034	0	0.024	0	0.042	0.048	0.136	0
Melting point of (MeO _x /Me)-powder T_1 , K	2708	2708	2708	2328	2328	2130	2130	1359	1359	1729	1729	1729	1729
Desired specified temperature of the powder T_2 , K	2850	2850	2850	2500	2500	2300	2300	1500	1500	1900	1900	1900	1900
Difference of enthalpies $H_{T_2}^0 - H_{T_1}^0$, MJ/kg of powder	2.326	2.326	2.326	3.374	3.374	2.120	2.120	0.560	0.560	0.915	0.915	0.915	0.915
Equivalence ratio for redox reaction with fuel ER	0.961	0.961	0	0.961	0	0.961	0	0.997	0	0.971	0.894	0.271	0
Output parameters													
Adiabatic temperature T_{ad} for reacting mixture, K	1458	1651	300	1467	298	1616	348	1495	298	1895	1895	994	298
Condensed products in the reacting mixture at T_2	Cr ₂ O ₃ (c)	Cr ₂ O ₃ (c)	Cr ₂ O ₃ (c)	Al ₂ O ₃ (c)	Al ₂ O ₃ (c)	TiO ₂ (c)	TiO ₂ (c)	Cu(c)	Cu(c)	Ni(c)	Ni(c)	Ni(c), C(c)	Ni(c)
Degree of overheating (DOH) of the reacting system beyond T_1 , J/J	1.214	1.244	1.187	1.113	1.084	1.072	1.060	1.123	1.120	1.104	1.098	1.077	1.111
Energy efficiency for heating process EnE_1 , J/J	0.114	0.091	0.121	0.187	0.188	0.143	0.125	0.281	0.112	0.147	0.115	0.024	0.124
Energy efficiency EnE_2 (ignoring the contribution of CPP' energy efficiency), J/J	0.244	0.189	0.278	0.362	0.427	0.263	0.282	0.283	0.234	0.148	0.116	0.034	0.276
Energy efficiency EnE_3 (ignoring the contribution of SFA enthalpy), J/J	0.127	0.103	0.121	0.225	0.188	0.180	0.125	1.401	0.112	0.760	0.636	0.045	0.124
Electric energy consumption EC_1 , kW·h/kg of powder	5.094	6.277	5.332	4.170	4.995	3.268	4.728	0.111	1.394	0.335	0.400	5.645	2.052
Electric energy consumption EC_2 (ignoring the contribution of CPP' efficiency), kW·h/kg of powder	2.002	2.467	2.096	1.639	1.963	1.284	1.858	0.044	0.548	0.132	0.157	2.218	0.807
Degree of autothermicity of the reacting system on temperature AD_T , K/K	0.454	0.530	0	0.531	0	0.659	0	0.996	0	0.997	0.997	0.435	0
Degree of autothermicity on enthalpy AD_H , J/J	0.272	0.313	0	0.418	0	0.531	0	0.999	0	0.997	0.997	0.556	0
Footnote. $DOH = (I_{pr}(T_2) - I_{pr}(T_0)) / (I_{pr}(T_1) - I_{pr}(T_0))$; $EC_1 = ((P_{pl} / (\eta_{el}\eta_{pl})) + (N_{aeq}/\eta_{el}) / G_{Me}$; $EC_2 = (P_{pl} / \eta_{pl} + N_{aeq}) / G_{Me}$.													

According to the results of the analysis of seventeen system variants, it was found that for the regimes simulating the melting of metals in air-fuel mixtures (containing mainly CO₂, H₂O and N₂ gases with small admixture of CO and H₂), the parameters

of energy efficiency of the process, such as EnE_1 and EnE_3 , are obviously higher, than for standard (endothermic) modes of their processing in N₂ (as, for example, on industrial plasma spraying modules of the UPU-3D type [11]).

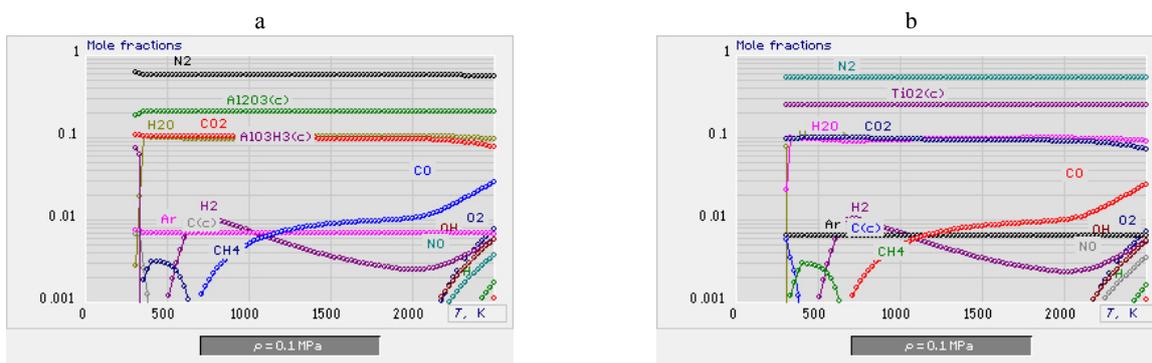


Fig. 2. Calculated dependences for the chemical composition of equilibrium C–H–O–N–Al (a) and C–H–O–N–Ti (b) systems at the range of 300–2500 K (at pressure $p = 0.101$ MPa) at the ratio of flow rates of initial components, corresponding to the process regimes No 4 and No 6 in the Tab. 2

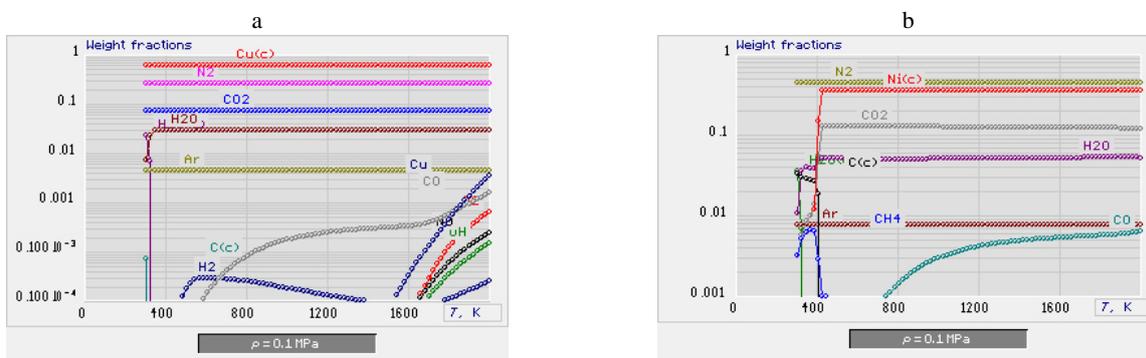


Fig. 3. Calculated dependences for the chemical composition of equilibrium C–H–O–N–Cu (a) and C–H–O–N–Ni (b) systems at the range of 300–2000 K (at pressure $p = 0.101$ MPa) at the ratio of flow rates of initial components, corresponding to the process regimes No 8 and No 10 in the Tab. 2

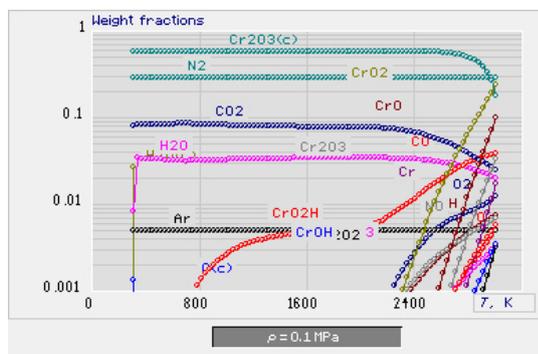


Fig. 4. Calculated dependence for the chemical composition of equilibrium C–H–O–N–Cr-system at the range of 300–3000 K (at pressure $p = 0.101$ MPa) at the ratio of flow rates of initial components, corresponding to the process regime No 1 in the Tab. 2

The specific energy consumption for the cases of heated metals is correspondingly lower than for these “basic regimes” in the N_2 -heat carrier gas (at the mass fraction of Me-powder in reacting mixture of 0.800).

For the case of the considered oxide processing regimes, their output parameters ($EnE_1, EnE_3,$

energy consumptions EC_1 and EC_2) do not differ so much from the “basic regimes” in N_2 -gas media, but still exceed them in efficiency, at least at the mass fraction of powder in the reacting mixture above 0.58 for heating regimes of Cr_2O_3 and above 0.48 for the regimes with Al_2O_3 and TiO_2 powders. Here, the achieved degree of autothermicity of the system (in a variant on enthalpy) during the heating AD_H does not fall outside the range of 0.27–0.53 for these cases.

CONCLUSIONS

1. As a result of theoretical assessment, fulfilled for a set of C–H–O–N–Me-systems, we found preferable regimes, from the point of view of chemical thermodynamics method, for the group of thermal treatment processes (for the example of high-melting oxides of aluminum, chromium and titanium, and copper and nickel metals), which are interesting for technologies of powder spraying and spheroidizing. The processes include melting of the ceramic and metallic materials in gaseous

media formed by the products of air oxidation of solid fuel polymeric addition.

2. The tentative opportunity to arrange an energy-efficient heating of the considered materials (moreover, without oxidation of the condensed phase of considered metals to their oxides CuO, Cu₂O, NiO) was detected at the minimized electric channel of energy transfer (in a comparison with industrially standard (“basic”) regimes of powder melting in nitrogen plasma jet), due to the using the efficient fuel-derived heating channel in these C–H–O–N–Me-systems, which contain the fuel addition.

3. It is shown, based on the results of the analysis of the selected systems, that for the modeling regimes of the melting of Cu and Ni powders in the air-fuel mixtures, the process efficiency parameters, including energy efficiency and energy consumption per unit of the metal are significantly better than for standard (“basic”) regimes of their high-temperature processing (in N₂ medium). For the case of oxide processing regimes, in terms of the calculated output characteristics of the process (EnE_1 , EnE_3 , energy consumption), they differ less substantially from the standard heating regimes (in N₂), but also surpass them in the efficiency (the value of energy consumption EC_2 does not exceed 2.0 kW·h per kg of oxide), despite the moderate level of the found degree of autothermicity AD_H for the process – 0.27–0.53 (in a contrast to the AD_H , which is close to one for the Cu and Ni melting regimes in the highly oxidized gas mixtures at the level of equivalence ratio of the mixtures $ER \geq 0.97$, in which the fuel is almost completely decomposed to CO₂ and H₂O products).

REFERENCES

1. Yugeswaran S., Amarnath P., Ananthapadmanabhan P. V., Pershin L., Mostaghimi J., Chandra S., Coyle T. W. (2021) Thermal Conductivity and Oxidation Behavior of Porous Inconel 625 Coating Interface Prepared by Dual-Injection Plasma Spraying. *Surface and Coating Technology*, 411, 126990. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126990>.
2. Pershin L., Mitrasinovic A., Mostaghimi J. (2013) Treatment of Refractory Powders by a Novel, High Enthalpy DC Plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46 (22), 224019. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/22/224019>.
3. Salimijazi H. R., Ghasemi R., Mostaghimi J., Pershin L. (2016) Characterization of YSZ Coatings Deposited by Conventional DC and CO₂/CH₄ Torches. *International Thermal Spray Conference (ITSC 2016) Proceedings*, 2, 613–616.
4. Mostaghimi J., Pershin L., Salimijazi H., Nejad M., Ringuette M. (2021) Thermal Spray Copper Alloy Coatings as Potent Biocidal and Virucidal Surfaces. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30 (1–2), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01161-7>.
5. Sharifahmadian O., Salimijazi H. R., Fathi M. H., Mostaghimi J., Pershin L. (2013) Relationship between Surface Properties and Antibacterial Behavior of Wire Arc Spray Copper Coatings. *Surface and Coating Technology*, 233, 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.01.060>.
6. Wrona A., Bilewska K., Lis M., Kamińska M., Olszewski T., Pajzderski P., Więclaw G., Jaśkiewicz M., Kamysz W. (2017) Antimicrobial Properties of Protective Coatings Produced by Plasma. *Surface and Coating Technology*, 318, 332–340. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.101>.
7. Mitrasinovic A., Pershin L., Wen J. Z., Mostaghimi J. (2011) Recovery of Cu and Valuable Metals from E-Waste Using Thermal Plasma Treatment. *JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 63 (8), 24–28. <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0132-0>.
8. Borrell A., Carpio P., Salvador M. D., Mataix D. B., Carnicer V., Orts M. J. (2021) Modification of the Properties of Al₂O₃/TZ-3YS Thermal Barrier Coating by the Addition of Silicon Carbide Particles and Fructose. *Coatings*, 11 (4), 387. <https://doi.org/10.3390/coatings11040387>.
9. Kornienko E. E., Mul' D. O., Rubtsova O. A., Vaschenko S. P., Kuzmin V. I., Gulyaev I. P., Sergachev D. V. (2016) Effect of Plasma Spraying Regimes on Structure and Properties of Ni₃Al Coatings. *Thermophysics and Aeromechanics*, 23 (6), 919–928. <https://doi.org/10.1134/S0869864316060147>.
10. Kuzmin V., Gulyaev I., Sergachev D., Vaschenko S., Kornienko E., Tokarev A. (2017) Equipment and Technologies of Air-Plasma Spraying of Functional Coatings. *MATEC Web of Conferences*, 129, 01052. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901052>.
11. Bielyi A. V., Kalinitchenko A. S., Kukareko V. A., Devoino O. G. (2017) *Surface Engineering of Structural Materials with Using of Plasma and Beam Technologies*. Minsk, Belorusskaya Nauka Publ. 457 (in Russian).
12. Lee H., Ramachandran C. S., Pala Z., Sampath S. (2018) Optimizing Thermoelectric Properties of in Situ Plasma-Spray-Synthesized Sub-Stoichiometric TiO_{2-x} Deposits. *Journal of Thermal Spray Technology*, 27 (6), 968–982. <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0731-1>.
13. Gorokhovski M., Karpenko E. I., Lockwood F. C., Messerle V. E., Trusov B. G., Ustimenko A. B. (2005) Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory. *Journal of the Energy Institute*, 78 (4), 157–171. <https://doi.org/10.1179/174602205x68261>.
14. Barbin N. M., Terentiev D. I., Alexeev S. G., Barbina T. M. (2015) Thermodynamic Analysis of Radionuclides Behaviour in Products of Vapour Phase Hydrothermal Oxidation of Radioactive Graphite. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307 (2), 1459–1470. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4587-2>.
15. Marquesi A. R., Filho G. P., Gorbunov A. V., Halinowski A. A., Essiptchouk A. M., Sismanoglu B. N. (2015) Theoretical Assessment of Plasma Gasification Process

- of Low Grade Coal and Biomass Feedstock. *Advances in Chemistry Research*. Vol. 26, Chapter: 4. Nova Science Publishers, 57–76. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2567.4481>.
16. Carpinlioglu M. O., Sanlisoy A. (2018) Performance Assessment of Plasma Gasification for Waste to Energy Conversion: a Methodology for Thermodynamic Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (25), 11493–11504. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.147>.
 17. Mourao R., Marquesi A. R., Gorbunov A. V., Filho G. P., Halinouski A. A., Otani C. (2015) Thermochemical Assessment of Gasification Process Efficiency of Biofuels Industry Waste with Different Plasma Oxidants. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (10), 3760–3767. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2416129>.
 18. Mountouris A., Voutsas E., Tassios D. (2006) Solid Waste Plasma Gasification: Equilibrium Model Development and Exergy Analysis. *Energy Conversion and Management*, 47 (13–14), 1723–1737. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.015>.
 19. Bublevisky A. F., Sagas J. C., Gorbunov A. V., Maciel H. S., Bublevisky D. A., Filho G. P., Lacava P. T., Halinouski A. A., Testoni G. E. (2015) Similarity Relations of Power-Voltage Characteristics for Tornado Gliding Arc in Plasma-Assisted Combustion Processes. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (5), 1742–1746. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2419822>.
 20. Matveev I. B., Messerle V. E., Ustimenko A. B. (2009) Plasma Gasification of Coal in Different Oxidants. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36 (6), 2947–2954. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2007643>.
 21. Engel'sht V. S., Balan R. K. (2011) Chemical Thermodynamics of the Vapor-Oxygen Gasification of Graphite. *High Temperature*, 49 (5), 736–743. <https://doi.org/10.1134/S0018151X11050063>.
 22. Zhukov M. F., Zasyplin I. M. (2007) *Thermal Plasma Torches: Design, Characteristics and Applications*. UK, Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 596.
 23. Oh S. Y., Yun S., Kim J. K. (2018) Process Integration and Design for Maximizing Energy Efficiency of a Coal Fired Power Plant Integrated with Amine-Based CO₂ Capture Process. *Applied Energy*, 216, 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.100>.
 24. *NIST Chemistry WebBook*. Available at: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74828&Units=SI&Mask=1#Thermo-Gas>.
 25. Zhou T., Francois B. (2009) Modeling and Control Design of Hydrogen Production Process for an Active Hydrogen/Wind Hybrid Power System. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (1), 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.030>.
 26. *Wastes of Manufacturing of Polyethylene Products*. Available at: <https://www.wastecation.ru/code/33521000000> (in Russian).
 27. Tsiamis D. A., Castaldi M. J. (2016) *The Effects of Non-Recycled Plastics (NRP) on Gasification: a Quantitative Assessment*. Technical Report. Earth Engineering Center, City College, City University of New York, NY, 42.
 28. Walters R. N., Hackett S. M., Lyon R. E. (2000) Heats of Combustion of High Temperature Polymers. *Fire and Materials*, 24 (5), 245–252. [https://doi.org/10.1002/1099-1018\(200009/10\)24:5<245::aid-fam744>3.0.co;2-7](https://doi.org/10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<245::aid-fam744>3.0.co;2-7).
 29. Ng S. C., Chee K. K. (1993) Correlation Between Heat of Combustion and Chemical Structure of Polymers. *Polymer*, 34 (18), 3870–3872. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(93\)90513-A](https://doi.org/10.1016/0032-3861(93)90513-A).
 30. Grikin O. Ye., Stepanov N. F., Tatevskii V. M., Yarovoi S.S. (1971) Calculation of the Enthalpy and Entropy of Polymerization and Copolymerization Constants by the Structural-Element Contribution Method. *Polymer Science U.S.S.R*, 13 (3), 653–677. [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(71\)90031-1](https://doi.org/10.1016/0032-3950(71)90031-1).
 31. Splitsto P. L., Johnson W. H. (1974) The Enthalpies of Combustion and Formation of Linear Polyethylene. *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A. Physics and Chemistry*, 78A (5), 611–616. <https://doi.org/10.6028/jres.078A.038>.
 32. Kashiwagi T., Harris R. H., Zhang X., Briber R. M., Cipriano B. H., Raghavan S. R., Awad W. H., Shields J. R. (2004) Flame Retardant Mechanism of Polyamide 6–Clay Nanocomposites. *Polymer*, 45 (3), 881–891. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2003.11.036>.
 33. Ur'yash V. F., Larina V. N., Kokurina N. Yu., Novoselova N. V. (2010) The Thermochemical Characteristics of Cellulose and its Mixtures with Water. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 84 (6), 915–921. <https://doi.org/10.1134/S0036024410060051>.
 34. Blokhin A. V., Voitkevich O. V., Kabo G. J., Paulechka U. U., Shishonok M. V., Kabo A. G., Simirsky V. V. (2011) Thermodynamic Properties of Plant Biomass Components. Heat Capacity, Combustion Energy, and Gasification Equilibria of Cellulose. *Journal of Chemical Engineering Data*, 56, 3523–3531. <https://doi.org/10.1021/je200270t>.
 35. Demirbaş A. (2005) Estimating of Structural Composition of Wood and Non-Wood Biomass Samples. *Energy Sources*, 27 (8), 761–767. <https://doi.org/10.1080/00908310490450971>.
 36. Ioelovich M. (2018) Energy Potential of Natural, Synthetic Polymers and Waste Materials – a Review. *Academic Journal of Polymer Science*, 1 (1), 1–15. <https://doi.org/10.19080/AJOP.2018.01.555553>.
 37. Jessup R. S., Prosen E. (1950) Heats of Combustion and Formation of Cellulose and Nitrocellulose (Cellulose Nitrate). *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 44 (4), 387–393. <https://doi.org/10.6028/jres.044.034>.
 38. Zhang Y., Li B., Li H., Liu H. (2011) Thermodynamic Evaluation of Biomass Gasification with Air in Autothermal Gasifiers. *Thermochimica Acta*, 519 (1–2), 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.005>.

Received: 23.04.2021

Accepted: 24.06.2021

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-399-404>

УДК 620.10

Теоретический анализ перемещений тонких стержней изогнутой формы

Канд. техн. наук, доц. В. П. Луговой¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Приведен сравнительный анализ перемещений изогнутых стержней различных форм кривизны, которые могут быть применены в качестве инструментов для ультразвуковой обработки отверстий в хрупких материалах. Традиционная обработка отверстий ультразвуковым способом основана на использовании прямолинейных стержней: у них амплитуда перемещений на рабочем (свободном) конце соответствует величине перемещений в точке его присоединения к концентратору ультразвуковых колебаний. Дополнение конфигурации прямого стержня криволинейной формой в виде дуги окружности или спирали, скрученной на один виток, позволит получить дополнительные перемещения, вызванные упругими свойствами участка с изогнутой формой. Рассмотрено несколько расчетных схем криволинейного стержня, ограниченного углами φ , равными $\pi/2$, π и 2π , с различным направлением действия внешней силы. Полученные результаты показали, что увеличение угла дуги окружности приводит к соответствующему повышению показателя упругого перемещения свободного конца стержня. В этом случае суммарные перемещения свободного конца стержня будут складываться из перемещений, вызванных колебаниями акустической системы, и перемещений криволинейного тонкого стержня от внешней силы. Расчетами установлено, что на величину упругих перемещений криволинейных стержней влияют форма и величина угла, направление внешней силы, радиус кривизны, жесткость поперечного сечения. Рассмотренные схемы тонких стержней с криволинейными участками могут найти практическое применение в ультразвуковых колебательных системах для обработки отверстий малого диаметра в хрупких материалах. При этом увеличивается интенсивность колебаний инструмента и повышается производительность процесса.

Ключевые слова: упругие перемещения, колебания, стержни изогнутой формы, расчет, ультразвуковая обработка отверстий

Для цитирования: Луговой, В. П. Теоретический анализ перемещений тонких стержней изогнутой формы / В. П. Луговой // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 399–404. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-399-404>

Theoretical Analysis of Thin Curved Rod Displacements

V. P. Lugovoi¹⁾

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

Abstract. The paper presents a comparative theoretical analysis of the movements of the curved rods of various curvature forms, which can be applied as tools for ultrasonic treatment of holes in fragile materials. It has been shown that the traditional processing of holes by an ultrasonic method is based on the use of straight rods, in which the amplitudes of displacements on the working – free end corresponds to the value of displacements at the point of its attachment to the ultrasonic oscillation concentrator. Supplementing the configuration of a straight rod with a curvilinear shape in the form of a circular arc or a spiral twisted by one turn will allow obtaining additional displacements caused by the elastic properties of a section with a curved shape. The paper considers several calculated schemes of a curvilinear rod bounded by angles φ equal to $\pi/2$, π and 2π ,

Адрес для переписки

Луговой Вячеслав Петрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-01
Vlugovoj@bntu.by

Address for correspondence

Lugovoi Vjacheslav P.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-01
Vlugovoj@bntu.by

with a different direction of the external force action. The obtained results have shown that an increase in the circular arc angle leads to a corresponding increase in the elastic displacement index of the rod free end. In this case, the total displacements of the rod free end will be made from displacements caused by vibrations of the acoustic system and the displacements of a curved thin rod from an external force. Calculations have established that the magnitude of the elastic displacements of curved rods is influenced by the shape and magnitude of the angle, the direction of the external force, the radius of curvature, the rigidity of the cross section. The considered schemes of thin rods with curvilinear sections can find practical application in ultrasonic oscillatory systems for processing small-diameter holes in fragile materials. This increases the intensity of tool oscillations and improves the process performance.

Keywords: elastic displacements, oscillations, rods of curved shape, calculation, ultrasonic processing of holes

For citation: Lugovoi V. P. (2021) Theoretical Analysis of Thin Curved Rod Displacements. *Science and Technique*. 20 (5), 399–404. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-399-404> (in Russian)

Введение

Традиционное прошивание (так называемое сверление) хрупких материалов осуществляется ультразвуковым способом с использованием акустической системы (рис. 1), которая состоит из пьезокерамического преобразователя электрических сигналов в механические колебания, усилителя колебаний (т. е. конусного концентратора колебаний) и инструмента в виде прямолинейного стержня (тонкой упругой проволоки).



Рис. 1. Акустическая система для ультразвуковой обработки отверстий

Fig. 1. Acoustic system for ultrasound-processed holes

Основными технологическими показателями механической обработки являются производительность и точность размеров отверстия. Производительность ультразвуковой обработки зависит от акустических и технологических факторов. К акустическим факторам относятся частота, амплитуда и тип колебаний, а к технологическим – род материала заготовки и инструмента, скорость относительного перемещения, усилие прижима инструмента, вид и размер абразивных зерен, концентрация абразива в суспензии, глубина обработки и условия сменяемости абразива. Многие из этих факторов находятся в тесной взаимосвязи. Теоретически производительность обработки при неизменной частоте колебаний инструмента можно оценить [1, 2] по формуле

$$Q = \psi (u_0^2 P_{cm})^a f^b, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и абразивной жидкости; u_0 – амплитуда колебаний, мкм; P_{cm} – сила подачи, Н; f – частота, Гц; a, b – показатель степени, зависящий от условий обработки, $a = 0,5-1,0$, $b = 0,5-1,0$.

Из (1) видно, что решающим фактором, обеспечивающим повышение производительности обработки, является амплитуда колебаний, и потому способы повышения интенсивности колебаний за счет ее усиления имеют теоретический и практический интерес. Один из таких способов заключается в использовании потенциальной энергии упругих элементов, к которым можно отнести тонкие криволинейные стержни. Перемещение свободного конца прямого инструмента соответствует амплитуде ультразвуковых колебаний на рабочем торце концентратора, т. е. $u_0 = a \cos \omega t$.

Из формулы (1) следует, что высокая производительность ультразвуковой обработки при неизменной частоте колебаний может быть достигнута увеличением амплитуды колебаний. Эта цель достигается различными способами, к числу которых, кроме перечисленных ранее факторов, следует отнести конструктивное изменение инструмента. Один из таких способов – использование инструментов с упругими свойствами, выполняющих функцию накопителей потенциальной энергии. Упругими считаются различные элементы машин и приборов, способные существенно деформироваться под действием внешних сил и восстанавливать свои размеры [3, 4]. Они разделяются на стержневые элементы, полученные из проволоки или ленты, и оболочковые, выполненные из листо-

вого материала. Теоретическому исследованию колебаний упругих тел посвящены работы П. Пфейффера [5], С. П. Тимошенко [6], Г. С. Писаренко [7, 8].

Сегодня наиболее известны упругие элементы в виде деталей первой группы: либо в качестве промежуточного трансформатора колебаний, либо в виде упругого инструмента акустических систем. К элементам первой группы относятся упругие кольца с переменным сечением, выполняющие одновременно функцию резонатора усилителя ультразвуковых колебаний акустических систем [4]. Примером могут служить устройство и способ обработки хрупких материалов с кольцевым концентратором [5, 9, 10], который обеспечивает повышение производительности прошивания отверстий в хрупких материалах различной твердости в два и более раз по сравнению с традиционным методом ультразвуковой обработки. К упругим элементам второй группы можно отнести спиральную полосу, винтовую пружину, упругое кольцо и пр.

Сравнительный расчет перемещений криволинейных стержней

Изучим возможность применения криволинейного упругого стержня с постоянным поперечным сечением, выполненного из пружинной проволоки, в качестве инструмента для прошивания отверстий. Для сравнения величин перемещений свободного конца стержня рассмотрим две расчетные схемы перемещений криволинейного и Г-образного стержней (рис. 2).

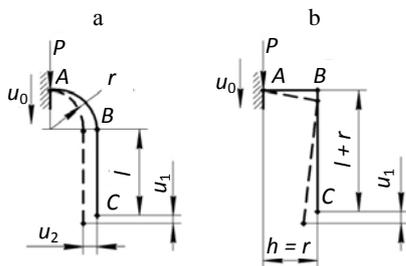


Рис. 2. Схемы перемещений криволинейного и Г-образного стержней

Fig. 2. Movement diagram of curved neuro and Г-shaped rods

Стержни образованы из двух частей: из изогнутой поперечной части *AB* и продольного стержня *BC*. Изогнутая часть выполнена в виде

квадранта окружности с постоянным радиусом *r*. Присоединенный к источнику ультразвуковых колебаний упругий элемент получает кинематическое возбуждение вынужденных гармонических плоскопараллельных колебаний (перемещений) в точке *A* величиной $u_0 = a \cos \omega t$.

Свободный конец стержня в точке *C* получает упругое перемещение u_1 от действия силы *P*. Сделаем допущение о том, что прямолинейный участок в процессе колебаний не изменяет своей первоначальной длины *l*, т. е. вертикальные перемещения прямолинейного участка в точках *B* и *C* будут одинаковыми. В этом случае перемещение свободного конца стержня равняется сумме перемещений от кинематического возбуждения u_0 и упругих перемещений u_1 [7], вызванных действием силы *P*

$$u = u_0 + u_1. \quad (2)$$

Рассмотрим первую схему криволинейного стержня на участке *AB* (рис. 3).

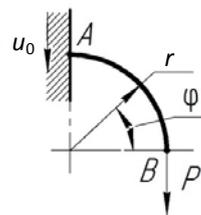


Рис. 3. Расчетная схема криволинейного стержня
Fig. 3. Calculated scheme of curvilinear rod

Каноническое уравнение из условия равенства нулю угла поворота в точке *A* имеет вид [3]

$$X_1 \delta_{11} + \delta_{1P} = 0,$$

где $X_1 \delta_{11}$ – взаимный угол поворота под действие момента X_1 ; δ_{11} , δ_{1P} – взаимный угол поворота под действием единичных моментов и внешних сил, которые можно найти с помощью интеграла Мора:

$$\delta_{11} = \int \frac{M_1^2}{EI} ds; \quad \delta_{1P} = \int \frac{M_P M_1}{EI} ds. \quad (3)$$

Изгибающие моменты M_P и M_1 от действия внешней и единичной сил запишутся в виде:

$$M_P = Pr(1 - \cos \varphi); \quad M_1 = -1, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi/2.$$

Тогда:

$$\delta_{1P} = \frac{1}{EI} \int_0^{\pi/2} [Pr(1 - \cos \varphi)(-1)] r d\varphi = \frac{Pr^2}{EI} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right);$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \int_0^{\pi/2} r d\varphi = \frac{r}{EI} \frac{\pi}{2}.$$

Находим неизвестный момент

$$X_1 = -\frac{\delta_{11}}{\delta_{1P}} = Pr \left(1 - \frac{\pi}{2}\right) \approx 0,36Pr.$$

Суммарный изгибающий момент

$$M = M_p + X_1 M_1 = Pr(0,64 - \cos\varphi).$$

В произвольном сечении изгибающий момент при $P = 1$ определится из уравнения

$$M = r(0,64 - \cos\varphi).$$

Вычислив интеграл Мора, получим перемещение в точке

$$\begin{aligned} u_1 &= \int \frac{M_p M_1}{EI} ds = \\ &= \int_0^{\pi/2} \frac{Pr^3}{EI} (0,64 - \cos\varphi)^2 d\varphi = \frac{Pr^3}{EI}. \end{aligned} \quad (4)$$

Как видно из формулы (4), основным параметром, влияющим на величину упругого перемещения свободного конца стержня, является радиус кривизны изогнутой части AB . Увеличению значения перемещения способствует также уменьшение показателя жесткости поперечного сечения стержня EI .

Для сравнения полученных результатов рассмотрим идентичную расчетную схему Г-образного стержня, изогнутого под прямым углом (рис. 2b). Длину плеча на горизонтальном участке примем равной радиусу кривизны изогнутого стержня радиусом $h = r$, а длину вертикального участка $(l + r)$. Величину перемещения на конце горизонтального участка вычисляем по формуле [8]

$$u'_1 \approx 0,1 \frac{Pr^3}{EI}. \quad (5)$$

Сравнение уравнений (4) и (5) позволяет сделать вывод, что криволинейный стержень дает возможность получить сравнительно большее перемещение свободного конца, чем изогнутый стержень второго типа.

Для визуальной оценки и сравнения интенсивности колебаний рассмотренных схем про-

ведены эксперименты с использованием изогнутой пружинной проволоки, изготовленной из стали марки 65Г, с круглым поперечным сечением диаметром 1 мм. Косвенную оценку интенсивности перемещений в криволинейных стержнях при возбуждении ультразвуковых колебаний дают фигуры Хладни. Для этой цели в проволоке, присоединенной к коническому волноводу ультразвукового преобразователя, возбуждались ультразвуковые колебания частотой 21 кГц. При этом стоячие волны регистрируются на колеблющейся пластине с обсыпанным мелким порошком. В результате порошок смещается из пучностей колебаний с наибольшей амплитудой колебаний в узлы, где колебания отсутствуют. На рис. 4а приведена фотография фигуры Хладни, образованной Г-образным стержнем, а на рис. 4б – образованной криволинейными стержнями с различными радиусами кривизны.

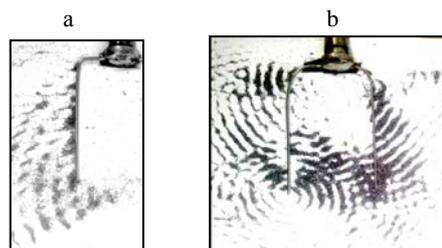


Рис. 4. Фотографии фигур Хладни, полученные при колебании стержней: а – криволинейной и Г-образной форм; б – с различными радиусами кривизны

Fig. 4. Photos of Chladni figures, obtained when rods vibrate: а – curvilinear and Г-shaped forms; б – with different radii of curvature

Из рис. 4 видно, что криволинейные элементы вызывают более интенсивные колебания, чем прямолинейные. Причем увеличение радиуса кривизны сопровождается гораздо большими перемещениями свободного конца стержня (рис. 4b).

На рис. 5 приведены схемы с двумя различными положениями криволинейного стержня с углом $\varphi \leq \pi$. Вертикальное перемещение конца криволинейного стержня (в точке B) можно определить, выполнив интеграл Мора. Найдем перемещение точки B для расчетной схемы (рис. 5а), подставив величины изгибающих моментов от действия внешней и единичной сил для угла $0 \leq \varphi \leq \pi$ в интеграл Мора:

$$M_p = -Pr \sin \varphi; \quad M_1 = (-1)r \sin \varphi;$$

$$u_1 = \int \frac{M_p M_1}{EI} ds = \frac{1}{EI} \int_0^\pi \frac{Pr^3}{EI} \sin^2 d\varphi = \frac{Pr^3}{EI} \frac{\pi}{2} = 1,58 \frac{Pr^3}{EI}. \quad (6)$$

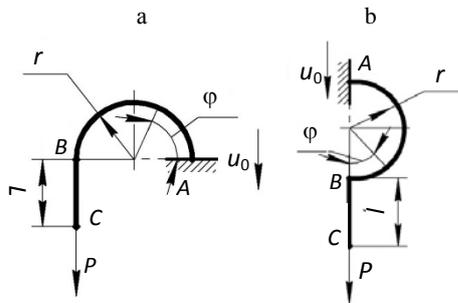


Рис. 5. Схемы криволинейных стержней в форме дуги полуокружности
Fig. 5. Schemes of curvilinear rods in the form of semicircle arc

Для криволинейного стержня, показанного на рис. 5b, изгибающие моменты от сил:

$$M_p = Pr \sin \varphi; \quad M_1 = r(1 - \cos \varphi) \quad (0 \leq \varphi \leq \pi).$$

Вычислив интеграл Мора, определим величину вертикального перемещения в точке B

$$u_1 = \int \frac{M_p M_1}{EI} ds = \frac{1}{EI} \int_0^\pi (Pr \sin \varphi)(1 - \cos \varphi) ds = \frac{Pr^3}{EI} \left(1 - \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \right).$$

При $\varphi = \pi$ получим

$$u_1 = 2 \frac{Pr^3}{EI}. \quad (7)$$

На фотографиях рис. 6 демонстрируются фигуры Хладни, полученные для приведенных выше вариантов. В первом случае зона с наиболее интенсивными колебаниями расположена по периметру криволинейного участка, а во втором – колебания концентрируются на свободном конце стержня.

Рассмотрим еще один вариант схемы с криволинейным стержнем, ограниченным углом $\varphi \leq 2\pi$, который имеет форму незамкнутого кольца, т. е. пружины с одним витком (рис. 7а).



Рис. 6. Фигуры Хладни ($\varphi = \pi$)
Fig. 6. Chladni figures ($\varphi = \pi$)

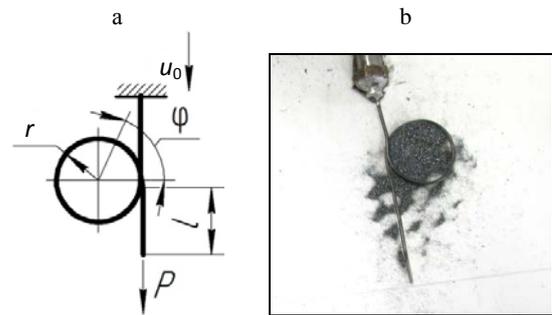


Рис. 7. Незамкнутое кольцо:
а – расчетная схема; б – фигура Хладни
Fig. 7. Open ring:
a – calculated scheme; b – Chladni figure

Подставим в интеграл Мора величины изгибающих моментов от действия внешней и единичной сил $M_p = Pr(1 - \cos \varphi)$ и $M_{p1} = 1r \sin \varphi$ ($0 \leq \varphi \leq \pi$)

$$u_1 = \int \frac{M_p M_1}{EI} ds = \frac{Pr^3}{EI} \int_0^\pi (1 - \cos \varphi)^2 d\varphi = \frac{1}{2} (3\varphi - 4 \sin \varphi + \sin \varphi \cos \varphi). \quad (8)$$

Вертикальное перемещение свободного конца пружинного кольца, изогнутого на угол $\varphi = 2\pi$, определится из выражения

$$u_1 \approx 9,4 \frac{Pr^3}{EI}. \quad (9)$$

Таким образом, теоретически показано, что при действии статической силы наибольшие упругие перемещения свободного конца криволинейного стержня можно получить по схеме, представленной на рис. 7а. Однако следует учесть, что упругие перемещения спиральной пружины сопровождаются одновременными радиальными перемещениями, которые

при расчете не были учтены. Фигуры Хладни при наложении ультразвуковых колебаний к закрученной спирали показаны на рис. 7b. Можно полагать, что мода и величина упругих перемещений свободного конца стержня, закрученного в пружинную спираль, в диапазоне ультразвуковых частот имеют сложный характер и зависят от ряда дополнительных факторов (длины прямолинейных участков до и после спирали, резонансных размеров спирали и пр.), которые требуют подтверждения экспериментальными исследованиями.

ВЫВОДЫ

1. Теоретически показано, что использование тонких криволинейных стержней различных типов позволяет получить перемещение свободного конца в условиях колебаний благодаря упругим свойствам их изогнутой части.

2. Установлено, что на величину этих упругих перемещений оказывают влияние угол и радиус кривизны криволинейного участка, направление действия внешней силы, а также жесткость поперечного сечения стержня.

3. Рассмотренные модели криволинейных стержней могут быть успешно применены в ультразвуковых системах для повышения производительности сверления (прошивания) отверстий малого диаметра в хрупких материалах (камнях, стекле, керамике и пр.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков, А. И. Ультразвуковое алмазное сверление и фрезерование хрупких неметаллических материалов / А. И. Марков, И. Д. Устинов. М.: Машиностроение, 1979. 39 с.
2. Амитан, Г. Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон. Л.: Машиностроение, 1988. 719 с.
3. Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.
4. Ананьев, И. В. Колебания упругих систем в авиационных конструкциях и их демпфирование / И. В. Ананьев, П. Г. Тимофеев. М.: Машиностроение, 1965. 240 с.
5. Пфейффер, П. Колебания упругих тел / П. Пфейффер; пер. с нем. А. И. Лурье. Л.: Госуд. техн.-теор. изд-во ОНТИ, 1934. 154 с.
6. Тимошенко, С. П. Сопrotивление материалов. Т. 1. Элементарная теория и задачи / С. П. Тимошенко; пер. с англ. М.: Наука, 1965. 364 с.
7. Писаренко, Г. С. Колебания кинематически возбуждаемых механических систем с учетом диссипации энергии / Г. С. Писаренко, О. Е. Богинич. Киев: Наукова думка, 1982. 220 с.

8. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. 2-е изд. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.
9. Компьютерное моделирование и анализ колебаний кольцевого концентратора ультразвуковой системы / В. П. Луговой [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 220–227. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-220-227>.
10. Луговой, В. П. Прошивание отверстий в ювелирных камнях с использованием ультразвуковых систем с кольцевыми концентраторами / В. П. Луговой, В. Т. Минченя, И. В. Луговой // Дизайн. Теория. Практика. М.: МГУПИ, 2015. Вып. 22. С. 36.

Поступила 12.05.2021

Подписана в печать 27.07.2021

Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. Markov A. I., Ustinov I. D. (1979) *Ultrasonic Diamond Drilling and Milling of Hard Non-Metallic Materials with Diamond Tools*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 39 (in Russian).
2. Amitan G. L., Baisupov I. A., Baron Yu. M. (1988) *Handbook on Electrochemical and Electrophysical Processing Methods*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 719 (in Russian).
3. Andreeva L. E. (1981) *Elastic Elements of Devices*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 392 (in Russian).
4. Ananyiev I. V., Timofeev P. G. (1965) *Oscillations of Elastic Systems in Aircraft Structures and their Damping*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).
5. Pfeiffer P. (1934) *Oscillations of Elastic Bodies*. Leningrad, State Technical and Theoretical Publishing House ONTI. 154 (in Russian).
6. Timoshenko S. P. (1965) *Strength of Materials. Vol. 1. Elementary Theory and Tasks*. Moscow, Nauka Publ. 364 (in Russian).
7. Pisarenko G. S., Boginich O. E. (1982) *Oscillations of Kinematical Excited Mechanical Systems with Regard to Energy Dissipation*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 220 (in Russian).
8. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. (1988) *Materials Resistance Handbook*. 2nd ed. Kiev, Naukova Dumka Publ. 736 (in Russian).
9. Lugovoi V. P., Pronkevich S. A., Lugovoi I. V., Dovnar S. S. (2018) Computer Modeling and Analysis of Vibrations in Annular Concentrator of Ultrasonic System. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (3), 220–227. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-220-227> (in Russian).
10. Lugovoi V. P., Minchenya V. T., Lugovoi I. V. Piercing Holes in Jewelry Stones Using Ultrasonic Systems with Ring Concentrators. *Dizain. Teoriya. Praktika* [Design. Theory. Practice]. Moscow, Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, (22), 36 (in Russian).

Received: 12.05.2021

Accepted: 27.07.2021

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-405-409>

УДК 539.3

К решению контактной задачи для упругой полуполосы

Докт. техн. наук, проф. С. В. Босаков¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Контактные задачи для упругой полосы достаточно хорошо исследованы и освещены в отечественной научной литературе. Отчасти это вызвано тем, что в нормативных документах по фундаментостроению рекомендуется использовать эту модель упругого основания для моделирования системы «сооружение – фундамент – грунтовое основание». Обычно рассматриваются два варианта граничных условий на контакте полуполосы с жестким недеформируемым основанием. Первое граничное условие обращает в нуль вертикальные перемещения и касательные напряжения, второе – вертикальные и горизонтальные перемещения. Значительно менее исследованы контактные задачи для упругой полуполосы. В статье рассмотрена эта контактная задача при выполнении первого граничного условия обращения в нуль вертикальных перемещений и касательных напряжений на контакте полуполосы с жестким недеформируемым основанием. При проведении расчетов в традиционной постановке без учета касательных напряжений в контактной зоне используется способ Б. Н. Жемочкина, который сводит решение контактной задачи механики твердого деформируемого тела к решению статически неопределимой задачи смешанным методом строительной механики. Поэтому вначале найдены перемещения верхней грани полуполосы от равномерно распределенной по участку грани единичной нагрузки. Полученное выражение используется для составления системы уравнений способа Жемочкина. Рассмотрен случай поступательного перемещения штампа, приводится график распределения контактных напряжений под подошвой штампа.

Ключевые слова: контактная задача, штамп, способ Жемочкина, полуполоса

Для цитирования: Босаков, С. В. К решению контактной задачи для упругой полуполосы / С. В. Босаков // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 405–409. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-405-409>

To Solution of Contact Problem for Elastic Half-Strip

S. V. Bosakov¹⁾

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

Abstract. Contact problems for elastic stripes have been well studied and published in domestic scientific literature. This is partly due to the fact that normative documents on the foundation structure it is recommended to use this elastic foundation model for simulation of a “structure – foundation – soil foundation” system. Two variants of boundary conditions at the contact between a half-strip and a rigid non-deformable base are usually considered. The first boundary condition nullifies the vertical displacements and tangential stresses, the second one nullifies vertical and horizontal displacements. Contact problems for an elastic half-strip are much less investigated. The paper considers this contact problem when the first boundary condition for zeroing of vertical displacements and tangential stresses at the contact of a half-strip with a rigid, non-deformable base. When performing calculations in the traditional formulation without taking into account tangential stresses in the contact zone, the Zhemochkin method has been used, which reduces the solution of the contact problem of solid mechanics to the solution of a statically indeterminate problem by the mixed method of structural mechanics. Therefore, at first, we have found the displacements of the upper edge of the half-strip from the unit load uniformly distributed over the edge section. The resulting expression is used to compose a system of equations for the Zhemochkin method. The case

Адрес для переписки

Босаков Сергей Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-04
sevibo@yahoo.com

Address for correspondence

Bosakov Siarhei V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-04
sevibo@yahoo.com

of translational displacement of the die has been considered, and the graph of contact stress distribution under the die's sole has been given in the paper.

Keywords: contact problem, stamp, Zhemochkin method, half-strip

For citation: Bosakov S. V. (2021) To Solution of Contact Problem for Elastic Half-Strip. *Science and Technique*. 20 (5), 405–409. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-405-409> (in Russian)

Контактные задачи для упругой полосы при различных условиях ее опирания решены разными авторами [1–4]. Однако крайне ограничено число опубликованных работ по решению задач для упругой полуполосы при различных граничных условиях на ее торце и продольных гранях [5, 6]. Работы по решению контактных задач для упругой полуполосы также немногочисленны [7, 8]. Автор статьи предлагает решение контактной задачи для упругой полуполосы при загрузке ее продольной грани штампом с плоской подошвой (рис. 1).

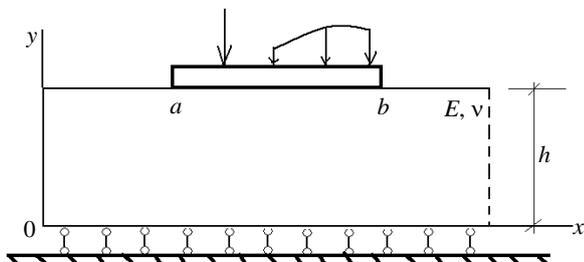


Рис. 1. Штамп на упругой полуполосе под действием вертикальной нагрузки

Fig. 1. Stamp on elastic half-strip under vertical load

Принимаем условие, что на контакте полуполосы и жесткого основания отсутствуют вертикальные перемещения и касательные напряжения. Вначале рассмотрим решение вспомогательной задачи при действии на полуполосу равномерно распределенной по участку (0, b) нагрузки q (рис. 2).

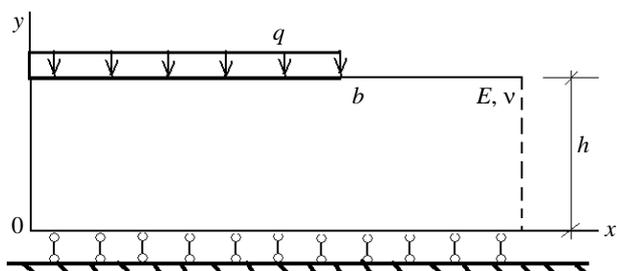


Рис. 2. Действие равномерно распределенной нагрузки на верхнюю грань полуполосы

Fig. 2. Action of uniformly distributed load on upper edge of half-strip

Очевидно, что перемещения грани полуполосы $y = h$ от действия этой нагрузки будут равны перемещениям грани полосы $y = h$ от действия равномерно распределенной нагрузки q на участке $(-b, b)$ (рис. 3) за вычетом перемещений той грани от действия самоуравновешенной нормальной нагрузки, приложенной к торцу полуполосы, и вызванных действием на полосу равномерно распределенной нагрузки q на участке $(-b, b)$.

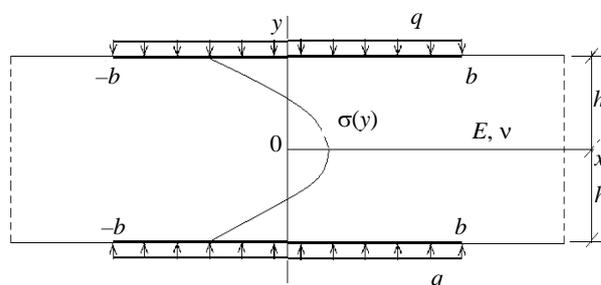


Рис. 3. Действие симметричной нагрузки на полосу

Fig. 3. Symmetrical load action on strip

Выражение для самоуравновешенной торцевой нагрузки получено на основании результатов расчетов Я. С. Уфлянда [9]

$$\sigma_x(y) = \frac{4q}{\pi} \int_0^\infty \frac{\mu \operatorname{ch} \mu - \mu \frac{y}{h} \operatorname{sh} \mu \operatorname{ch} \mu \frac{y}{h} - \operatorname{sh} \mu \operatorname{ch} \mu \frac{y}{h}}{\operatorname{sh} 2\mu + 2\mu} \times \sin \mu \frac{b}{h} d\mu \quad (1)$$

Нетрудно проверить, что

$$\int_{-h}^h \sigma_x(y) dy = 0. \quad (2)$$

Функцию напряжений для расчета полосы с торцевой самоуравновешенной нагрузкой примем в виде [10]

$$\Phi(x, y) = \sum_{m=1}^\infty \frac{A_m \pm iB_m}{(-a_m \pm ib_m)^2} e^{\frac{(-a_m \pm ib_m)x}{h}} \quad (3)$$

$$\times \left[\begin{array}{c} -\operatorname{tg}(-a_m \pm ib_m) \cos\left(\frac{-a_m \pm ib_m}{h} y\right) + \\ + \frac{y}{h} \sin\left(\frac{-a_m \pm ib_m}{h} y\right) \end{array} \right],$$

где a_m, b_m – корни уравнения

$$2(a_m + ib_m) + \sin(2a_m + 2ib_m) = 0. \quad (4)$$

Численные значения a_m, b_m приведены в [8, 9]. При выполнении (4) статические краевые условия на продольных гранях $y = h$ полуполосы автоматически выполняются. Выполнение граничных условий на торце полуполосы при $x = 0$ приводит к двум уравнениям:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = -\frac{4q}{\pi} \int_0^\infty \frac{\mu \operatorname{ch} \mu - \mu \frac{y}{h} \operatorname{sh} \mu \operatorname{sh} \mu \frac{y}{h} - \operatorname{sh} \mu \operatorname{ch} \mu \frac{y}{h}}{\operatorname{sh} 2\mu + 2\mu} \times \frac{\sin \mu \frac{b}{h} d\mu}{\mu}; \quad \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} = 0. \quad (5)$$

Умножаем обе части первого уравнения (5) на $\cos n\pi \frac{y}{h} dy$ и интегрируем по y в пределах $(-h, h)$. Второе уравнение (5) умножаем на $\sin n\pi \frac{y}{h} dy$ и интегрируем по y в пределах $(-h, h)$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). При этом поменяем очередность интегрирования и используем интеграл

$$\int_{-h}^h \left(\mu \operatorname{ch} \mu - \mu \frac{y}{h} \operatorname{sh} \mu \operatorname{sh} \mu \frac{y}{h} - \operatorname{sh} \mu \operatorname{ch} \mu \frac{y}{h} \right) \frac{y}{h} \cos n\pi \frac{y}{h} dy = 4(-1)^n \pi^2 \frac{\mu \operatorname{sh} \mu}{(n^2 \pi^2 + \mu^2)^2}. \quad (6)$$

Для вычисления несобственного интеграла

$$\int_0^\infty \frac{\mu \operatorname{ch} \mu - \mu \frac{y}{h} \operatorname{sh} \mu \operatorname{sh} \mu \frac{y}{h} - \operatorname{sh} \mu \operatorname{ch} \mu \frac{y}{h}}{\operatorname{sh} 2\mu + 2\mu} \times \frac{\sin \mu \frac{b}{h} d\mu}{\mu} \quad (7)$$

примем аппроксимацию [11]

$$L(\mu) = \frac{\operatorname{sh}^2 \mu}{\operatorname{sh} 2\mu + 2\mu} = \frac{1}{2} \left(1 - e^{-\mu} - \frac{1}{2} \mu e^{-2\mu} \right). \quad (8)$$

Погрешность такой аппроксимации можно оценить по графикам на рис. 4. Следует отметить, что погрешность вычисления (7) с учетом принятой аппроксимации будет меньше погрешности аппроксимации (8) в результате интегрирования как для интегральной величины.

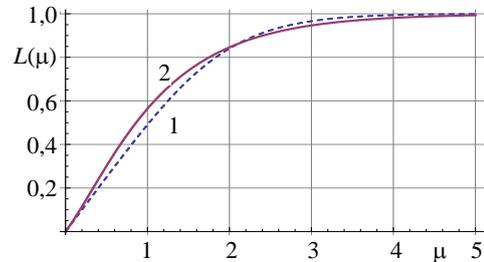


Рис. 4. Точное (1) и аппроксимированное (2) выражения для $L(\mu)$

Fig. 4. Exact (1) and approximated (2) expressions for $L(\mu)$

Представление (6) позволяет вычислить интеграл (7) и определить свободные члены системы линейных алгебраических уравнений (5), которая решалась способом усечения [12]. Таким образом определялись A_i и B_i в (3). По функции напряжений (3) определялись вертикальные перемещения $V(x)$ грани $y = h$ полуполосы от самоуравновешенной торцевой нагрузки (1).

Окончательно вертикальные перемещения грани полуполосы $y = h$ от равномерно распределенной по участку (a, b) нагрузки q определяются формулой

$$V(x) = \frac{qh(1-\nu^2)}{\pi E} \int_0^\infty L(u) \left[\sin\left(u \frac{b-x}{h}\right) - \sin\left(u \frac{a-x}{h}\right) \right] du + V_1(x), \quad (9)$$

где a, b – границы приложения равномерно распределенной нагрузки по грани полуполосы; $V_1(x)$ – громоздкое выражение, которое определяет перемещения верхней грани полуполосы от торцевой самоуравновешенной нагрузки.

При определении $V(x)$ также использовалась аппроксимация (8). На рис. 5 приведены графики вертикальных перемещений верхней грани полуполосы при некоторых положениях равномерно распределенной нагрузки на верхней грани полуполосы.

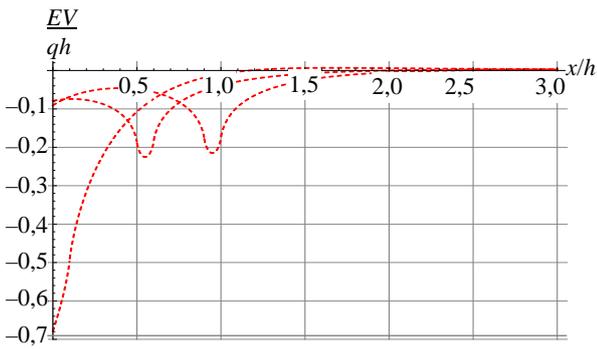


Рис. 5. Вертикальные перемещения верхней грани полуполосы при некоторых положениях равномерно распределенной по участку грани нагрузки

Fig. 5. Vertical displacements of upper edge of half-strip at some positions evenly distributed over section of load face

Рассмотрим штамп, вдавливаемый без трения вертикальной нагрузкой в верхнюю грань полуполосы (рис. 1). Ставится задача определить распределение контактных нормальных напряжений. Решим ее способом Б. Н. Жемочкина [13]. Для этого разобьем область контакта на участки равной длины и в центре каждого участка поставим жесткий стержень, через который будет осуществляться контакт штампа с полуполосой. Полученную статически неопределимую систему решаем смешанным методом строительной механики [14], приняв за неизвестные усилия в связях линейное и угловое перемещение введенного на краю штампа защемления (рис. 6).

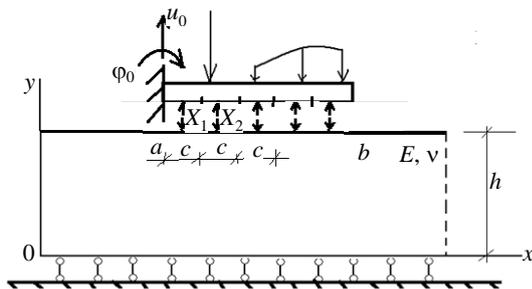


Рис. 6. Основная система смешанного метода строительной механики для расчета штампа на упругой полуполосе

Fig. 6. Basic system of mixed method on structural mechanics for die calculation on elastic half-strip

Система канонических уравнений смешанного метода строительной механики для расчета штампа имеет вид:

$$\begin{cases} \delta_{1,1}X_1 + \dots + \delta_{1,m}X_m + u_0 - \frac{c}{2}\varphi_0 = 0; \\ \dots \\ \delta_{m,1}X_1 + \dots + \delta_{m,m}X_m + u_0 - (2m-1)\frac{c}{2}\varphi_0 = 0; \quad (10) \\ -\sum_{n=1}^m X_n + R = 0; \\ \sum_{n=1}^m \frac{2n-1}{2}cX_n + Re_0 = 0, \end{cases}$$

где m – число участков Жемочкина на штампе; X_i – усилие в связи Жемочкина с номером i ; R, Re_0 – равнодействующая внешней нагрузки и ее момент относительно защемления; $\delta_{i,k}$ – перемещение центра участка Жемочкина на полуполосе с номером i от действия единичной силы, равномерно распределенной по участку с номером k .

После решения системы (10) обычными методами строительной механики определяются изгибающие моменты и поперечные силы в сечениях штампа. Особый интерес представляет случай поступательного перемещения штампа. При этом $\varphi_0 = 0$ и в системе (10) пропадают последний столбец и последняя строка. Величина расстояния от защемления до точки приложения равнодействующей, вызывающей поступательное перемещение штампа, определится из формулы

$$e = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^m X_n \frac{2n-1}{2}c. \quad (11)$$

На рис. 7 приведен график распределения контактных напряжений под штампом при его поступательном перемещении при $a = 0$ и $b = h$. Также получено $e = 0,6539h$. При расчете штамп разбивался на десять участков.

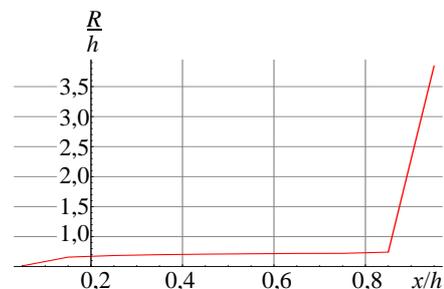


Рис. 7. Распределение контактных напряжений под штампом при его поступательном перемещении

Fig. 7. Distribution of contact stresses under stamp during its translational movement

ВЫВОД

Предложена несложная методика расчета штампа на упругой полуполосе. Она основана на способе Б. Н. Жемочкина и позволяет рассчитывать также балки конечной жесткости, расположенные на упругой полуполосе. Для этого в выражениях для коэффициентов и свободных членов системы (10) необходимо добавить слагаемые, учитывающее изгибную жесткость балки [13]. Полученные результаты могут найти применение в машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие теории контактных задач в СССР / под ред. Л. А. Галина. М.: Наука, 1976. 496 с.
2. Ворович, И. И. Неклассические смешанные задачи теории упругости / И. И. Ворович, В. М. Александров, В. А. Бабешко. М.: Наука, 1979. 222 с.
3. Александров, В. М. Некоторые задачи о действии двух штампов на упругую полосу / В. М. Александров, В. А. Кучеров // Инженерный журнал. Механика твердого тела. 1968. № 4. С. 110–123.
4. Попов, Г. Я. Контактные задачи для линейно-деформируемого основания / Г. Я. Попов. Киев; Одесса: Вища шк., 1982. 168 с.
5. Гомилко, А. М. Метод однородных решений в смешанной задаче для полуполосы / А. М. Гомилко, В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко // Прикладная механика. 1990. Т. 26, № 2. С. 98–108.
6. Гомилко, А. М. О методах однородных решений и суперпозиции в статических граничных задачах для упругой полуполосы / А. М. Гомилко, В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко // Прикладная механика. 1986. Т. 22, № 8. С. 84–98.
7. Бородачев, Н. М. Плоская контактная задача для упругого тела конечной ширины / Н. М. Бородачев // Известия АН СССР. Отделение технических наук. Механика и машиностроение. 1962. № 6. С. 170–172.
8. Босаков, С. В. Контактная задача для упругой полуполосы / С. В. Босаков // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1997. № 4. С. 119–121.
9. Уфлянд, Я. С. Интегральные преобразования в теории упругости / Я. С. Уфлянд. Л.: Наука, 1968. 402 с.
10. Gaudon, F. A. Generalized Plane Stress in a Semi-Infinite Strip under Arbitrary End – Load / F. A. Gaudon, W. M. Shepeterd // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1964. Vol. 281, No 01385. P. 184–206. <https://doi.org/10.1098/rspa.1964.0177>.
11. Босаков, С. В. Две контактные задачи о вдавливании кольцевого штампа в упругий слой / С. В. Босаков // Проблемы вычислительной механики и прочности конструкций: сб. науч. тр. Днепр: Лира, 2019. Вып. 29. С. 9–16.
12. Канторович, Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. А. Крылов. М.; Л.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. 408 с.
13. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицин. М.: Стройиздат, 1962. 262 с.
14. Ржаницын, А. Р. Строительная механика / А. Р. Ржаницын. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.

Поступила 17.03.2021

Подписана в печать 20.05.2021

Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. Galin L. A. (ed.) (1976) *Development of the Theory of Contact Problems in the USSR*. Moscow, Nauka Publ. 496 (in Russian).
2. Vorovich I. I., Aleksandrov V. M., Babeshko V. A. (1979) *Nonclassical Mixed Problems of Elasticity Theory*. Moscow, Nauka Publ. 222 (in Russian).
3. Aleksandrov V. M., Kucherov V. A. (1968) Some Problems on the Action of Two Punches on an Elastic Strip. *Inzheneryi Zhurnal. Mekhanika Tverdogo Tela = Mechanics of Solids*, (4), 110–123 (in Russian).
4. Popov G. Ya. (1982) *Contact Problems for Linearly Deformable Base*. Kiev; Odessa, Vishcha Shkola Publ. 168 (in Russian).
5. Gomilko A. M., Grinchenko V. T., Meleshko V. V. (1990) Method of Homogeneous Solutions in a Mixed Problem for a Half-Strip. *Soviet Applied Mechanics*, 26 (2), 193–202. <https://doi.org/10.1007/bf00887116>.
6. Gomilko A. M., Grinchenko V. T., Meleshko V. V. (1986) Methods of Homogeneous Solutions and Superposition in Static Boundary-Value Problems for an Elastic Half Strip. *Soviet Applied Mechanics*, 22 (8), 770–778. <https://doi.org/10.1007/bf00911331>.
7. Borodachev N. M. (1962) Plane Contact Problem for an Elastic Body of Finite Width. *Izvestiya AN SSSR. Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk. Mekhanika i Mashinostroenie* [Izvestia of the Academy of Sciences of the USSR. Department of Technical Sciences. Mechanics and Engineering], (6), 170–172 (in Russian).
8. Bosakov S. V. (1997) Contact Problem for an Elastic Half-Strip. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (4), 119–121 (in Russian).
9. Uflyand Y. S. (1968) *Integral Transformations in Elasticity Theory*. Leningrad, Nauka Publ. 402 (in Russian).
10. Gaudon F. A., Shepeterd W. M. (1964) Generalized Plane Stress in a Semi-Infinite Strip under Arbitrary End – Load. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 281 (01385), 184–206. <https://doi.org/10.1098/rspa.1964.0177>.
11. Bosakov S. V. Two Contact Problems on the Indentation of a Ring Die into an Elastic Layer. *Problemy Vychislitel'noi Mekhaniki i Prochnosti Konstruktsii: Sb. Nauchn. Trudov = Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures: Collection of Scientific Papers*. Dnipro, Lira Publ., 29, 9–16 (in Russian).
12. Kantorovich L. V., Krylov V. A. (1962) *Approximate Methods of Higher Analysis*. Moscow; Leningrad, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature. 408 (in Russian).
13. Zhemochkin B. N., Sinitsin A. P. (1962) *Practical Methods for Calculating Foundation Beams and Slabs on an Elastic Foundation*. Moscow, Stroizdat Publ. 262 (in Russian).
14. Rzhantsyn A. R. (1991) *Structural Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 439 (in Russian).

Received: 17.03.2021

Accepted: 20.05.2021

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-410-419>

УДК 628.112

Основы расчета и проектирования двухколонных двухфильтровых водозаборных скважин

Докт. техн. наук, проф. В. В. Ивашечкин¹⁾, асп. Ю. А. Медведева¹⁾,
А. Н. Кондратович¹⁾, Е. С. Сацута¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Приведен обзор известных конструкций водозаборных скважин. Предложена новая конструкция двухколонной двухфильтровой водозаборной скважины, в которой фильтры устраиваются в два яруса, что позволит повысить водозахватную способность и уменьшить скорость фильтрации на подходе к фильтрам. Это, в свою очередь, создаст условия для снижения потерь напора и уменьшения понижения в скважине, обеспечивая снижение себестоимости добываемой воды. Данная конструкция совмещает в себе одновременно рабочую и резервную скважины, находящиеся в одном буровом стволе, что повышает ее надежность, долговечность и бесперебойность подачи воды потребителю. Представлена методика расчета гидравлических параметров двухколонной двухфильтровой водозаборной скважины, которая базируется на зависимостях для расчета основных геометрических размеров при заданном проектном дебите и гидрогеологических характеристиках водоносного пласта, а также формулах для определения понижения в скважине на заданный срок эксплуатации при работе одного и двух насосов одновременно. Изложены основы проектирования скважины предлагаемой конструкции. Рассмотрен пример расчета для новой конструкции скважины взамен снизившей свой удельный дебит существующей типовой скважины.

Ключевые слова: водозаборная скважина, кольятация, водоснабжение, прифильтровая зона, тампонаж, гидродинамика

Для цитирования: Основы расчета и проектирования двухколонных двухфильтровых водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 410–419. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-410-419>

Basics of Calculation and Design of Two-Column Two-Filter Water Intake Wells

V. V. Ivashechkin¹⁾, J. A. Medvedeva¹⁾, A. N. Kondratovich¹⁾, E. S. Satsuta¹⁾

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

Abstract. The paper provides an overview of the known designs of water wells. A new design of a two-column two-filter water intake well has been also proposed, in which the filters are arranged in two tiers. This will lead to an increase in water intake capacity and will reduce the filtration rate on the approach to the filters. This, in turn, will create conditions for reducing head losses and will make it possible to reduce drawdowns in the well, ensuring a reduction in the cost of produced water. This design combines both working and reserve wells located in one borehole, which increases its reliability, durability and uninterrupted water supply to the consumer. A method for calculating the hydraulic parameters of a two-column two-filter water intake well is presented in the paper. It is based on dependencies for calculating the main geometric dimensions for a given design flow rate and hydrogeological characteristics of an aquifer, as well as formulas for determining a decrease in a well for a given period of operation when one and two pumps operate simultaneously. The basics of designing a well of the proposed design are outlined in the paper. The paper considers an example of calculation for a new well design instead of an existing typical well that has reduced its specific flow rate.

Keywords: water well, colmatation, water supply, near-filter zone, grouting, hydrodynamics

For citation: Ivashechkin V. V., Medvedeva J. A., Kondratovich A. N., Satsuta E. S. (2021) Basics of Calculation and Design of Two-Column Two-Filter Water Intake Wells. *Science and Technique*. 20 (5), 410–419. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-410-419> (in Russian)

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

Введение

Водозаборные скважины являются наиболее распространенным типом водоприемных сооружений во всем мире. Основные требования к скважине заключаются в следующем. Водоприемная ее часть должна оказывать наименьшее сопротивление при входе воды в скважину из водоносного пласта; фильтр не должен быть подвержен механической или химической коагуляции, а также должен быть устойчивым против коррозии.

Известен ряд типовых конструкций водозаборных скважин [1–3]. Конструктивно типовая скважина на воду состоит из одной эксплуатационной колонны, кондуктора, технических колонн труб, цементной защиты и фильтра. Эти элементы применяют в том или ином сочетании в зависимости от выбранного способа бурения, глубины скважины, гидрогеологических условий местности, требований эксплуатации и санитарной защиты, а также целевого назначения скважины.

При интенсивной работе водозабора фильтр скважины с течением времени начинает коагулироваться. Особенности притока воды в фильтр водозаборной скважины, связанные с неравномерностью нагрузки его водоприемной поверхности по высоте, предопределили необходимость такого конструктивного их выполнения, которое в полной мере обеспечивало бы каптаж водоносного пласта по всей мощности.

Для интенсификации водоотбора, когда требуется получить максимальную производительность в заданной точке водоносного пласта, а также выровнять нагрузку на фильтр по всей его высоте, предложена разработанная В. П. Ткаченко скважина двухколонной конструкции [4]. Недостатком данной конструкции является то, что при капитальном ремонте такой скважины невозможно извлечь и заменить ее фильтр. Поэтому в случае значительного снижения производительности, когда текущие ремонты оказываются неэффективными, эту скважину тампонируют и перебуривают, что сужает область ее применения.

Для водоснабжения могут применяться также бесфильтровые многоствольные скважины, основным конструктивным отличием которых является наличие водоприемной каверны [5, 6]. При эксплуатации бесфильтровых

скважин необходимо учитывать вероятность их временного пескования в период пуска или остановки глубинных насосов. Их нельзя устраивать при предполагаемом прогрессирующем снижении пьезометрических напоров каптируемого водоносного пласта, так как это может вызвать обрушение кровли. Кроме того, устройство бесфильтровых скважин под влиянием сработки запасов подземных вод и выноса значительных объемов пород при размыве каверны может вызвать локальные просадки поверхности земли, что является весьма неблагоприятным процессом. Все это накладывает ряд ограничений и сужает область применения таких скважин.

Срок службы скважин напрямую зависит от суммарного количества прошедшей через фильтр воды. Несмотря на применение мероприятий по регенерации фильтров, отложения накапливаются и не удаляются при обработках. Вышедшую из строя скважину тампонируют, сооружают новую, а в эксплуатируемом подземном горизонте остаются корродирующие металлоконструкции. Это указывает на недостаточную эффективность имеющихся методов регенерации и недолговечность существующих типовых конструкций скважин. Поэтому для повышения надежности и долговечности водозаборов подземных вод и обеспечения бесперебойной подачи воды потребителю часто предусматривают устройство двух водозаборных скважин – основной и резервной, работающих поочередно и благодаря этому имеющих повышенный срок службы [1].

В БНТУ разработана конструкция двухколонной двухфильтровой водозаборной скважины повышенной надежности [7]. В отличие от известных двухколонных скважин предлагаемая конструкция имеет два фильтра и способна совмещать в себе одновременно рабочую и резервную скважины, находящиеся в одном буровом стволе, что повышает ее надежность, долговечность и бесперебойность подачи воды потребителю. Применение конструкции двухствольной скважины позволяет:

– увеличить срок службы рабочей и резервной скважин за счет эффективной регенерации их фильтров, размещенных в одном буровом стволе вместе с циркуляционными трубками, которые служат для обеспечения циркуляционно-реагентной обработки;

– осуществлять бесперебойную подачу воды потребителю, имея в каждом стволе отдельный электронасосный агрегат;

– установить в скважине два насосных агрегата, которые могут иметь разную производительность, тем самым обеспечивая возможность ступенчатого регулирования;

– уменьшить площади отчуждаемых под строительство земель, так как рабочая и резервная скважины сооружаются в одной санитарной зоне;

– обеспечить снижение капиталовложений по сравнению с сооружением двух отдельно расположенных скважин (один павильон вместо двух, одна буровая площадка вместо двух, меньшая длина коммуникаций и т. д.).

В литературе отсутствует методика расчета двухколонных двухфильтровых водозаборных

скважин, что сдерживает их применение на практике. Поэтому целью исследований являлась разработка основ расчета и проектирования подобных скважин.

Конструкция скважины

Скважина, разработанная в БНТУ (рис. 1), состоит из: кондуктора с затрубной цементацией; первого ствола, имеющего в своем составе эксплуатационную колонну, фильтр с рабочей частью и отстойник; второго ствола, имеющего в составе эксплуатационную колонну, фильтр с рабочей частью и отстойник; верхнего и нижнего соединительных патрубков; гравийной обсыпки; песчаной засыпки; глиняного замка; закачных трубок с перфорацией, выполненных напротив рабочей части фильтров.

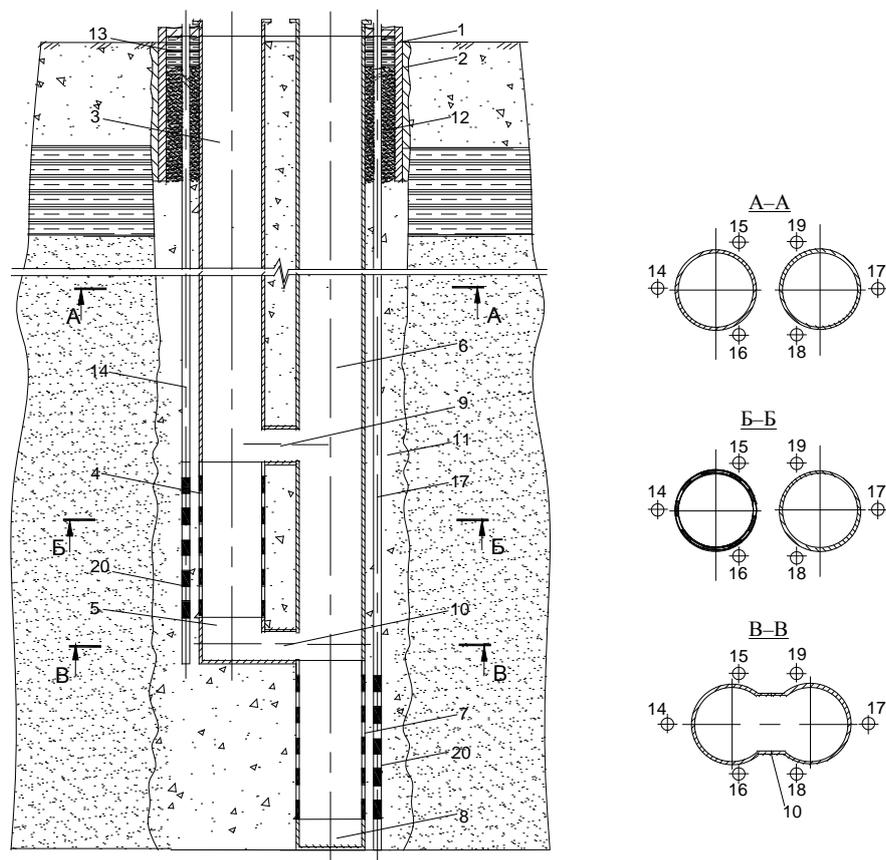


Рис. 1. Конструкция двухколонной двухуровневой водозаборной скважины: 1 – кондуктор; 2 – затрубная цементация; 3, 6 – эксплуатационная колонна первого и второго стволов; 4, 7 – фильтр первого и второго стволов с рабочей частью; 5, 8 – отстойник первого и второго стволов; 9, 10 – верхний и нижний соединительные патрубки; 11 – гравийная обсыпка; 12 – песчаная засыпка; 13 – глиняный замок; 14–19 – закачные трубки; 20 – перфорация

Fig. 1. Construction of two-column two-level water well: 1 – conductor; 2 – annular cementation; 3, 6 – production casing of the first and second wellbores; 4, 7 – filter of the first and second wellbores with working part; 5, 8 – sump of the first and second wellbores; 9, 10 – upper and lower connecting pipes; 11 – gravel packing; 12 – sand filling; 13 – clay lock; 14–19 – injection tubes; 20 – perforation

В скважине смонтированы два насоса по одному в каждой эксплуатационной колонне.

Для проведения декольматации каждого из гравийных фильтров предусмотрена система затрубной регенерации, включающая нагнетательные трубки для создания циркуляции реагента.

Основные расчетные зависимости

Определение длины рабочей части фильтра. Исходя из того, что оба фильтра гидравлически связаны между собой с помощью верхнего и нижнего соединительных патрубков, при индивидуальной работе любого из насосов будут работать оба фильтра. Это значит, что рабочая длина фильтра l_{ϕ} при индивидуальной работе насоса определится по формуле

$$l_{\phi} = l_{\phi 1} + l_{\phi 2}, \quad (1)$$

где $l_{\phi 1}$, $l_{\phi 2}$ – длина фильтра первого и второго стволов.

Длину рабочей части фильтра принимаем из условия обеспечения допустимой скорости воды на входе в него $v_{\phi, \text{доп}}$ и определяем по зависимости [3]

$$l_{\phi, \text{доп}} = \frac{Q_c}{\pi d_{\phi} v_{\phi, \text{доп}}}, \quad (2)$$

где Q_c – расчетная производительность скважины, м³/сут.; d_{ϕ} – внешний диаметр гравийного фильтра скважины, м; $v_{\phi, \text{доп}}$ – допустимая скорость воды на входе в фильтр, м/сут.

При отсутствии достоверных данных о составе водовмещающих пород допустимую скорость на входе в фильтр определяют по приближенной формуле С. К. Абрамова

$$v_{\phi, \text{доп}} = 65 \sqrt[3]{k}, \quad (3)$$

где k – коэффициент фильтрации водоносных пород пласта, м/сут.

Для гравийных фильтров используют зависимость

$$v_{\phi, \text{доп}} = 1000k \left(\frac{d_{\text{ср.пл}}}{d_{\text{ср.обс}}} \right)^2, \quad (4)$$

где $d_{\text{ср.пл}}$, $d_{\text{ср.обс}}$ – средний диаметр частиц пласта и обсыпки.

Расчет понижения уровня воды в скважине при работе одного насоса. Понижение в скважине с постоянным дебитом можно определить по формуле [8]

$$s_0 = \frac{Q_c \left(\ln \frac{R}{r_0} + \zeta_1 + \zeta_2 \right)}{2\pi k m}, \quad (5)$$

где r_0 – радиус скважины; R – радиус влияния скважины, который в предварительных расчетах принимается в зависимости от крупности частиц водоносных пород пласта: для песка: мелкого ($d = 0,10-0,25$ мм) $R = 50-100$ м, средней крупности ($d = 0,25-0,50$ мм) $R = 100-300$ м, крупного ($d = 0,5-1,0$ мм) $R = 300-400$ м, гравелистого ($d = 1,0-2,0$ мм) $R = 400-500$ м; для гравия: мелкого ($d = 2,0-3,0$ мм) $R = 400-600$ м, среднего ($d = 3,0-5,0$ мм) $R = 600-1500$ м, крупного ($d = 5,0-10,0$ мм) $R = 1500-3000$ м [3]; ζ_1 – поправка на несовершенство скважины по степени вскрытия пласта (l_{ϕ}/m); ζ_2 – то же по характеру вскрытия пласта, учитывающая дополнительное фильтрационное сопротивление; m – мощность пласта.

В [8] приведены значения поправки $\zeta_1 = f(l_{\phi}/m; m/r_c)$ как для случаев, когда водоприемная часть скважины примыкает к кровле или подошве пласта, так и для случаев расположения приемной части приблизительно посередине пласта. Поправка ζ_2 может быть приближенно определена по преобразованной формуле С. К. Абрамова [3]

$$\zeta_2 = \frac{0,2Ak^{0,5}m}{Q_c} \sqrt{s_0 v_{\phi, \text{доп}}}, \quad (6)$$

где A – параметр фильтрационного сопротивления, который может приниматься в пределах: 6–8 – для дырчатых и щелевых фильтров, 8–10 – для каркасно-стержневых фильтров с проволочной обмоткой и гравийной обсыпкой, 10–15 – для фильтров из штампованного листа с песчано-гравийной обсыпкой, 15–25 – для сетчатых фильтров.

Начальный динамический уровень воды $H_{\text{дин.нач}}$ в скважине при этом будет находиться на глубине

$$H_{\text{дин.нач}} = H_{\text{ст}} + s_0, \quad (7)$$

где $H_{\text{ст}}$ – статический уровень воды в скважине.

При длительной работе скважины с постоянным дебитом ее радиус влияния возрастает за счет сработки запасов подземных вод в пласте. Сопротивление пласта, характеризуемое величиной $\ln(R/r_0)$, постоянно увеличивается, поэтому динамический уровень в скважине будет понижаться. При расчете дополнительного понижения уровня s_{0t} в несовершенной скважине на заданный срок эксплуатации ($t = 25$ лет) ограничиваются оценкой сопротивления только по степени вскрытия пласта ($\zeta_2 = 0$) и используют формулу [8]

$$s_{0t} = \frac{Q_c (R_{c0} + \zeta_1)}{4\pi km}, \quad (8)$$

где R_{c0} – безразмерное сопротивление при действии совершенной скважины.

Величину безразмерного сопротивления находят по формуле

$$R_{c0} = 2 \ln \frac{r_{\text{вл}}}{r_0}, \quad (9)$$

где $r_{\text{вл}}$ – параметр, зависящий от времени,

$$r_{\text{вл}} = 1,5\sqrt{at}, \quad (10)$$

где a – коэффициент пьезопроводности пласта, $a = km/\mu$; μ – коэффициент упругой водоотдачи; t – срок эксплуатации скважины.

Конечный динамический уровень при этом будет находиться на глубине

$$H_{\text{дин.кон}} = H_{\text{дин.нач}} + s_{0t}. \quad (11)$$

При известных гидравлических параметрах опорных скважин в районе строительства расчетное рабочее понижение определяют через их средний удельный дебит q

$$s_0 = Q_c / q. \quad (12)$$

Расчет понижения уровня воды в скважине при одновременной работе двух насосов. Если два насоса работают одновременно, каждый из стволов работает как самостоятельная скважина. Ствол с верхним фильтром в дальнейшем

будем именовать верхней скважиной, а ствол с нижним фильтром – нижней. Характеристикам верхней скважины присвоим индекс I, а нижней – индекс II. Для расчета понижений s_I и s_{II} в обеих скважинах при одновременной работе двух насосов с подачами Q_I и Q_{II} соответственно приведем предлагаемую конструкцию к расчетной схеме (рис. 2), где условно примем, что фильтры обоих стволов имеют общую вертикальную ось.

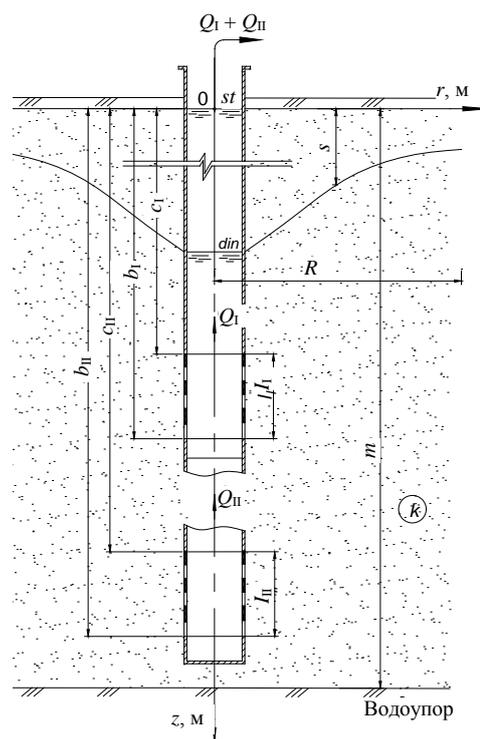


Рис. 2. Расчетная схема двухуровневой скважины

Fig. 2. Design scheme of two-level well

Когда водоносный пласт имеет водоупор, т. е. два фильтра работают в однородном водоносном пласте, понижение уровня воды в верхней скважине, в том числе под влиянием работы нижней, может быть представлено в следующем виде [9]:

$$s_I = \frac{Q_I}{2\pi km} \left(\ln \frac{R}{r_0} + \zeta_I + \varphi_{II} \right), \quad (13)$$

где r_0 – радиус фильтра; ζ_I – дополнительное сопротивление на несовершенство верхней скважины; φ_{II} – коэффициент, связанный с влиянием нижней скважины.

Дополнительное сопротивление

$$\zeta_I = \frac{1-l'}{c'} \left(\ln \frac{l_1}{r_0} - \varepsilon \right), \quad (14)$$

где $\varepsilon = f(b'; l')$; $b' = \frac{m-b_1}{m-l_1}$; $l' = \frac{l_1}{m}$; $b_1 = c_1 + l_1$ – расстояние нижнего конца верхнего фильтра от кровли пласта; $c' = \frac{c_1 + l_1}{c_1}$.

Приняв $z = b_1$, значение φ_{II} представим в следующем виде:

$$\varphi_{II} = \frac{1,15}{\lambda} \left(\frac{m}{l_{II}} \zeta_{II} + \log \frac{R^2}{\beta_{II}} \right), \quad (15)$$

где $\beta_{II} = (2m - b_1)(m + b_1)$; $\zeta_{II} = \log \frac{b_{II}^2 - b_1^2}{c_{II}^2 - b_1^2} + \log \frac{2m - c_{II} - b_1}{2m - b_{II} - b_1}$; $b_{II} = c_{II} + l_{II}$ (рис. 2).

Если длина фильтра нижней скважины l_{II} невелика по сравнению с мощностью водоносного пласта, вторым слагаемым в уравнении по определению ζ_{II} можно пренебречь, т. е. $\zeta_{II} = \log \frac{b_{II}^2 - b_1^2}{c_{II}^2 - b_1^2}$.

Таким образом, формула дебита верхней скважины запишется в следующем виде:

$$Q_I = \frac{2\pi k m s_I}{2,3 \log \frac{R}{r_0} + \zeta_I + \varphi_{II}}. \quad (16)$$

Аналогичным путем могут быть получены формулы для расчета дебита нижней скважины и понижения уровня в ней:

$$Q_{II} = \frac{2\pi k m s_{II}}{2,3 \log \frac{R}{r_0} + \zeta_{II} + \varphi_I}; \quad (17)$$

$$s_{II} = \frac{Q_{II}}{2\pi k m} \left(2,3 \log \frac{R}{r_0} + \zeta_{II} + \varphi_I \right), \quad (18)$$

где ζ_{II} – дополнительное сопротивление на несовершенство нижней скважины; φ_I – коэффициент, связанный с влиянием верхней скважины,

$$\varphi_I = 1,15\lambda \left(\frac{m}{l_I} \zeta_I + \log \frac{R^2}{\beta_I} \right), \quad (19)$$

$$\beta_I = (2m - c_{II})(m + c_{II});$$

$$\zeta_I = \log \frac{c_{II}^2 - b_1^2}{c_{II}^2 - c_1^2} + \log \frac{2m - c_1 - c_{II}}{2m - b_1 - c_1}.$$

Если длина фильтра верхней скважины l_I мала по сравнению с мощностью водоносного пласта, то вторым слагаемым в уравнении по определению ζ_I можно пренебречь. Тогда

$$\zeta_I = \log \frac{c_{II}^2 - b_1^2}{c_{II}^2 - c_1^2}.$$

Пример. Требуется запроектировать двух-колонную скважину в санатории-профилактории БНТУ, который находится на берегу Заславского водохранилища в 10 км от г. Минска, вблизи д. Приморье Минского района. Здесь с 1966 г. эксплуатируется одиночная типовая водозаборная скважина № 13642/66 производительностью $Q = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$, значительно снизившая свой удельный дебит, что привело к росту затрат электроэнергии на подъем и подачу воды. Это вызвало необходимость ее обследования с целью оценки ее технического состояния. Перспективным планом развития санатория-профилактория предусмотрено строительство бассейна и второго жилого корпуса, что требует увеличения производительности скважины и модернизации системы водоснабжения санатория. Производительность проектируемой скважины принимаем $Q_c = 15 \text{ м}^3/\text{ч} = 360 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Конструкции существующей и проектируемой буровых скважин представлены на рис. 3.

Глубина существующей скважины 39,5 м. Она каптирует воду из верхних четвертичных отложений, представленных днепровско-сожским водно-ледниковым комплексом, который распространен на глубине от 12,0 до 39,5 м. Отложения перекрыты двухметровым слоем красного суглинка с валунами в интервале 10–12 м. Водовмещающие породы представлены разнозернистым песком с гравием и галькой в интервале 12–16 м, гравием с галькой и валунами в интервале 16–38 м, мелкозернистыми песками в интервале 38,0–39,5 м. Водоносный горизонт напорный, статический уровень расположен выше кровли водоносного горизонта на отметке 10 м.

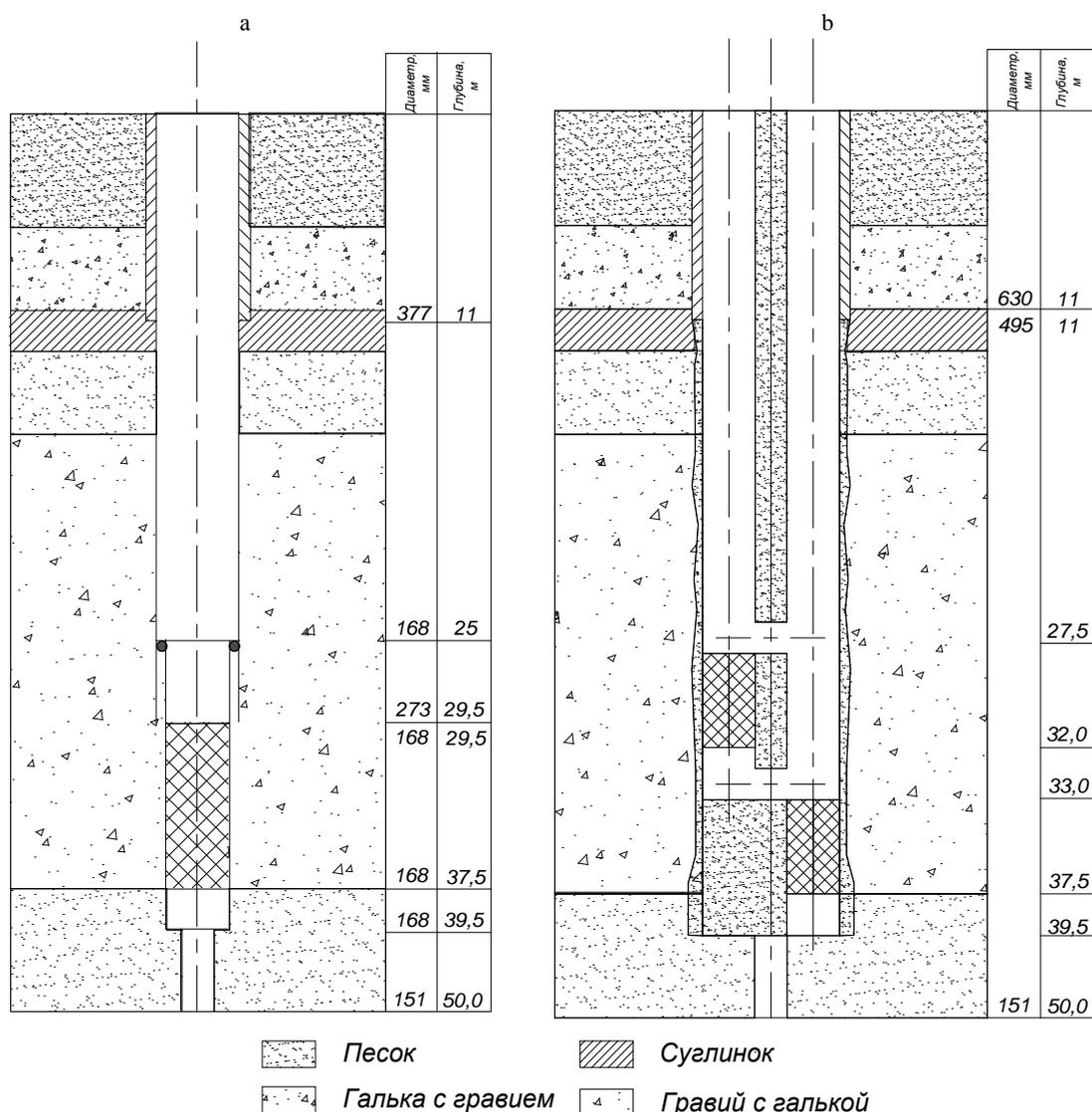


Рис. 3. Геолого-литологические разрезы буровых скважин: а – существующей № 13642/66; б – проектируемой
 Fig. 3. Geological and lithological sections of boreholes: a – existing No 13642/66; b – projected

Результаты обследования существующей скважины представлены в табл. 1.

Заключение по результатам обследования скважины. Продолжительность работы скважины составляет 54 года, что более чем в два раза превышает нормативный срок эксплуатации подобных сооружений (25 лет). За этот период удельный дебит скважины снизился с $q_0 = 10,00$ до $q_1 = 0,46$ м²/ч, т. е. в 21,7 раза. Произошло значительное снижение динамического уровня воды в стволе скважины, что привело к росту затрат электроэнергии на подъем воды. Скважина работает неэффективно вследствие того, что на ней не проводились работы по восстановлению производительности.

Фильтр – в аварийном состоянии в результате коррозии латунного сетчатого полотна, находящегося на трубчатом дырчатом каркасе. Можно также констатировать, что проведение работ по восстановлению производительности скважины в настоящее время нецелесообразно, так как связано с риском разрушения сетчатого фильтра из-за его естественной коррозии за время эксплуатации. Дальнейшая эксплуатация скважины связана с еще большим снижением ее производительности из-за прогрессирующей кольматации фильтра, с высокой вероятностью его разрушения и выхода скважины из строя. Скважина полностью выработала свой ресурс и подлежит перебурированию.

Результаты обследования скважины
Well survey results

Год строительства – 1966 г.		
Тип фильтра – сетчатый, с гравийной обсыпкой, на трубчатом перфорированном каркасе		
Рабочий интервал фильтра согласно паспорту 29,5–37,5 м, длина фильтра $l_{\phi} = 8$ м		
Диаметр фильтра – 168 мм		
Диаметр эксплуатационной колонны – 273 мм		
Параметр	Паспортные данные	Результат обследования
Глубина скважины, м	39,5	39,5
Статический уровень, м	10	10
Динамический уровень, м	12	23
Дебит, м ³ /ч	20	6
Понижение уровня, м	2	13
Удельный дебит, м ³ /ч/м	$q_0 = 10$	$q_1 = 0,46$
Изменение удельного дебита, разы	21,7	
Тип насоса	Эрлифт	ЭЦВ 6-6.5-55
Загрузка насоса, м	25,0	24,5
Диаметр водоподъемных труб, мм	114	64
Состояние станции управления насосом	–	Удовлетворительное

Конструкция двухколонной скважины

На рис. 3б показан геолого-литологический разрез двухколонной скважины. Для обеспечения бесперебойности подачи воды в профилакторий скважину снабжаем двумя фильтровыми колоннами, в каждой из которых будет установлен погружной насос. Это позволяет при выходе из строя одного из них включить в работу другой и осуществлять непрерывную подачу воды потребителю. Фильтры смещаем относительно друг друга, чтобы из пласта к каждому из них при работе своего насоса формировался отдельный фильтрационный поток. Так как объем выпадающих из воды отложений пропорционален объему прошедшей через гравийный фильтр воды, это позволит снизить интенсивность кольматации гравийной обсыпки напротив каждого из фильтров в процессе эксплуатации и повысить долговечность скважины. При расположении фильтров напротив друг друга будет формироваться общий фильтрационный поток, что может привести к интенсивному зарастанию интервала установки гравийных фильтров.

Бурение скважины. Вначале бурят разведочный ствол долотом диаметром $D = 151$ мм на глубину 50 м. Глубина скважины принимается 39,5 м. Разведочный ствол разбуривают долотом диаметром 680 мм от поверхности земли до глубины 5 м. Устанавливается съемный кондуктор диаметром 630 мм и длиной 5 м. Далее скважину бурят на глубину от 5,0 до 10,5 м трехшарошечным долотом диаметром 580 мм. Устанавливают и цементируют кондуктор диаметром 530 мм и длиной 12 м. Затем в кондуктор опускают трехшарошечное долото диаметром 495 мм и бурят скважину до глубины 39,5 м роторным способом с обратной промывкой. Конструкция фильтра принята в соответствии с [10]. Рабочая часть фильтра представляет собой трубчатый проволочный фильтр с трубчатым дырчатым каркасом диаметром 168 мм с проволочной обмоткой из нержавеющей стали толщиной профильной проволоки 3 мм. Наружный диаметр рабочей части фильтра 184 мм. Марка фильтра ФТП-168-3000 в соответствии с [10], выпускает его ОАО «Завод Промбурвод».

Водоносный горизонт в верхней части слагают разнозернистые пески с гравием и галь-

кой, в нижней – гравийно-галечные отложения. Средний коэффициент фильтрации водоносных пород пласта принимаем для песков средней крупности и гравелистых $k = 30$ м/сут. [8, табл. III.3].

Находим значение допустимой скорости

$$v_{\phi, \text{доп}} = 65\sqrt[3]{k} = 65\sqrt[3]{30} = 357,5 \text{ м/сут.}$$

Длину рабочей части фильтра рассчитываем по (2). Так как проволочный фильтр обсыпается снаружи гравийной обсыпкой, внешний диаметр гравийного фильтра $d_{\phi} = 495$ мм = 0,495 м, тогда его минимальная длина

$$l_{\phi, \text{доп}} = \frac{Q_c}{\pi d_{\phi} v_{\phi, \text{доп}}} = \frac{360}{3,14 \cdot 0,495 \cdot 357,5} = 0,65 \text{ м.}$$

Учитывая неоднородность состава водовмещающих пород и возможный кольматаж фильтра и гравийной обсыпки, с запасом принимаем $l_{\phi 1} = l_{\phi 2} = 4,5$ м общей длиной $l_{\phi} = 9,0$ м. Размещаем первый фильтр в интервале 27,5–32,0 м, второй – в интервале 33,0–37,5 м.

Подбор материала для обсыпки производим из соотношения: $\frac{D_{50}}{d_{50}} = 8-12$, где d_{50} , D_{50} –

средний диаметр частиц соответственно водоносных пород и материала обсыпки.

Допустимую величину зазора между витками проволоки из опыта сооружения скважин с гравийной обсыпкой определяем по [1].

Расчет понижения уровня воды в скважине. Определяем понижение в скважине по известному удельному дебиту опорной скважины. Удельный дебит принимаем равным паспортному скважины № 13642/66: $q = 10$ м³/ч. Статический уровень $H_{\text{ст}}$, согласно акту обследования, находится на глубине 10 м.

Расчетное рабочее понижение при проектном дебите $Q_c = 15$ м³/ч составит

$$s_0 = Q_c / q = 15/10 = 1,5 \text{ м.}$$

Начальный динамический уровень при этом будет находиться на глубине

$$H_{\text{дин.нач}} = H_{\text{ст}} + s_0 = 10 + 1,5 = 11,5 \text{ м.}$$

Коэффициент фильтрации водовмещающих пород $k = 30$ м/сут. [8, табл. III.3]. Проектная мощность песков в расчетах принята $m = 26$ м.

Коэффициент упругой водоотдачи $\mu = 4 \cdot 10^{-3}$ принимаем для гравелистых песков [8, табл. III.2]. Расчет произведен для напорного водоносного горизонта $km = 30 \cdot 26 = 780$ м²/сут., коэффициент пьезопроводности $a = km/\mu = 780/(4 \cdot 10^{-3}) = 19,5 \cdot 10^4$ м²/сут., радиус скважины принимаем $r_0 = 0,09$ м, время эксплуатации $t = 25$ лет $\approx 10^4$ сут., производительность $Q_c = 15$ м³/ч = 360 м³/сут. Поправка на несовершенство скважины по степени вскрытия пласта $\zeta_1 = 7,5$ при $l_{\phi}/m = 9/26 = 0,35$; $m/r_0 = 26/0,09 = 288$ [8, рис. IV.10].

Тогда дополнительное понижение уровня s_{0t} в проектируемой скважине на заданный срок эксплуатации ($t = 25$ лет) согласно (8) составит

$$s_{0t} = \frac{Q_c (R_{c0} + \zeta_1)}{4\pi km} = \frac{360 \left(2 \ln \frac{1,5\sqrt{19,5 \cdot 10^8} + 7,5}{0,09} + 7,5 \right)}{4 \cdot 3,14 \cdot 30 \cdot 26} = 1,25 \text{ м.}$$

Таким образом, конечный динамический уровень в конце расчетного срока эксплуатации проектируемой скважины

$$H_{\text{дин.кон}} = H_{\text{дин.нач}} + s_{0t} = 11,5 + 1,25 = 12,75 \text{ м.}$$

Поскольку верх фильтра находится на отметке 27,5 м, а динамический уровень через 25 лет снизится до отметки 12,75 м, работа скважины будет обеспечена в напорных условиях с затопленным фильтром.

ВЫВОДЫ

1. Предложена конструкция двухколонной двухфильтровой водозаборной скважины, совмещающей в себе рабочую и резервную скважины, находящиеся в одном буровом стволе, которую можно широко применять в области водоснабжения. По сравнению с типовой скважиной предлагаемая конструкция обладает повышенной надежностью и долговечностью, обеспечивает бесперебойность подачи воды потребителю.

2. Разработана методика расчета гидравлических параметров двухколонной двухфильтровой водозаборной скважины при работе одного и двух насосов одновременно.

3. Рассмотрен пример и изложены основы проектирования скважины предлагаемой конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скважинные водозаборы. Правила проектирования: ТКП 45-4.01-199–2010 (02250). Введ. 01.01.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 80 с.
2. Абрамов, С. К. Забор воды из подземного источника / С. К. Абрамов, В. С. Алексеев. М.: Колос, 1980. 239 с.
3. Старинский, В. П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов / В. П. Старинский, Л. Г. Михайлик. Минск: Высш. шк., 1989. 269 с.
4. Водозаборная скважина: а. с. 1448002SU, МКИ Е 03В 3/18 / В. П. Ткаченко. Опубл. 30.12.1988.
5. Плотников, Н. А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н. А. Плотников, В. С. Алексеев. М.: Стройиздат, 1990. 256 с.
6. Богомолов, Г. В. Бесфильтровые водозаборные скважины в рыхлых породах (теория и практика устройства) / Г. В. Богомолов, Р. А. Станкевич. Минск: Наука и техника, 1975. 152 с.
7. Медведева, Ю. А. Двухуровневая скважина для забора подземных вод / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, Е. С. Сацута // Вода. Газ. Тепло-2020: матер. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Бел. нац. техн. ун-та, 100-летию каф. «Гидротехн. и энергет. стр-во, водный транспорт и гидравлика», 90-летию каф. «Теплогасоснаб. и вент.» / редкол. С. В. Харитончик [и др.]. Минск: БНТУ, 2020. С. 188–192.
8. Проектирование водозаборов подземных вод / А. И. Арцев [и др.], под ред. Ф. М. Бочевера. М.: Стройиздат, 1976. 292 с.
9. Линзы пресных вод пустыни: методы исследования, оценки ресурсов и эксплуатации / Акад. наук СССР. Ин-т географии. Упр. геологии и охраны недр при Совете Министров Туркм. ССР. Всесоюз. ин-т гидрогеологии и инж. геологии «ВСЕГИНГЕО» М-ва геологии и охраны недр СССР; редкол. В. Н. Кунин (отв. ред.) и др. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1963. 379 с.
10. Фильтры водозаборных скважин: ТУ РБ 0918241.084–96. Минск, 1996. 3 с.

Поступила 30.03.2021

Подписана в печать 27.05.2021

Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. ТКП [Technical Code of Common Practice] 45-4.01-199–2010 (02250). *Downhole Water Intakes. Design Rules*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2011. 80 (in Russian).
2. Abramov S. K., Alekseev V. S. (1980) *Water Intake from an Underground Source*. Moscow, Kolos Publ. 239 (in Russian).
3. Starinsky V. P., Mikhailik L. G. (1989) *Water Intake and Treatment Facilities of Municipal Water Supply Systems*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ. 269 (in Russian).
4. Tkachenko V. P. (1988) *Water well*. Inventor's Certificate No 1448002SU (in Russian).
5. Plotnikov N. A., Alekseev V. S. (1990) *Design and Operation of Groundwater Intakes*. Moscow, Stroiizdat Publ. 256 (in Russian).
6. Bogomolov G. V., Stankevich R. A. (1975) *Filterless Water Wells in Loose Rocks (Theory and Practice of the Device)*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 152 (in Russian).
7. Medvedeva Yu. A., Ivashchkin V. V., Satsuta E. S. (2020) Two-Level Well for Groundwater Intake. *Water. Gas. Heat-2020: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 100th Anniversary of the Belarusian National Technical University, the 100th Anniversary of "Hydraulic and Power Engineering, Water Transport and Hydraulics" Department, the 90th anniversary of "Heat and Gas Supply and Ventilation" Department*. Minsk, Belarusian National Technical University, 188–192 (in Russian).
8. Artsev A. I., Bochever F. M., Lapshin N. N., Oradovskaya O. E., Khokhlatov E. M. (1976) *Design of Groundwater Intakes*. Moscow, Stroiizdat Publ. 292 (in Russian).
9. Kumin V. N. (ed.) (1963) *Desert Freshwater Lenses: Research Methods, Resource Assessment and Exploitation*. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 379 (in Russian).
10. TU RB [Technical Specifications – Republic of Belarus] 0918241.084–96. *Water Well Filters*. Minsk, 1996. 3 (in Russian).

Received: 30.03.2021

Accepted: 27.05.2021

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-420-426>

УДК 666.972.16

К вопросу о допустимом содержании ионов аммония в химических добавках для бетонов

Докт. техн. наук П. И. Юхневский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Азотсодержащие соединения, которые поступают в бетон совместно с сырьевыми компонентами, в частности с химическими модификаторами бетонной смеси и бетона, а также присутствующие в портландцементе, способны в результате разложения образовывать аммиак. Процессы образования и эмиссии аммиака как вызывают ухудшение атмосферы жилых помещений, так и являются причиной понижения прочности и показателей эксплуатационной безопасности железобетонных конструкций. Эти обстоятельства обуславливают необходимость проведения исследований и разработки методов определения безопасного количества аммонийсодержащих добавок в бетоне. Чаще всего в азотсодержащих соединениях присутствуют добавки-пластификаторы, противоморозные и комплексные добавки, а также ускорители схватывания и твердения. Согласно Изменению № 2 СТБ 1112–98 «Добавки для бетонов. Общие технические условия», содержание ионов аммония в добавках не должно превышать 100 мг/кг (кроме противоморозных). Вместе с тем некоторые добавки, в том числе пластификаторы, успешно применяемые не один год без выявленных проблем с эмиссией аммиака, не укладываются в установленную норму. Для определения предельно допустимых концентраций (ПДК) аммонийных солей в бетоне необходимо знать зависимость эмиссии аммиака из бетона от различных факторов, в частности от массового содержания солей в бетоне, площади поверхности, с которой осуществляется эмиссия аммиака, массы бетонных конструкций, температуры, влажности и кратности воздухообмена в помещении. В меньшей степени на эмиссию аммиака будут влиять характеристики бетона и условия реакции гидролиза солей в нем. В статье приведены формулы для расчета эмиссии аммиака из бетона при введении различных аммонийсодержащих добавок. Показано, что, несмотря на сверхнормативное содержание ионов аммония в добавках С-3, ЛСТ и УП-4, эмиссия аммиака из бетона в ряде случаев не превышает установленных ПДК. Объем эмиссии аммиака из бетона определяется не только количеством ионов аммония в добавках, но и в значительной степени конструктивно-технологической схемой здания и параметрами загрузки бетоном помещения. При известных ПДК в воздухе помещения, заданных параметрах загрузки бетоном помещения формулы позволяют рассчитать предельную концентрацию добавки в бетонной смеси, не превышение которой обеспечит соблюдение ПДК по аммиаку в воздухе помещений.

Ключевые слова: азотсодержащие соединения, ионы аммония, эмиссия аммиака, предельно допустимая концентрация, конструктивно-технологическая схема здания, параметры загрузки бетоном помещения

Для цитирования: Юхневский, П. И. К вопросу о допустимом содержании ионов аммония в химических добавках для бетонов / П. И. Юхневский // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 420–426. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-420-426>

On Issue of Permissible Content of Ammonium Ions in Chemical Additives for Concrete

P. I. Yukhnevskiy¹⁾

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

Abstract. Nitrogen-containing compounds that enter concrete together with raw materials, in particular with chemical modifiers of concrete mixture and concrete, as well as those present in Portland cement, are capable of forming ammonia as a result

Адрес для переписки
Юхневский Павел Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
pyuhnevsky@bntu.by

Address for correspondence
Yukhnevskiy Pavel I.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-73
pyuhnevsky@bntu.by

of decomposition. The processes of formation and emission of ammonia cause both a deterioration of the atmosphere of residential premises and are the reason for a decrease in the strength and operational safety indicators of reinforced concrete structures. These circumstances necessitate research and development of methods for determining the safe amount of ammonium-containing additives in concrete. Most often, nitrogen-containing compounds contain plasticizing additives, antifreeze and complex additives, as well as setting and hardening accelerators. According to Amendment No 2 STB (Standards of the Republic of Belarus) 1112–98 “Additives for Concrete. General Requirements”, the content of ammonium ions in additives should not exceed 100 mg/kg (except for antifreeze). At the same time, some additives, including plasticizers, which have been successfully used for more than one year without identified problems with ammonia emission, do not fit into the established norm. To determine the maximum permissible concentration (MPC) of ammonium salts in concrete, it is necessary to know the dependence of the emission of ammonia from concrete on various factors, in particular, on the mass content of salts in concrete, the surface area from which ammonia is emitted, the mass of concrete structures, temperature, humidity and air exchange rate in the room. To a lesser extent, the ammonia emission will be affected by the characteristics of the concrete and the reaction conditions for the hydrolysis of salts in the concrete. The paper provides formulas for calculating the emission of ammonia from concrete with the introduction of various ammonium-containing additives. It is shown that, in spite of the above-standard content of ammonium ions in additives C-3, LST and UP-4, the emission of ammonia from concrete in some cases does not exceed the established maximum permissible concentration (MPC). The volume of ammonia emission from concrete is determined not only by the amount of ammonium ions in the additives, but also to a large extent by the structural and technological scheme of the building and the parameters of the concrete loading of the room. With the known MPC in the air of the room, the given parameters of loading the room with concrete, the formula allows you to calculate the maximum concentration of the additive in the concrete mixture, not exceeding which will ensure compliance with the MPC for ammonia in the air of the premises.

Keywords: nitrogen-containing compounds, ammonium ions, ammonia emission, maximum permissible concentration, structural and technological scheme of building, parameters of loading room with concrete

For citation: Yukhnevskiy P. I. (2021) On Issue of Permissible Content of Ammonium Ions in Chemical Additives for Concrete. *Science and Technique*. 20 (5), 420–426. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-420-426> (in Russian)

Введение

При возведении жилых домов одной из актуальных проблем является применение современных технологий строительства и строительных материалов, удовлетворяющих требованиям безопасности согласно ТР 2009/013/ВУ [1]. К таким материалам и компонентам бетона относятся химические добавки, в состав которых входят аммонийные соли.

Азотсодержащие соединения, которые поступают в бетон совместно с сырьевыми компонентами, в частности с химическими модификаторами бетонной смеси и бетона, а также присутствующие в портландцементе, способны в результате разложения образовывать аммиак. Процессы образования и эмиссии аммиака как вызывают ухудшение атмосферы жилых помещений, так и являются причиной понижения прочности и показателей эксплуатационной безопасности железобетонных конструкций. Эти обстоятельства обуславливают необходимость проведения исследований и разработки методов определения безопасного количества аммонийсодержащих добавок в бетоне.

В Республике Беларусь аммиак относится к веществам 4-го класса опасности, для которого принят гигиенический критерий качества атмо-

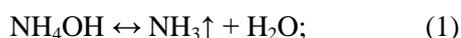
сферного воздуха: предельно допустимая концентрация – максимальное разовое содержание ПДК_{мр} – 200 мкг/м³ [2]. ПДК аммиака в воздухе рабочей зоны производственного помещения 20 мг/м³ [3] и в атмосферном воздухе территории промышленного предприятия 7 мг/м³.

Действующими нормами Беларуси и России не установлена ПДК аммиака в воздухе жилых помещений, но, согласно гигиеническим нормативам России [4], ПДК аммиака в атмосферном воздухе населенных мест составляет: среднесуточная ПДК_{сс} 0,04 мг/м³; максимальная разовая ПДК_{мр} 0,2 мг/м³; ПДК в воздухе рабочей зоны 20 мг/м³ [5].

Как показали результаты исследований [6–8], основная причина эмиссии аммиака из бетонных конструкций – азотсодержащие химические добавки для бетонов. Чаще всего это добавки-пластификаторы, противоморозные и комплексные добавки, а также ускорители схватывания и твердения [9–11]. Сюда относятся:

– аммиачная вода NH₄OH – добавка противоморозного действия, вводится в бетонную смесь в количестве 5–15 % от массы воды затворения в зависимости от расчетной температуры твердения. Легко распадается на аммиак и воду, поэтому бетонирование с применением

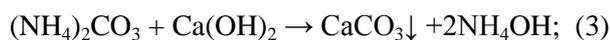
аммиачной воды ведут преимущественно на открытом воздухе. Реакция гидролиза протекает по схеме



– мочевины $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – добавка противоморозного действия, входит в состав комплексных добавок. Например, добавка НКМ (нитрат кальция + мочевины в соотношении 1:1) вводится в бетонную смесь в количестве 6–10 % от массы цемента в зависимости от расчетной температуры твердения; добавка ННХКМ (нитрит-нитрат-хлорид кальция с мочевиной в соотношении 3:1) вводится в бетонную смесь в количестве 6–14 % от массы цемента. Образование аммиака из мочевины можно представить реакциями:



карбонат аммония вступает в реакцию с гидроксидом кальция



итоговая реакция



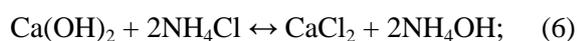
и затем – гидролиз гидроксида аммония по реакции (1);

– аммонийные соли (нитрат аммония NH_4NO_3 , хлористый аммоний NH_4Cl , оксалат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, аммонийная форма нитрата кальция $\text{Ca}_5\text{NH}_4(\text{NO}_3)_{11} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) входят в состав комплексных добавок в качестве противоморозных или ускорителей твердения. Процессы образования аммиака на примере хлористого аммония запишем следующим образом:

реакция гидролиза



обменная реакция с гидроксидом кальция



¹ Индексы «ТВ», «жидк», «р-р» – агрегатное состояние вещества – соответственно твердое, жидкость и раствор, – для которого принималась энтальпия образования при расчете теплового эффекта реакции.

– амиды карбоновых кислот с общей формулой RCONH_2 входят в состав противоморозных добавок и ускорителей твердения. Потенциально данные соединения также являются источником аммиака. Так, ацетамид CH_3CONH_2 , при обычных условиях являющийся довольно стабильным соединением, медленно разлагается холодными основаниями, а с горячими щелочными растворами быстро образует соответствующие ацетат и аммиак;

– аминокислоты, например аминокислота $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ и другие, входят в состав добавок – регуляторов твердения бетона;

– сульфированные меламиноформальдегидные смолы входят в состав добавок-пластификаторов и суперпластификаторов, однако на практике не отмечено признаков их разложения в щелочной среде портландцемента с выделением аммиака;

– лигносульфонат аммония – добавка-пластификатор III группы, поставляется из КНР, содержит до 3,5 % аммонийного азота.

По данным [12], диапазон значений содержания ионов аммония для противоморозных добавок составляет 300–24000 мг/кг, для пластификаторов на основе лигносульфонатов – 100–152 мг/кг, для пластификаторов на основе нафталинсульфонатов – 90–300 мг/кг, для поликарбоксилатов – 50–150 мг/кг. Согласно [13], содержание ионов аммония в добавках на основе нафталинсульфонатов оказалось ниже границ обнаружения прибора, а для добавки «Универсал П-4» составило 264 мг/кг добавки. Согласно Изменению № 2 СТБ 1112–98, содержание ионов аммония в добавках не должно превышать 100 мг/кг (кроме противоморозных). Таким образом, некоторые добавки, в том числе пластификаторы, успешно применяемые не один год без выявленных проблем с эмиссией аммиака, не укладываются в установленную норму. Следует добавить, что в стандартах США ASTM C494/C494M–19 и европейском EN 934-1 (2, 3) на химические добавки не приведены требования в части содержания ионов аммония или азотсодержащих компонентов.

Основная часть

Как видно из приведенных данных, в большинстве случаев источником аммиака в бетоне служит гидроксид аммония. Рассчитаем эн-

тальпию его образования по реакциям (4)–(6) и оценим вероятность эмиссии. Используя следствие из закона Гесса [14], согласно которому тепловой эффект химической реакции равен сумме теплот (энтальпий) образования продуктов реакции за вычетом суммы теплот (энтальпий) образования исходных веществ, применительно к уравнению (4) запишем формулу для расчета теплового эффекта реакции

$$\Delta H_f^0 = (\Delta H_{f\text{CaCO}_3} + 2\Delta H_{f\text{NH}_4\text{OH}}) - (\Delta H_{f\text{CO}(\text{NH}_2)_2} + \Delta H_{f\text{Ca}(\text{OH})_2} + 2\Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}). \quad (7)$$

Пользуясь данными стандартных теплот образования простых веществ [14], в результате расчета получаем величину теплового эффекта реакции (4): $\Delta H_f = -33$ кДж/моль, реакция экзотермическая. Тепловой эффект реакции (5): $\Delta H_f = 52,83$ кДж/моль, а реакции (6): $\Delta H_f = -9$ кДж/моль. Поскольку реакция по схеме (6) является экзотермической, вероятность ее протекания значительно выше по сравнению с (5) – эндотермической.

Стехиометрические расчеты, проведенные по уравнениям (1), (4), (6), показали, что 1 г мочевины способен выделить 586 мг аммиака, 1 г хлористого аммония – 318 мг аммиака и 1 г гидроксида аммония – 486 мг аммиака.

Для определения ПДК аммонийных солей в бетоне необходимо знать зависимость эмиссии аммиака из бетона от различных факторов, в частности, от массового содержания солей в бетоне, размера поверхности, с которой осуществляется эмиссия аммиака, от массы бетонных конструкций, температуры, влажности и кратности воздухообмена в помещении. В меньшей степени на эмиссию аммиака будут влиять характеристики бетона и условия реакции гидролиза солей в бетоне.

Исходя из физико-химии процессов, естественно предположить, что определяющими факторами концентрации аммиака в воздухе помещений A , мг/м³, являются:

- интенсивность воздухообмена помещения с внешней средой, характеризуемая кратностью воздухообмена $K_{\text{во}}$ за единицу времени, ч⁻¹;
- содержание аммонийных солей (мочевины) в бетоне $K_{\text{мб}}$, мг/кг бетона. Косвенно этот

показатель учитывает и время, прошедшее с момента возведения бетонных конструкций, поскольку в результате гидролиза концентрация аммиака с течением времени уменьшается;

– удельная площадь бетонных поверхностей (выделяющих аммиак) в помещении $S_{\text{убп}}$, т. е. площадь всех бетонных поверхностей, выходящих в помещение, отнесенная к объему помещения, м²/м³ = м⁻¹;

– удельная масса бетона, приходящаяся на единицу бетонной поверхности, $P_{\text{убп}}$, кг/м²;

– температура, влажность и пористость бетона.

Как показано в [15, 16], эмиссия аммиака из бетона сильно зависит от температуры и в меньшей степени от относительной влажности воздуха: с повышением температуры от 25 до 40 °С эмиссия аммиака возрастает в три-четыре раза и, наоборот, уменьшается на 25 % при увеличении относительной влажности воздуха с 30 до 90 %. Влиянием пористости бетона при В/Ц = 0,5–0,7 на эмиссию аммиака можно пренебречь. Авторами [16] предложена формула для расчета равновесной концентрации аммиака в помещении при стандартных параметрах влажности (50 %), температуры (25 °С) и кратности воздухообмена

$$A = \frac{0,00009828 \ln(P_{\text{убп}}/12,827) K_{\text{мб}} S_{\text{убп}}}{K_{\text{во}}}. \quad (8)$$

Для помещений без принудительной вентиляции кратность воздухообмена $K_{\text{во}}$ можно принять, равной 0,5 ч⁻¹.

В [17] для расчета выбросов вредных веществ из строительных конструкций (аммиака) и строительных материалов (летучих органических соединений) использовалась похожая формула

$$C_a = \frac{LSEa}{n}, \quad (9)$$

где C_a – ожидаемая концентрация загрязнителя, мкг/м³; L – отношение поверхности к объему, м²/м³; SEa – удельная скорость выброса, мкг/(м²·ч); n – кратность воздухообмена, ч⁻¹.

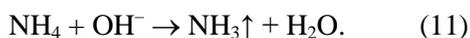
Формула (8) для расчета содержания аммиака в воздухе помещений при стандартных параметрах получена авторами [16] для мочеви-

ны. Расчеты тепловых эффектов реакций гидролиза показали, что вероятность образования гидроксида аммония по реакции (4) из мочевины примерно такая же, как и из хлористого аммония по (6). В таком случае постараемся провести аналогию для расчетов содержания аммиака при введении других аммонийных солей. Учитывая изложенное, модернизируем ее для других добавок. Рассчитаем новую постоянную вместо 0,00009828 для хлористого аммония. Исходя из того, что теоретически 1 г мочевины выделяет 586 мг аммиака, а 1 г хлористого аммония – 318 мг аммиака, получаем величину постоянной 0,00005333 и итоговую формулу для добавки NH_4Cl

$$A = 0,00005333 \frac{\ln(P_{\text{убп}}/12,827) K_{\text{амхб}} S_{\text{убп}}}{K_{\text{во}}}, \quad (10)$$

где $K_{\text{амхб}}$ – содержание хлористого аммония в бетоне, мг/кг бетона.

Теперь получим формулу для добавки «Универсал П-4». По данным [12], добавка содержит 263,16 мг/кг ионов NH_4^+ . Подсчитаем, сколько это может выделить аммиака по реакции



В результате несложных расчетов получаем 248,54 мг/кг NH_3 . Аналогичным образом откорректируем формулу для расчета содержания аммиака в помещении при введении добавки «Универсал П-4»

$$A = 0,00004168 \frac{\ln(P_{\text{убп}}/12,827) K_{\text{П-4}} S_{\text{убп}}}{K_{\text{во}}}, \quad (12)$$

где $K_{\text{П-4}}$ – содержание добавки «Универсал П-4» в бетоне, мг/кг бетона.

По формуле (12) выполним расчет содержания аммиака в воздухе помещений каркасно-монолитного жилого дома (на примере дома в районе ул. Кропоткина в г. Минске). Конструктивная схема представляет собой монолитные диски перекрытий толщиной 20 см из бетона класса С25/30, монолитные несущие вертикальные конструкции, а именно – лестничные клетки, диафрагмы жесткости, колонны. Высота потолков 2,8 м. Наружные стены

и внутренние перегородки выполнены из ячеистобетонных блоков.

По нашим расчетам, удельная площадь бетонной поверхности $S_{\text{убп}}$ на единицу объема помещения составляла от 0,45 до 0,60 $\text{м}^2/\text{м}^3$, а удельная масса бетона на единицу площади бетона $P_{\text{убп}}$ примерно 170 $\text{кг}/\text{м}^2$. Кратность воздухообмена примем $K_{\text{во}} = 0,5 \text{ ч}^{-1}$, т. е. без принудительной вентиляции.

При введении добавки «Универсал П-4» в количестве 0,6 % от массы цемента ($350 \text{ кг}/\text{м}^3$) содержание добавки в бетоне составит 875 мг/кг бетона. В свою очередь, содержание аммиака в воздухе двухкомнатной квартиры $A = 0,094 \text{ мг}/\text{м}^3$ воздуха, т. е. имеем концентрацию аммиака в воздухе меньше допустимой санитарными нормами [2, 3] – 200 $\text{мкг}/\text{м}^3$. По данным [12], добавка С-3 содержит 304 мг/кг ионов NH_4^+ , ЛСТ – 170–220 мг/кг, карбоксилатов – 130 мг/кг, что близко по содержанию к добавке «Универсал П-4», а с учетом содержания добавок в бетоне эмиссия аммиака в воздухе помещения не будет превышать санитарных норм, что и наблюдается на практике.

Удельные параметры загрузки бетона $S_{\text{убп}}$ и $P_{\text{убп}}$ для типовых жилых помещений в зависимости от конструктивно-технологической схемы здания могут существенно различаться. Приведенные выше расчеты выполнены для каркасного дома с монолитными перекрытиями и колоннами. Для дома с несущими монолитными внутренними стенами и перекрытиями толщиной 160 мм эти параметры, по данным [16], примерно составляют:

– удельная площадь бетонной поверхности $S_{\text{убп}}$: 1,4–1,5 $\text{м}^2/\text{м}^3$;

– удельная масса бетона на единицу поверхности бетона $P_{\text{убп}}$: 180–200 $\text{кг}/\text{м}^2$.

По [17], удельная площадь бетонной поверхности для стен составляет 1,41 $\text{м}^2/\text{м}^3$, потолка – 0,41, колонны, ригеля – 0,24 и двери – 0,10 $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Рассчитаем содержание аммиака в помещении с новыми удельными параметрами загрузки бетоном помещения, используя формулу (12) для добавки «Универсал П-4». После несложных расчетов имеем $A = 0,30 \text{ мг}/\text{м}^3$ воздуха помещения, или в три раза больше по сравнению с данными загрузки помещения бе-

тоном для дома в г. Минске и больше допустимого нормами [2]. Таким образом, конструктивная схема здания существенно влияет на количество аммиака в помещении при одинаковом содержании добавки в бетоне.

При известных значениях A (например, равных ПДК, установленным санитарными нормами Беларуси), заданных $S_{убп}$, $K_{во}$ и $P_{убп}$ формула (12) позволяет рассчитать предельную концентрацию добавки в бетонной смеси $K_{мб}$, не превышение которой обеспечит соблюдение ПДК по аммиаку в воздухе помещений при их эксплуатации. Например, для добавки «Универсал П-4» имеем

$$K_{П-4} = \frac{A_{ПДК} K_{во}}{0,00004168 \cdot \ln(P_{убп} / 12,827) S_{убп}} = \frac{0,2 \cdot 0,5}{0,00004168 \cdot \ln(200/12,827) \cdot 1,5} = 625 \text{ мг/кг.} \quad (13)$$

При плотности бетона 2400 кг/м^3 получаем допустимый расход добавки на 1 м^3 бетона $1,5 \text{ кг}$ (при заданном содержании ионов аммония $263,16 \text{ мг/кг}$ добавки). При расходе добавки $0,5 \%$ от массы цемента (300 кг/м^3) содержание аммиака в воздухе помещения будет в пределах нормы.

ВЫВОДЫ

1. Как показали расчеты и практика применения добавок-пластификаторов бетона, несмотря на то что содержание ионов аммония NH_4^+ в добавках превышает установленную норму (Изменение № 2 СТБ 1112–98) в два-три раза, эмиссия аммиака из бетона не превышает предельно допустимую концентрацию 200 мкг/м^3 в воздухе, установленную в Республике Беларусь.

2. Объем эмиссии аммиака из бетона определяется не только количеством ионов аммония в добавках, но и в значительной степени конструктивно-технологической схемой здания и параметрами загрузки бетоном помещения.

3. Допустимое содержание ионов аммония в химических добавках может быть скорректировано в сторону увеличения после проведения экспериментальных исследований эмиссии аммиака из бетона для различных конструктивно-технологических схем зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность: ТР 2009/013/ВУ. Минск: Госстандарт, 2015. 28 с.
2. Гигиенический норматив «Показатели безопасности и безвредности атмосферного воздуха» [Электронный ресурс]: утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 25.01.2021 № 37 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. Режим доступа: https://pravo.by/upload/docs/op/C22100037_1614891600.pdf.
3. Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к контролю воздуха рабочей зоны» [Электронный ресурс]: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 11.10.2017 № 92 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. Режим доступа: https://pravo.by/upload/docs/op/W21732492p_1510174800.pdf.
4. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест: ГН 2.1.6.1338–03. М., 2003. 61 с.
5. Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.2.5.3532–18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» [Электронный ресурс]: постановление Главного гос. санитар. врача РФ от 13.02.2018 г. № 25 // Гарант.Ру. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71829532/>.
6. Шиманов, В. Н. Проблема эмиссии аммиака из бетонных конструкций [Электронный ресурс] / В. Н. Шиманов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. Режим доступа: <https://science-education.ru/article/view?id=7025>.
7. Rathbone, R. F. A Study of the Effects of Post-Combustion Ammonia Injection on Fly Ash Quality: Characterization of Ammonia Release from Concrete and Mortars Containing Fly Ash as a Pozzolanic Admixture / R. F. Rathbone, T. L. Robl. Kentucky: University of Kentucky Center for Applied Energy Research, 2001. 63 p. <https://doi.org/10.2172/833653>.
8. Benjamin, M. T. Estimating Ammonia Emissions in California [Electronic Resource] / M. T. Benjamin // LADCO Workshop on Fine Particle Emission Inventories Des Plaines, IL Sept. 28, 2000. Mode of access: <https://slideplayer.com/slide/4213732/>.
9. Пособие к строительным нормам и правилам. Применение добавок в бетоне: П1-99 к СНиП 3.09.01–85. Введ. 01.07.2000. Минск: Бел. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1999. 33 с.
10. Ратинов, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
11. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В. Г. Батраков; 2-е изд. М.: Стройиздат, 1998. 768 с.
12. Калыска, А. А. Определение содержания азотсодержащих соединений потенциометрическим методом в добавках для бетонов / А. А. Калыска, А. А. Дрозд // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск, 2017. Вып. 9. С. 219–231.

13. Халецкая, К. В. Аммиак и его соединения в железобетонных изделиях: обзор аналитических методик и результаты потенциометрического и фотометрического определения / К. В. Халецкая, Н. П. Яловая, Ю. С. Яловая // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2015. № 8. С. 88–96.
14. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. Л.: Химия, 1978. 392 с.
15. Emission of Ammonia from Indoor Concrete Wall and Assessment of Human Exposure / Z. Bai [et al.] // Environment International. 2006. Vol. 32, No 3. P. 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.06.002>.
16. Отчет о выполнении НИР [Электронный ресурс]. СПб., 2012. Режим доступа: <http://www.prostroymat.ru/blog/chastnyy-detektiv-po-sledu-ammiaka-v-betone-chast-6>. Дата доступа: 14.03.2019.
17. Järnström, H. Reference Values for Building Material Emissions and Indoor Air Quality in Residential Buildings [Electronic Resource] / H. Järnström. VTT, 2007. Mode of access: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2007/P672.pdf>.
- Поступила 26.03.2021
Подписана в печать 27.05.2021
Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. TR [Technical Recommendations] 2009/013/BY. *Buildings and Structures, Materials and Products for Building Application*. Minsk, Gosstandart Publ. 28 (in Russian).
2. Hygienic Standard “Indicators of Safety and Harmlessness of Atmospheric Air”: Resolution of the Council of Ministers dated 25.01.2021 No 37. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: https://pravo.by/upload/docs/op/C22100037_1614891600.pdf (in Russian).
3. Sanitary Norms and Rules “Requirements for Air Control of the Working Area”: Approved by the Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus from 11.10.2017 No 92. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: https://pravo.by/upload/docs/op/W21732492p_1510174800.pdf (in Russian).
4. GN [Hygienic Normative] 2.1.6.1338–03. *Maximum Permissible Concentration (MPC) of Pollutants in the Atmospheric Air of Populated Areas*. Moscow, 2003. 61 (in Russian).
5. On the Approval of Hygienic Standards 2.2.5.3532–18 “Maximum Permissible Concentration (MPC) of Harmful Substances in the Air of the Working Area”: Approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation from 13.02.2018 No 25. *Garant.Ru*. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71829532/>.
6. Shimanov V. N. (2012) Problem of Ammonia Emissions from Concrete Structures. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (5). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7025>.
7. Rathbone R. F., Robl T. L. (2001) *A Study of the Effects of Post-Combustion Ammonia Injection on Fly Ash Quality: Characterization of Ammonia Release from Concrete and Mortars Containing Fly Ash as a Pozzolan Admixture*. Kentucky, University of Kentucky Center for Applied Energy Research. 63. <https://doi.org/10.2172/833653>.
8. Benjamin M. T. (2000) Estimating Ammonia Emissions in California. *LADCO Workshop on Fine Particle Emission Inventories Des Plaines, IL September 28, 2000*. Available at: <https://slideplayer.com/slide/4213732/>.
9. SNiP [Construction Rules and Regulations] 3.09.01–85. *III-99 Building Code Guide. Use of Additives in Concrete*. Minsk, Publishing House of Belarusian State Institute for Standardization and Certification, 1999. 33 (in Russian).
10. Ratinov V. B., Rozenberg T. I. (1989) *Concrete Admixtures*. Moscow, Stroiizdat Publ. 188 (in Russian).
11. Batrakov V. G. (1998) *Modified Concrete. Theory and Practice*. Moscow, Stroiizdat Publ. 768 (in Russian).
12. Kalyska A. A., Drozd A. A. (2017) Determination of the Content of Nitrogen-Containing Compounds by the Potentiometric Method in Additives for Concrete. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Nauch. Tr. [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete: Collection of Scientific Papers]*. Minsk. Iss. 9. 219–231 (in Russian).
13. Khaletskaia K. V., Yalovaya N. P., Yalovaya Yu. S. (2015) Ammonia and its Compounds in Reinforced Concrete Products: a Review of Analytical Methods and Results of Potentiometric and Photometric Determination. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, (8), 88–96 (in Russian).
14. Rabinovich V. A., Khavin Z. Ya. (1978) *Brief Chemical Handbook*. Leningrad, Khimiya Publ. 392 (in Russian).
15. Bai Z., Dong Y., Wang Z., Zhu T. (2006) Emission of Ammonia from Indoor Concrete Wall and Assessment of Human Exposure. *Environment International*, 32 (3), 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.06.002>.
16. Research Progress Report [Electronic Resource]. Saint-Petersburg, 2012. Available at: <http://www.prostroymat.ru/blog/chastnyy-detektiv-po-sledu-ammiaka-v-betone-chast-6>. (Accessed 14 March 2019).
17. Järnström H. (2007) *Reference Values for Building Material Emissions and Indoor Air Quality in Residential Buildings*. Available at: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2007/P672.pdf>.

Received: 26.03.2021

Accepted: 27.05.2021

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-427-433>

UDC 621.436.068.4

Organization of Six-Cylinder Tractor Diesel Working Process

G. M. Kuharonak¹, M. Klesso², A. Predko², D. Telyuk²

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

²OJSC “Minsk Motor Plant” Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. The purpose of the work is to consider the organization of the working process of six-cylinder diesel engines with a power of 116 and 156 kW and exhaust gas recirculation. The following systems and components were used in the experimental configurations of the engine: Common Rail BOSCH accumulator fuel injection system with an injection pressure of 140 MPa, equipped with electro-hydraulic injectors with seven-hole nozzle and a 500 mm³ hydraulic flow; direct fuel injection system with MOTORPAL fuel pump with a maximum injection pressure of 100 MPa, equipped with MOTORPAL and AZPI five-hole nozzle injectors; two combustion chambers with volumes of 55 and 56 cm³ and bowl diameters of 55.0 and 67.5 mm, respectively; cylinder heads providing a 3.0–4.0 swirl ratio for Common Rail system, 3.5–4.5 for mechanical injection system. The recirculation rate was set by gas throttling before the turbine using a rotary valve of an original design. The tests have been conducted at characteristic points of the NRSC cycle: minimum idle speed 800 rpm, maximum torque speed 1600 rpm, rated power speed 2100 rpm. It has been established that it is possible to achieve the standards of emissions of harmful substances: on the 116 kW diesel engine using of direct-action fuel equipment and a semi-open combustion chamber; on the 156 kW diesel using Common Rail fuel supply system of the Low Cost type and an open combustion chamber.

Keywords: diesel, swirl ratio, combustion chamber, fuel supply system, fuel sprayer

For citation: Kuharonak G. M., Klesso M., Predko A., Telyuk D. (2021) Organization of Six-Cylinder Tractor Diesel Working Process. *Science and Technique*. 20 (5), 427–433. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-427-433>

Организация рабочего процесса шестицилиндрового тракторного дизеля

Докт. техн. наук, проф. Г. М. Кухаренок¹,
М. Клессо², А. Предко², Д. Телюк²

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

²ОАО «УКХ «Минский моторный завод» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Рассмотрена организация рабочего процесса шестицилиндровых дизелей мощностью 116 и 156 кВт с рециркуляцией отработавших газов. В экспериментальных комплектах двигателя использовались следующие системы и узлы: аккумуляторная система подачи топлива Common Rail BOSCH с давлением впрыска 140 МПа, оснащенная электрогидравлическими форсунками с семисопловыми отверстиями и проливом 500 мм³; система впрыска непосредственного действия с топливным насосом MOTORPAL с максимальным давлением впрыска 100 МПа, оснащенная форсунками MOTORPAL и АЗПИ с пятисопловыми отверстиями; камеры сгорания двух типов объемами 55 и 56 см³ с диаметрами горловин 55,0 и 67,5 мм; головки блоков цилиндра, обеспечивающие вихревое отношение для системы впрыска Common Rail 3,0–4,0, для механической системы впрыска 3,5–4,5. Степень рециркуляции задавалась дросселированием отработавших газов перед турбиной с помощью заслонки оригинальной конструкции. Испытания проводились по характерным точкам цикла NRSC на трех частотах вращения коленчатого вала: минимальной холостого хода 800 мин⁻¹, максимальной крутящего момента 1600 мин⁻¹ и максимальной мощности 2100 мин⁻¹. Установлено, что достижение норм выбросов вредных веществ возможно: на дизелях

Адрес для переписки

Кухаренок Георгий Михайлович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-81-86
kux@tut.by

Address for correspondence

Kuharonak Georgy M.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-81-86
kux@tut.by

мощностью 116 кВт с использованием топливной аппаратуры непосредственного действия и с полуоткрытой камерой сгорания; на дизелях мощностью 156 кВт с использованием системы топливоподачи Common Rail типа Low Cost и открытой камерой сгорания.

Ключевые слова: дизель, вихревое отношение, камера сгорания, система топливоподачи, распылитель топлива

Для цитирования: Организация рабочего процесса шестицилиндрового тракторного дизеля / Г. М. Кухаренок [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 427–433. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-427-433>

Introduction

The diesel engine building is one of the main areas of mechanical engineering developed recently in the Republic of Belarus. Minsk Motor Plant is the oldest enterprise in the republic, which produces multi-purpose diesel engines in a wide power range (Fig. 1) for 56 years. The enterprise development strategy, implemented within the framework of plant and state scientific and technical programs, is aimed at producing competitive

products that meet modern technical requirements of international standards and quality [1].

The technical regulations of the Customs Union require newly manufactured or imported new tractors diesel engines to comply with Stage 3A environmental standards, which should increase the demand for diesel engines of this ecological class [2–9]. Two modifications of six-cylinder tractor diesel engines are currently in greatest demand: D-260.1S3A with a power of 116 kW and D-260.4S3A with a power of 156 kW.

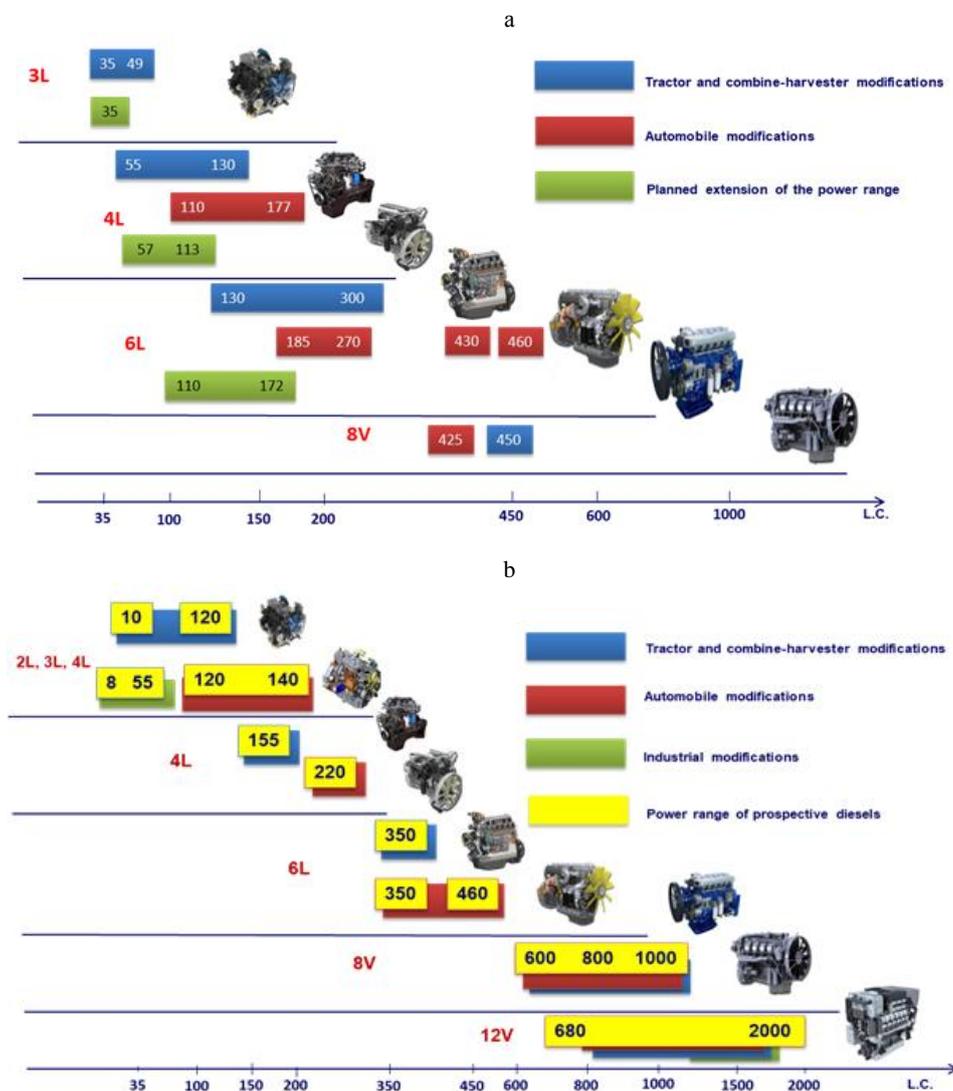


Fig. 1. Power range of the engines manufactured by Minsk Motor Plant: a – serial engines; b – promising

Main part

The environmental performance of the Stage 3A level is achieved mainly by coordinating the combustion chamber shape, the fuel supply equipment parameters, the intake ports swirl ratio, the valve timing and the use of exhaust gas recirculation (EGR) [1, 10–16].

D-260 engines use cylinder heads with two valves per cylinder, which should ensure the simplicity of the gas distribution mechanism design and maintenance. The somewhat increased resistance of the gas exchange channels is compensated to some extent by engine boost. The inlet channels are bifunctional – screw. When profiling the channels, the correctness of the adopted structural decisions is checked by 3D-modeling of the gas flow at given pressure drops (Fig. 2) with the determination of air flow and the average angular velocity of the air charge.

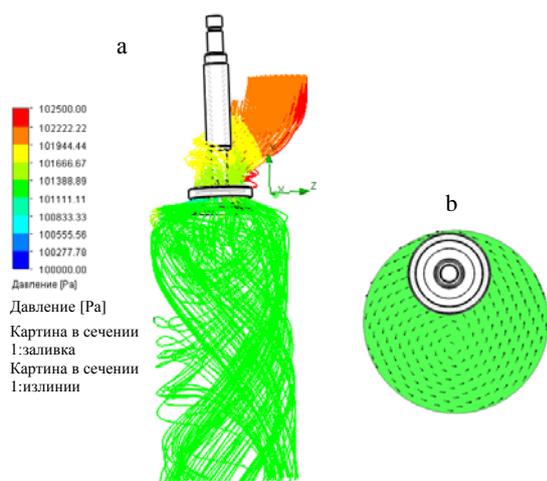


Fig. 2. Results of the inlet channel virtual purge: a – pressure distribution; b – velocity field in the outlet section

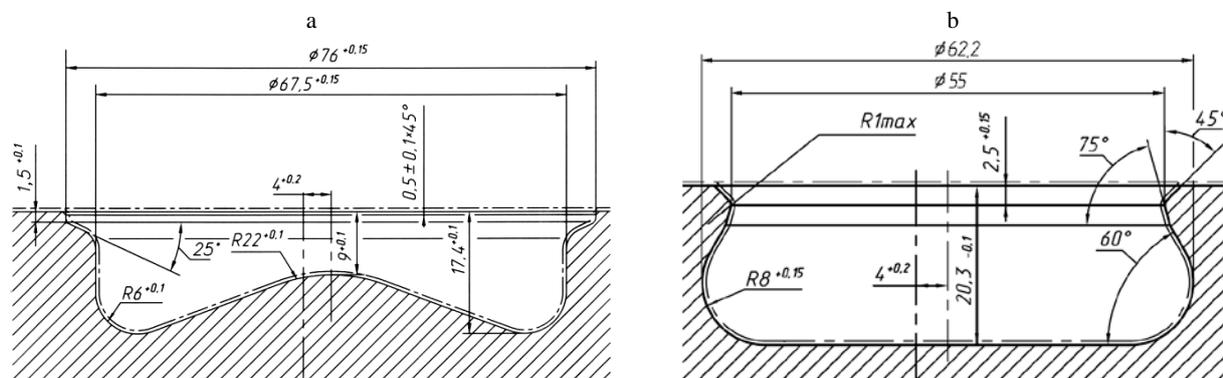


Fig. 3. Combustion chambers: a – open combustion chamber; b – semi-open combustion chamber

The mathematical model of a viscous heat-conducting fluid flow is based on the Navier – Stokes equations system, combining the laws of mass, momentum and energy conservation of a fluid in an unsteady setting [17–21].

To control the parameters of the cast heads inlet channels, a non-motorized purge stand with a straightening grate is used [22]. Typically, the data of virtual and natural purges differ by no more than 5 %. For D-260 engines, the head designs have been developed that provide an air swirl generation at the inlet with a swirl ratio of 3.0–4.0 and 3.5–4.5.

Heads with a lower swirl ratio are used on engines equipped with accumulator fuel systems with high injection rates and open combustion chambers (Fig. 3a) [23, 24]. Large swirl ratios are used for engines with direct-acting fuel equipment and a semi-open combustion chamber (Fig. 3b) [25].

The commercially available satisfying Stage 3A environmental standards six-cylinder D-260 diesel engines are equipped with: BOSCH Common Rail fuel supply system with electronic control; pistons with an open combustion chamber; a cylinder head with a screw inlet channel providing a swirl ratio $H = 3.0\text{--}4.0$; unregulated turbo charging. Low pressure EGR is used to reduce NO_x emissions [26].

In order to increase the competitive attractiveness of six-cylinder engines, it was decided to use fuel supply systems of a lower price category – a fuel supply system with a direct-acting pump and a mechanical regulator manufactured by MOTORPAL. The fuel supply system layout with a direct-acting pump is shown in Fig. 4.

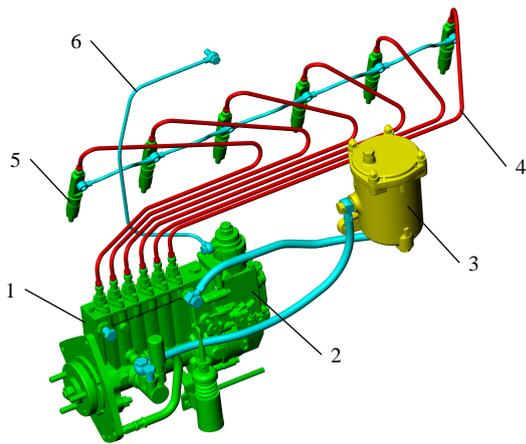


Fig. 4. Fuel supply system layout with a MOTORPAL pump:
 1 – high pressure fuel pump; 2 – speed governor;
 3 – fuel filter; 4 – high pressure fuel line; 5 – injector;
 6 – tube to the corrector for charge air pressure

The fuel pump 6M4330ZT (MOTORPAL, Czech Republic) with a diameter of 10 mm and a stroke of 14 mm of the plunger is equipped with a mechanical governor and a fuel feed corrector by the charge air pressure. The maximum fuel injection pressure is 100 MPa. When developing the working process on a 116 kW diesel engine, three sets of hydromechanical injectors were used:

- injectors VA70P360 with nozzles DOP147P528 ($\mu_f = 0.22 \text{ mm}^2$) (MOTORPAL, Czech Republic) (Fig. 5a) (for an open combustion chamber);
- injectors VA70P360 with sac-less nozzles DOP140P528 ($\mu_f = 0.18\text{--}0.20 \text{ mm}^2$) (MOTORPAL, Czech Republic) (Fig. 5b);

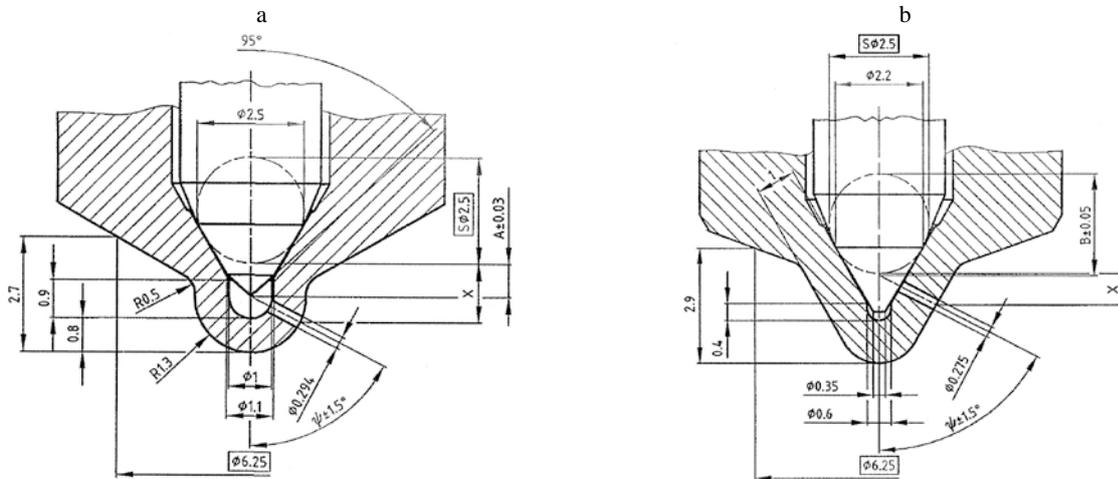


Fig. 5. Nozzle cone shapes: a – with a blind-hole (with a dead volume);
 b – with the exit of nozzle holes to the surface of the locking cone (sac-less nozzle)

- injectors AZPI 172.1112010-11.01 with nozzles AZPI 172.1112110-12.01 ($\mu_f = 0.23\text{--}0.25 \text{ mm}^2$).

Matching of the combustion chamber shape and the fuel flames location was carried out using 3D-models [24, 27]. The places where the fuel jets axes meet the combustion chamber walls are shown in Fig. 6.

The comparative tests (Tab. 1) for the NRSC cycle showed the possibility of achieving emission standards for Stage 3A. The use of sac-less nozzles led to a decrease in fuel leakage and, as a consequence, to a decrease in nozzles coking, soot and CH_x hydrocarbons emissions [12, 28]. Tests of the D-260.4S3A diesel engine with direct-acting fuel equipment showed a high exhaust smoke level while ensuring the target NO_x emissions (Tab. 1) using the EGR. As a result, achieving the Stage 3A level for particulate emissions on a D-260.4 engine with a direct-acting fuel system with semi-open and open combustion chambers is not possible at this stage. Therefore, the proposed use of the type Low Cost Common Rail accumulator system.

The schematic diagram of the type Low Cost Common Rail system is shown in Fig. 7. It includes:

- the fuel pump CB 28;
- injectors CRIN2 with seven-hole nozzles A433 205 533 (jet cone angle $\delta = 147.6^\circ$ and a hydraulic flow of $500 \text{ cm}^3/30 \text{ s}/100 \text{ bar}$);
- the pressure accumulator LWRN18 with a maximum injection pressure of 1400 bar;
- the control unit EDC17CV54 with software version P_1142.3.0.0 for the Low Cost system.

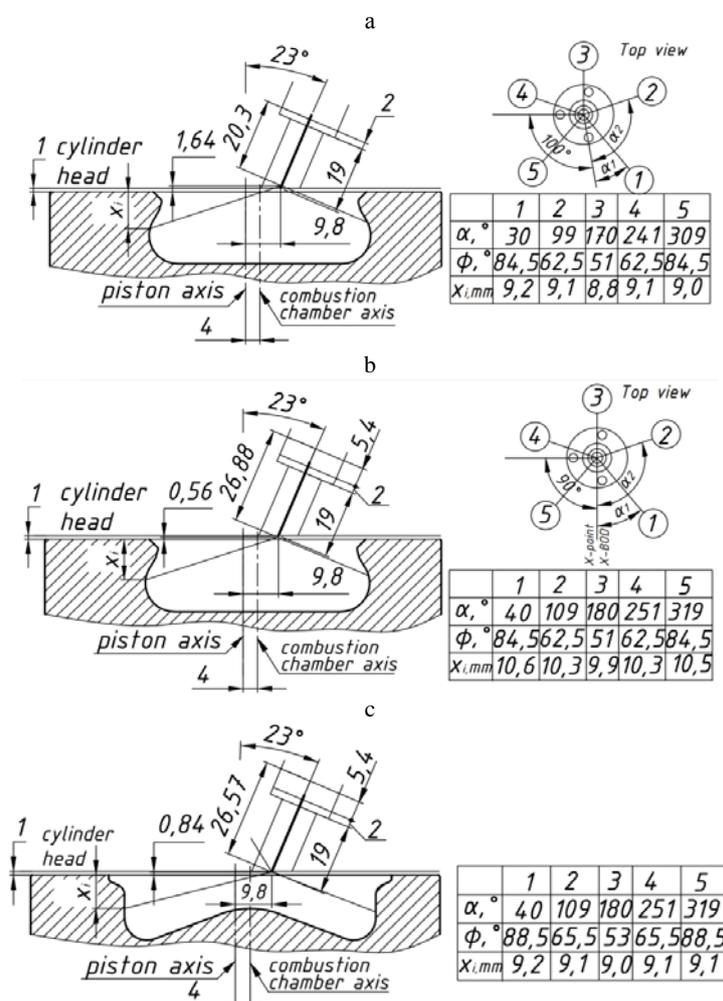


Fig. 6. Determination of the points of intersection of the fuel flames axes with the combustion chambers walls:
a – AZPI 172.1112110-12.01 nozzle; b – MOTORPAL DOP140P528; c – MOTORPAL DOP147P528

Table 1

**Results of D-260.1 and D-260.4 diesel engines comparative tests with various nozzles
and combustion chambers according to the NRSC cycle**

Diesel	Options	g_{CH} , g/(kW·h)	g_{NOx} , g/(kW·h)	g_{SC} , g/(kW·h)	g_{eRP} , g/(kW·h)	g_{eTmax} , g/(kW·h)	N_{RP} , %HSU	N_{Tmax} , %HSU
D-260.1S3A	Nozzles AZPI 172.1112110-12.01	0.48	3.43	0.240	228.4	204.9	7.9	9.1
	Nozzles DOP140P528	0.21	3.84	0.164	229.9	204.5	6.6	4.3
	UNECE Regulation No 96 (02)	4.0 ($NO_x + CH$)		0.300	–			
D-260.4S3A	Nozzles DOP140P528	–	3.42	0.360	229.3	215.6	16.5	17.8
	Nozzles DOP147P528, open combustion chamber	–	3.46	0.338	229.2	216.0	12.8	17.6
	UNECE Regulation No 96 (02)	4.0 ($NO_x + CH$)		0.200	–			

To increase the recirculation and turbocharging units reliability, a transition to the high-pressure EGR system, the diagram of which is shown in Fig. 8 [26, 29, 30]. In the high-pressure EGR system, the recirculated exhaust gases do not pass through the turbocharging units, which should have a positive effect on the operating

conditions of the charge air cooler and compressor. However, in order to obtain the required gas cooling depth, the size of the standard built into the catchment pipe cooler is not enough. Therefore, an additional EGR cooler (similar to the serial one with four-cylinder engines) is included in the experimental setup.

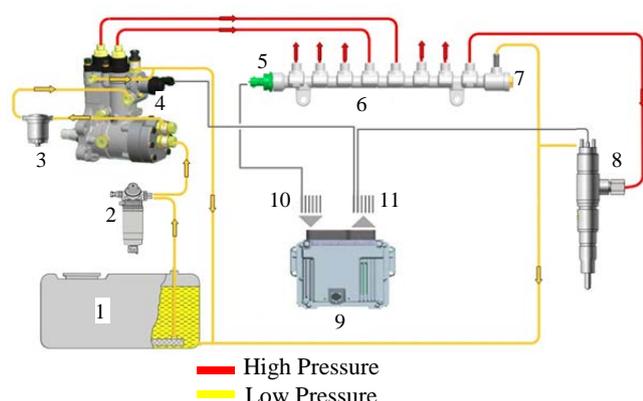


Fig. 7. Diagram of the Common Rail fuel system:
 1 – fuel tank; 2 – coarse filter; 3 – fine filter; 4 – fuel pump;
 5 – fuel pressure sensor; 6 – fuel rail; 7 – pressure-relief valve;
 8 – injector; 9 – electronic control unit;
 10 – signals from sensors; 11 – signals to actuators

Tests of six-cylinder diesel engines with the high-pressure EGR system showed the problem of organization the EGR gas flow in the right direction. In some operating modes, the charge air pressure is higher than the exhaust pressure upstream the turbine. To create the necessary

pressure difference, an additional rotary valve was introduced into the recirculation system, which prevents the free passage of exhaust to the turbine. As a result of testing a diesel engine with a Low Cost type Common Rail system and the rotary EGR valve, the rotary valve positions were determined and turbocharging units were selected to achieve Stage 3A level for exhaust emissions. The test results of the engine D-260.4S3A are presented in Tab. 2.

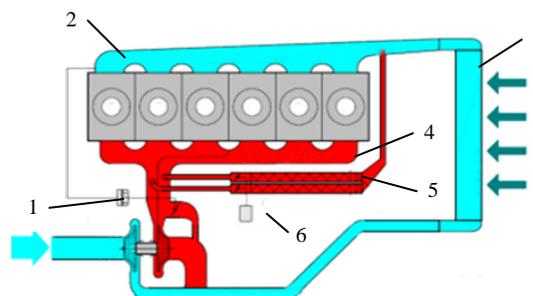


Fig. 8. Schematic diagram of the high-pressure EGR system: 1 – bypass valve; 2 – inlet manifold; 3 – charge air cooler; 4 – exhaust manifold; 5 – EGR cooler; 6 – rotary EGR valve

Table 2

Results of D-260.4S3A diesel tests with a Common Rail fuel system on the NRSC cycle

Parameters	Cycle Point								Per Cycle
	1	2	3	4	5	6	7	8	
n , rpm	2100	2100	2100	2100	1600	1600	1600	800	–
M_k , N·m	706	530	353	71	899	690	460	0	–
$\alpha_{EGRvalve}$, % op.	35	80	80	100	65	85	82	100	–
g_e , g/(kW·h)	220.5	227.1	243.4	472.6	221.7	219.7	227.9	–	–
N , %HSU	5.7	5.7	3.9	0.8	7.2	6.8	7.2	0.6	–
g_{NOx} , g/(kW·h)	4.61	2.57	2.00	3.25	4.39	2.47	1.69	–	3.30
g_{SC} , g/(kW·h)	0.136	0.146	0.111	0.031	0.148	0.141	0.168	–	0.138
UNECE Regulation No 96(02)	g_{NOx+CH_4} , g/(kW·h)								4.0
	g_{SC} , g/(kW·h)								0.2

CONCLUSION

Measures have been developed to organize the six-cylinder tractor diesel engines working process of the ecological level Stage 3A with high-pressure exhaust gas recirculation. It has been established that the achievement of emission standards on diesel engines with a power of 116 kW is possible using direct-acting fuel equipment and a semi-open combustion chamber. To comply with Stage 3A on 156 kW diesel engines, the use of a Low Cost type Common Rail fuel system with an open combustion chamber is required.

REFERENCES

1. Sevzdral S. P., Berezun V. I. (2013) State of Issue and Prospects for Development of Engine-Building in the Re-

public of Belarus. *Zhurnal Assotsiatsii Avtomobilnykh Inzhenerov = Zurnal AAI*, (6), 6–7 (in Russian).
 2. Eurasian Economic Commission (2012) TR TS 031/2012. *On Safety of Agricultural and Forestry Tractors and Trailers to Them*. Minsk, Ekonomenergo Publ. 60 (in Russian).
 3. United Nations (1986) *Agreement Concerning the Adoption of Uniform Conditions of Approval and Reciprocal Recognition of Approval for Motor Vehicle Equipment and Parts. Done at Geneva on 20 March 1958. Addendum 23: Regulation No 24 to be Annexed to the Agreement Revision 2 Incorporating the 03 Series of Amendments which Entered into Force on 20 April 1986*. Available at: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r024r2e.pdf>.
 4. United Nations (2013) *Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which Can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions. (Revision 2, Including the Amendments which Entered into Force on 16 October 1995). Addendum 95 –*

- Regulation No 96. Revision 2 – Amendment 1 Supplement 1 to the 03 Series of Amendments – Date of Entry into Force: 15 July 2013. Uniform Provisions Concerning the Approval of Compression Ignition (C.I.) Engines to be Installed in Agricultural and Forestry Tractors and in Non-Road Mobile Machinery with Regard to the Emissions of Pollutants by the Engine.* Available at: https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R09_6r2am1e.pdf.
5. Markov V. A., Bashirov R. M., Gabitov I. I. (2002) *Diesel Exhaust Gas Toxicity*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 376 (in Russian).
 6. Basshuysen R., Schäfer F. (2007) *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Auflage*. Wiesbaden, Vieweg & Sohn Verlag, 1032 (in German).
 7. Zvonov V. A., Zaigraev L. S., Chernykh V. I., Kozlov, A. V. (2004) *Ecology of Automotive Internal Combustion Engine*. Lugansk: Publishing House of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 268 (in Russian).
 8. Parsadanov I. V. (2003) *Improvement of Quality and Competitiveness of Diesel Engines Based on the Fuel and Environmental Criterion*. Kharkov, Publishing Centre of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. 244 (in Russian).
 9. Kulchitskii A. R. (2000) *Toxicity of Automotive and Tractor Engines*. Vladimir, Vladimir State University, 256 (in Russian).
 10. Kukharonak G. M., Berezun V. I. (2013) Diesel Emission Reduction. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov: Sbornik Nauchnykh Trudov* [Improvement in Organization of Traffic and Transport of Passengers and Goods. Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 314–323 (in Russian).
 11. Berezun V. I. (2013) High-Performance Energy-Efficient Engines for Off-Road Vehicles. *Problems and Prospects for Development of Transport Systems and Building Complex*. Gomel, Belarusian State University of Transportation, 157–158 (in Russian).
 12. Bosch R. (2004) *Diesel Engine Control Systems*. Moscow, Publishing House “Za Rulyom”. 480 (in Russian).
 13. Kukharonak G. M., Berezun V. I. (2018) Influence of Fuel Supply and Exhaust Gas Recirculation on Emissions of Harmful Substances from Diesel Engines. *Avtomobil'nyi Transport* [Automotive Transport], (42), 5–11 (in Russian).
 14. Kukharonak G. M., Petruchenko A. N., Berezun V. I. (2014) *Diesel Engine Emissions Reduction*. Moscow, Novoe Znanie Publ. 220 (in Russian).
 15. Kukharonak G. M., Sevizdral S. P., Berezun V. I. (2012) Provision of Environmental Indicators of Euro-4 and Euro-5 Level for Automobile Diesels of the Minsk Motor Plant. *Visti Avtomobilno-Dorozhniogo Institutu* [Bulletin of Automobile and Highway Institute], (1), 95–105 (in Russian).
 16. Kukharonak G. M., Berezun V. I. (2018) Improvement of Diesel Engine Workflow. *Izobretatel* [Inventor], (1), 37–40 (in Russian).
 17. Kukharonak G. M., Predko A. V. (2002) Mathematical Model of Rotation of Air Charge in Diesel Cylinder. *Vestnik BNTU* [Bulletin of Belarusian National Technical University], (4), 50–54 (in Russian).
 18. Predko A. V. (2006) Modeling Flow in Inlet of Internal Combustion Engine. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 4-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science for Education, Production, Economy. Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 262–265 (in Russian).
 19. Kukharonak G. M., Predko A. V., Yurchuk K. N. (2008) Determination of Parameters of Inlet Channels Using Virtual Bench in Purge. *Vmeste k Effektivnomu Dvizheniyu! Sb. Nauch. Statei Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. [Together for Effective Movement! Collection of Scientific Papers of International Scientific and Practical Conference]*. Minsk, Belarusian National Technical University, 262–265 (in Russian).
 20. Alyamovskii A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. (2005) *SolidWorks. Computer Modeling in Engineering Practice*. Saints-Petersburg, Publishing House “BKhV-Peterburg”. 800 (in Russian).
 21. Deich M. E. (1969) *Technical Gas Dynamics*. Moscow, Energiya Publ. 368 (in Russian).
 22. Predko A. V. (1995) Methods for Experimental Study of Swirling Inlet Channels. *Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya Nauki i Podgotovki Inzhenerov Vysokoi Kvalifikatsii v BGPA. Materialy Mezhdunar. 51-i Nauch.-Tekhn. Konf. BGPA* [State and Prospects for Development of Science and Training of Highly Qualified Engineers at Belarusian State Polytechnical Academy. Proceedings of the 51st International Scientific and Technical Conference at BSPA]. Minsk, Belarusian State Polytechnical Academy, 78–79 (in Russian).
 23. Kukharonak G. M., Petruchenko A. N., Berezun V. I. (2014) Choice of Diesel Engine Combustion Chamber Shape. *Visnik SevNTU* [Bulletin of Sevastopol National Technical University], (152), 65–68 (in Russian).
 24. Kukharonak G. M., Hershman D. G. (2011) Modeling of Characteristics for Fuel Jets and Parameters for Diesel Combustion Chamber. *Vestnik BNTU* [Bulletin of Belarusian National Technical University], (4), 35–39 (in Russian).
 25. Kukharonak G. M., Berezun V. I. (2014) Choice of Shape for Combustion Chamber of Diesel Engine with Low Injection Intensity. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov: Sb. Nauch. Tr.* [Improvement in Organization of Traffic and Transport of Passengers and Goods. Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 180–184 (in Russian).
 26. Kukharonak G. M., Berezun V. I. (2018) Influence of Fuel Supply and Exhaust Gas Recirculation on Emissions of Harmful Substances from Diesel Engines. *Avtomobil'nyi Transport* [Automotive Transport], (42), 5–11 (in Russian).
 27. Kukharonak G. M. (1999) *High Speed Diesel Workflow. Methods and Means of Improvement*. Minsk, Belarusian State Polytechnical Academy, 180 (in Russian).
 28. Grekhov L. V., Ivashchenko N. A., Markov V. A. (2004) *Fuel Equipment and Diesel Control System*. Moscow, Legion-Avtodata Publ. 344 (in Russian).
 29. Kukharonak G. M., Berezun V. I. (2014) Selection of Parameters for System of Diesel Engine Exhaust Gas Recirculation. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 57–63 (in Russian).
 30. Berezun V. I. (2014) Study of Methods for Organizing Exhaust Gas Recirculation. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 12-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Production, Economy: Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 56–57 (in Russian).

Received: 11.11.2020

Accepted: 25.01.2021

Published online: 30.09.2021

Научно-практические подходы к совершенствованию конструкций глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел

Докт. техн. наук, проф. В. Я. Груданов¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты Г. И. Белохвостов¹⁾, Л. Т. Ткачева¹⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Для совершенствования важнейших параметров рабочих органов глушителей шума предложен метод, основанный на использовании теории предпочтительных чисел. В результате многолетних научных исследований авторами установлена неизвестная ранее теоретическая взаимосвязь между основными рядами предпочтительных чисел, золотой пропорцией и числами ряда Фибоначчи. Рассмотрено новое направление в развитии теории чисел, составлена ее классификация, включающая в себя геометрическую теорию чисел, предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел, содержащая новый основной ряд предпочтительных чисел с применением последовательности Фибоначчи. Получены новые формулы для определения знаменателей геометрических прогрессий рядов предпочтительных чисел и площади круга. Определение площади круга по новой формуле позволяет получать более точные ее значения. Выведена также новая формула для определения длины окружности круга. Разработаны конструкции перфорированных перегородок, в которых использованы закономерности новых основных рядов предпочтительных чисел. Дано расчетное обоснование основных геометрических и конструктивных размеров глушителей шума с помощью математической модели перфорированной золотой перегородки и новых основных рядов предпочтительных чисел, позволяющее получить конструкцию глушителей шума, обладающих минимально возможным аэродинамическим сопротивлением при максимально возможном снижении уровня шума выпуска отработавших газов двигателей внутреннего сгорания. Предложена инновационная модель глушителя шума поршневых двигателей внутреннего сгорания с улучшенными гидравлическими и акустическими характеристиками на основе теории чисел. Теория предпочтительных чисел применима к любым техническим устройствам.

Ключевые слова: предпочтительные числа, ряды предпочтительных чисел, золотая пропорция, перфорированная перегородка, глушитель шума, отработавшие газы, двигатель внутреннего сгорания, инновационная модель глушителя шума

Для цитирования: Груданов, В. Я. Научно-практические подходы к совершенствованию конструкций глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 434–444. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-434-444>

Scientific and Practical Approaches to Improving Noise Muffler Designs of Piston Internal Combustion Engines Based on Theory of Numbers

V. Y. Grudanov¹⁾, G. I. Belokhvastov¹⁾, L. T. Tkacheva¹⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A methodological method based on the use of the theory of preferred numbers has been proposed in order to improve the most important parameters of the working bodies of noise mufflers. As a result of many years of scientific research, the authors have established a previously unknown theoretical relationship between the main series of preferred numbers,

Адрес для переписки
Белохвостов Геннадий Иванович
Белорусский государственный
аграрный технический университет
просп. Независимости, 99,
220023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 373-83-74
gbelohvostov@gmail.com

Address for correspondence
Belokhvastov Guennadi I.
Belarusian State
Agrarian Technical University
99, Nezavisimosty Ave.,
220023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 373-83-74
gbelohvostov@gmail.com

golden ratio and Fibonacci series numbers. A new direction in the development of number theory has been considered in the paper, its classification has been compiled, including the geometric theory of numbers, preferred numbers, containing a new basic series of preferred numbers using the Fibonacci sequence. New formulas have been obtained to determine the denominators of geometric progressions for the series of preferred numbers and the area of a circle. Determining the area of a circle using the new formula allows to get more accurate values. A new formula for determining the circumference of a circle has also been derived. The designs of perforated partitions have been developed, in which the laws of the new basic series of preferred numbers are used. Determining the area of a circle using the new formula allows you to get more accurate values. A new formula for determining the circumference of a circle is also obtained. The designs of perforated partitions have been developed, in which the regularities of the new basic series of preferred numbers have been used. A calculated substantiation of the main geometric and structural dimensions of noise mufflers is given using a mathematical model of a perforated golden partition and new basic series of preferred numbers, which allow to obtain a noise muffler design that has the lowest possible aerodynamic resistance with the maximum possible reduction in the noise level of exhaust gases from internal combustion engines. An innovative model of a noise muffler for reciprocating internal combustion engines with improved hydraulic and acoustic characteristics based on the theory of numbers is proposed in the paper. The theory of preferred numbers applies to any technical device.

Keywords: preferred numbers, series of preferred numbers, golden ratio, perforated partition, noise muffler, exhaust gases, internal combustion engine, innovative model of noise muffler

For citation: Grudanov V. Y., Belokhvostov G. I., Tkacheva L. T. (2021) Scientific and Practical Approaches to Improving Noise Muffler Designs of Piston Internal Combustion Engines Based on Theory of Numbers. *Science and Technique*. 20 (5), 434–444. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-434-444> (in Russian)

Введение

Основные источники акустического загрязнения – автомобильный транспорт, строительно-дорожные и сельскохозяйственные машины. Большинство транспортных средств оборудуется двигателями внутреннего сгорания (ДВС), при работе которых возникает шум высокой интенсивности. Этот шум как излучается в окружающую среду, приводя к акустическому загрязнению, так и проникает в кабины, на рабочие места операторов, создавая угрозу здоровью работающих. Масштабы воздействия акустического загрязнения в городах огромны – от 30 до 50 % населения подвергаются действию шума, превышающего нормативные значения. Повышенный шум, по данным специалистов, – причина почти 30 % заболеваний в городах, где акустическое загрязнение, характеризуемое эквивалентным уровнем звука, достигает 70–75 дБА (норма в дневное время 55 дБА). То есть превышение достигает 15–20 дБА, или в три-четыре раза больше по субъективному ощущению громкости.

Повышенный шум, действию которого подвергаются операторы транспортных машин, при длительном воздействии приводит к ухудшению слуха (и даже к тугоухости), снижению работоспособности. В биологическом отношении шум – заметный стрессовый фактор, способный вызвать срыв приспособительных реакций. Акустический стресс может привести к разным проявлениям – от функциональных

нарушений регуляции центральной нервной системы до морфологически обозначенных дегенеративных деструктивных процессов в разных органах и тканях.

К основным источникам шума транспортных машин, оборудованных ДВС, относится шум выпуска. Шум незаглушенного выпуска может достигать 140 дБА (болевой порог), что во много раз превосходит шум всех остальных источников. Поэтому все без исключения транспортные машины оборудуются глушителями шума двигателей внутреннего сгорания. Глушители шума – неотъемлемая часть выпускной системы ДВС. Анализ современных тенденций в их проектировании указывает на наличие большого числа технических решений в зависимости от размерности и характеристики выпускаемых ДВС [1].

Постановка проблемы

Автомобильный глушитель выполняет следующие основные функции:

- снижает уровень шума отработавших газов;
- преобразовывает энергию отработавших газов, снижает их скорость, температуру, пульсацию.

Глушители по принципу действия разделяются на:

- активные (диссипативные), где звуковая энергия превращается в тепловую при прохож-

дении волны через сопротивление (сетки, перфорированные листы, звукопоглощающие материалы). Они эффективно заглушают высокочастотный шум. При этом эффективность глушителя с перфорированными листами выше, чем у глушителя со звукопоглощающим материалом, однако первый глушитель имеет большее сопротивление;

- реактивные, представляющие собой одну или несколько расширительных камер либо ряд резонансных камер, где амплитуда колебаний газа снижается вследствие расширения потока газа либо резонансных явлений соответственно. Они эффективно заглушают низкочастотный шум. Часто глушители формируют из элементов обоих типов. Включение в систему газообмена нейтрализатора отработавших газов также благоприятно влияет на уменьшение шума выпуска.

Разработка глушителей шума выпуска – важное направление шумозащиты транспортных машин. Над проектированием и производством глушителей работают множество фирм и специалистов. В этой области отсутствует сколько-нибудь серьезная унификация, почти к каждой новой транспортной машине создается свой глушитель. Несмотря на многообразие технических решений, до настоящего времени не создана единая научно обоснованная методика расчета геометрических параметров перфорации внутренних элементов глушителя, что существенно усложняет их разработку.

Проектирование глушителей на большинстве предприятий, специализирующихся на их производстве, проводится на основе выполнения экспериментальных работ, связанных со значительными материальными затратами, когда разработчик, основываясь на своем опыте, изготавливает несколько опытных образцов глушителей, проводит их стендовые испытания и уже на их основе выбирает лучший вариант. Данный подход далеко не всегда приводит к желаемому результату, вследствие чего подготовленные к производству глушители в большинстве случаев нуждаются в дальнейшей доработке. Таким образом, сдерживается создание перспективных моделей на модульном принципе конструирования, затрудняются стандартизация и унификация глушителей.

Несмотря на повсеместную эксплуатацию глушителей шума для ДВС различных видов (реактивных, отражательных, резонаторных, диссипативных, особенно диссипативно-реактивных) [2], процесс снижения уровня шума выпуска отработавших газов не является совершенным и связан с высокими энергозатратами, вызывающими падение эффективной мощности двигателя. Кроме того, даже с учетом различных исследований [3, 4], до настоящего времени нет единой научно обоснованной методологической основы для расчета, проектирования и конструирования глушителей шума. При наличии огромного количества их конструкций создание осуществляется бессистемно, по частным эмпирическим инженерным методикам с привлечением большого количества поправочных коэффициентов, не отражающих реальные рабочие процессы, проявляющиеся, например, в диссипации энергии движения газов – процессе рассеивания части механической энергии и превращения ее в теплоту трения. Наиболее близкими к решению поставленной проблемы являются технические проекты глушителей шума ДВС, показанные на рис. 1, 2 [5, 6].

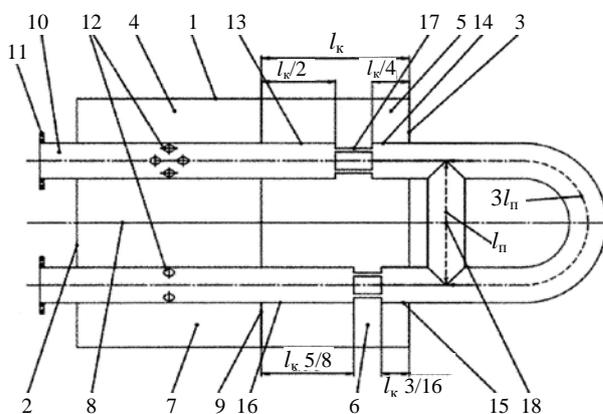


Рис. 1. Принципиально-конструктивная схема реактивного глушителя шума [5]: 1 – корпус; 2, 3 – стенка; 4, 5, 6, 7 – камера; 8, 9 – продольная и поперечная перегородки; 10 – труба с-образной формы; 11 – фланцевое соединение; 12 – отверстие перфорации; 13, 14, 15, 16 – расширительная камера; 17 – прямоугольное окно; 18 – перемыкающий канал; l_k, l_n – длина расширительной камеры и перемычки

Fig. 1. Principle-constructive diagram of reactive noise muffler [5]: 1 – body; 2, 3 – wall; 4, 5, 6, 7 chamber; 8, 9 – longitudinal and transverse partitions; 10 – C-shaped pipe; 11 – flange connection; 12 – perforation hole; 13, 14, 15, 16 – expansion chamber; 17 – rectangular window; 18 – bridging channel; l_k, l_n – length of expansion chamber and bridge

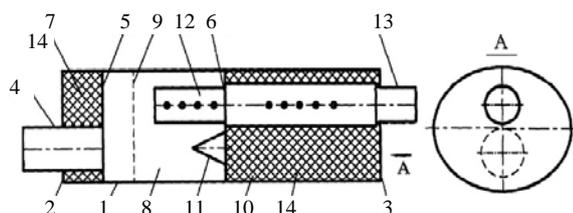


Рис. 2. Принципиально-конструктивная схема диссипативно-реактивного глушителя шума [6]:
 1 – овалный корпус; 2, 3 – основание; 4, 13 – входной и выходной патрубки; 5, 6 – перегородка; 7, 8 – входная и расширительная камеры; 9 – сетка; 10 – заглушающая камера; 11 – кожух; 12 – перфорированная труба; 14 – звукопоглощающий материал

Fig. 2. Principle-constructive diagram of dissipative-reactive noise muffler [6]:

- 1 – oval body; 2, 3 – base; 4, 13 – input and outlet pipes; 5, 6 – partition; 7, 8 – entrance and expansion chambers; 9 – net; 10 – blanking chamber; 11 – jacket; 12 – perforated pipe; 14 – sound absorbing material

Необходима новая концепция в подходах и принципах конструирования энергосберегающих и высокоэффективных в части шумоглушения, а также компактных и максимально унифицированных глушителей шума. Для ее разработки целесообразно использовать закономерности и свойства теории чисел [7, 8]. При этом достигаются наилучшие массовые, габаритные и энергетические характеристики. Открываются широкие возможности для унификации и стандартизации узлов и деталей при

их высокой компактности, а также интегрирования вновь создаваемого объекта в мировую систему конструирования новой техники.

Предмет теории чисел

Человечество не может существовать без чисел, их значение невозможно переоценить. Причем не только в современном обществе, основанном на цифровых технологиях, но и в доисторические времена системы счисления – фундаментальная основа цивилизации, на которой базируются такие понятия, как «счет», «упорядочивание», «измерение», «кодирование», «моделирование», «оптимизация» и др.

Существует несколько определений понятия «теория чисел». Одно из них гласит, что это специальный раздел математики (или высшей арифметики), который подробно изучает целые числа и объекты, сходные с ними. Другое определение уточняет, что этот раздел математики изучает свойства чисел и их поведение в различных ситуациях. Некоторые ученые считают, что теория настолько обширна, что дать ее точное определение невозможно, а достаточно лишь разделить на несколько менее объемных теорий. С учетом последних достижений современная классификация направлений в теории чисел представлена на рис. 3.

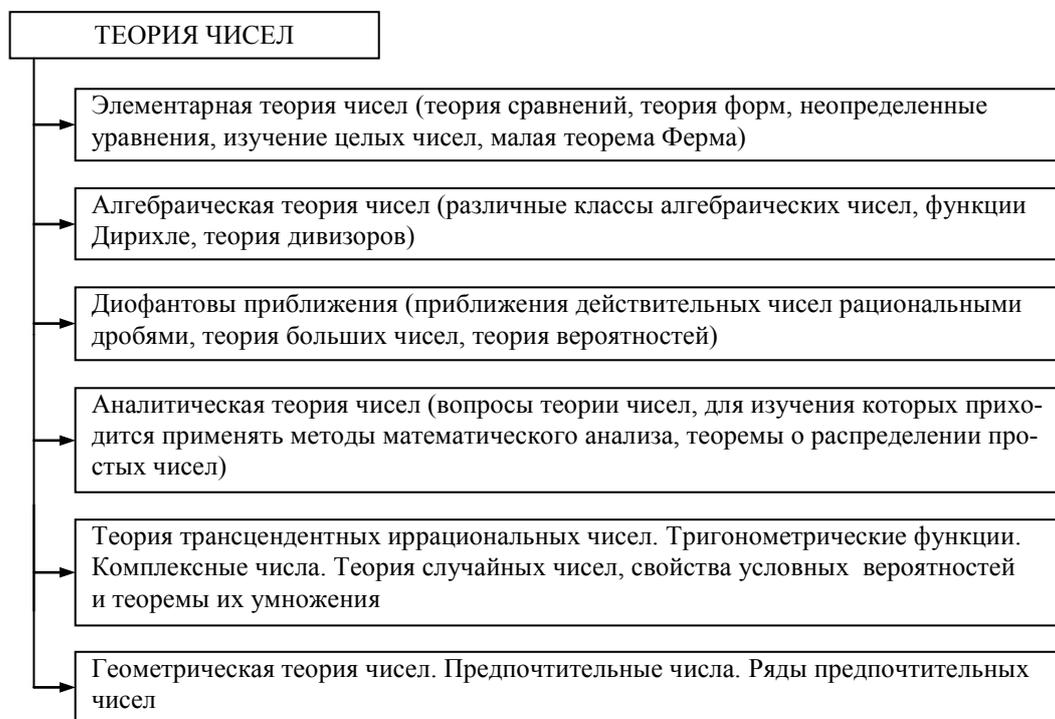


Рис. 3. Современные направления в развитии теории чисел

Fig. 3. Modern trends in development of number theory

Множество направлений теории чисел находят применение на практике – в теории телефонных сетей (кабелей), в кристаллографии, при решении некоторых задач теории приближенных вычислений. Однако наибольший интерес представляют геометрическая теория чисел и создание на ее основе системы рядов предпочтительных чисел. Покажем применение геометрической теории чисел конкретно в конструкциях глушителей шума [7, 8].

Предпочтительные числа.

Ряды предпочтительных чисел

Предпочтительные числа – это тщательно и научно подобранные цифровые величины, которыми рекомендуется пользоваться при конструировании вновь создаваемых технических объектов и устройств в соответствии с ГОСТ 8032–84 (СТ СЭВ 3961–83). Предпочтительные числа устанавливают взаимосвязь в параметрах деталей и узлов, размеры продукции и сооружений, мощность, грузоподъемность, массовые характеристики, геометрические размеры и т. п. [10].

Известные ряды предпочтительных чисел основаны на принципе геометрической прогрессии. Согласно определению, предпочтительные числа – система параметрических десятичных рядов чисел, построенных по геометрической прогрессии со знаменателем $q_n = \sqrt[n]{10}$, где $n = 5$ (10, 20, 40, 80) – номера рядов, безграничных как в большую, так и в меньшую сторону и обладающих свойствами, которые позволяют применять их при выборе основных и базовых размеров, параметров и характеристик изделий.

В соответствии с ГОСТ 8032–84 ряды предпочтительных чисел подразделяются на основные, дополнительные, выборочные, составные, приближенные, производные и специальные. Однако определение знаменателей геометрических прогрессий по формуле $q_n = \sqrt[n]{10}$ не имеет достаточно полного научного обоснования. По этой причине некоторые ученые и специалисты считают использование рядов пред-

почтительных чисел в конструировании технических устройств неправомерным. Но если обратиться к научным трудам итальянского математика Леонардо Пизанского (Фибоначчи), можно увидеть, что существует теоретическая взаимосвязь между основными рядами предпочтительных чисел, золотой пропорцией и последовательностью Фибоначчи, заключающаяся в том, что значение знаменателей геометрических прогрессий основных рядов можно определить по формуле $q_n = \sqrt[n]{\Phi}$, где q_n – значение знаменателя геометрической прогрессии n -го основного ряда предпочтительных чисел; $\Phi = 1,618\dots$ – значение золотой пропорции (сечения); n – целые числа 1, 2, 4, 8, 16.

При использовании формулы $q_n = \sqrt[n]{\Phi}$ получаем новый ряд предпочтительных чисел: 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610 и т. д., который совпадает с последовательностью Фибоначчи. Эта последовательность чисел, описанная итальянским математиком в XIII в., начинается с двух единиц, а каждое следующее число равно сумме двух предыдущих.

Частное от деления любого числа последовательности на предшествующее ему число будет стремиться к Φ , давая все более точное значение для каждого следующего числа последовательности. Для практических расчетов приближенное значение Φ с точностью до пяти десятичных знаков после запятой вполне достаточно, т. е. $\Phi = 1,61803$. Отметим, что $(\Phi)^2 = 2,618$, $\sqrt{\Phi} = 1,272$, $\sqrt[4]{\Phi} = 1,128$ и т. д.

Современная классификация рядов предпочтительных чисел представлена на рис. 4.

Из классификации видно, что новые основные ряды предпочтительных чисел практически полностью совпадают с основными рядами предпочтительных чисел по ГОСТ 8032–84, но при этом значение знаменателей геометрических прогрессий является более точным, что и обуславливает достижение технического совершенства нового устройства [7, 8].

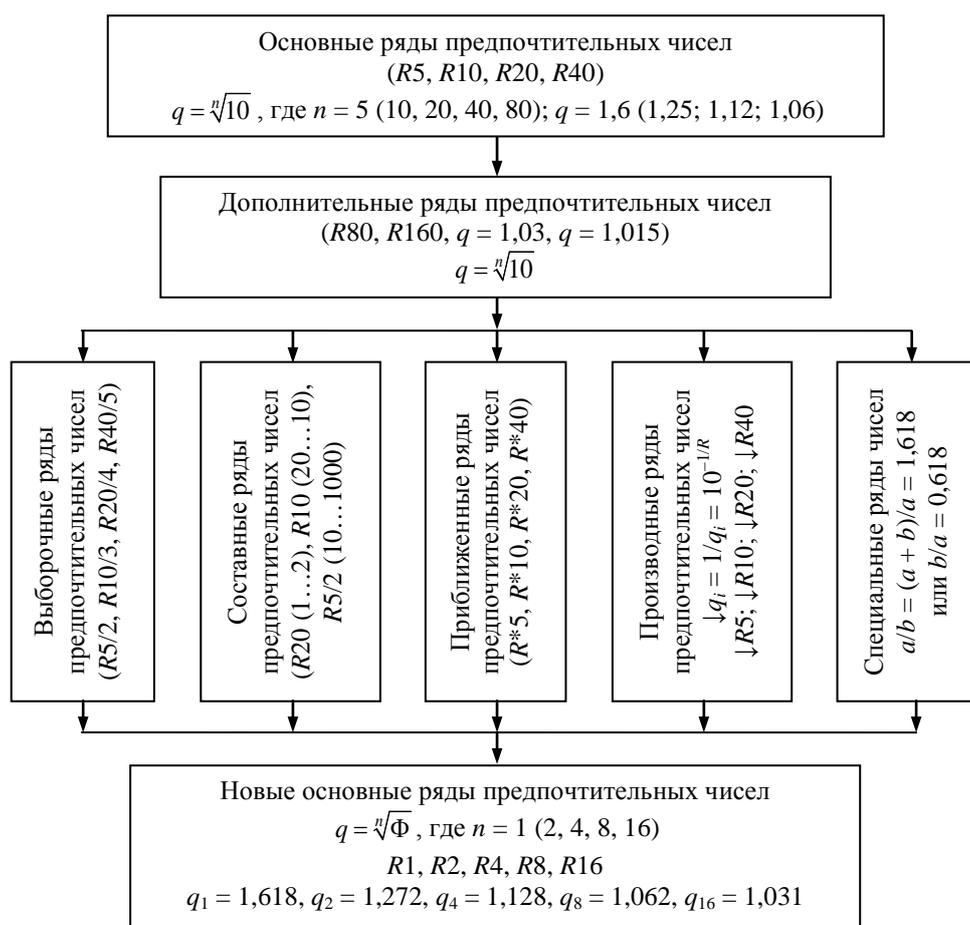


Рис. 4. Современная классификация рядов предпочтительных чисел

Fig. 4. Modern classification of series of preferred numbers

Перфорированная перегородка. Построение математической модели

Рассмотрим, как новые основные ряды предпочтительных чисел можно использовать в построении математической модели перфорированной перегородки и в целом конструкции глушителей шума [11–15].

Перфорированная перегородка – главный рабочий элемент глушителей шума. Основная характеристика перегородки – пропускная способность, которая определяется отношением площади живого (проходного) сечения всех отверстий к общей площади перегородки. При этом особое значение имеет характер расположения отверстий:

- по вершинам равносторонних треугольников;
- по вершинам квадратов;
- по концентрическим окружностям и др.

Для построения математической модели с целью оптимизации конструкции принимаем концентрическое расположение отверстий (рис. 5) при условии, что площадь круга $F (S_{кр})$ будем определять не через π , а через Φ – по формуле $F = D^2/\sqrt{\Phi}$, где D – диаметр круга, м.

С целью достижения максимальной пропускной способности перегородки и стабилизации потока газов ее рабочую поверхность делим на n -е количество условных колец. Отверстия располагаем на центральных радиусах каждого условного кольца, при этом диаметр отверстий и их количество на каждом условном кольце принимаем из ряда чисел Фибоначчи, например: $d_0 = 3$ мм, $z_1 = 13$, $z_2 = 21$, $z_3 = 34$ и т. д. Шаг между отверстиями принимаем $t = 1,272d_0$. Тогда

$$R_n^u = (\sqrt{\Phi})^n \cdot R_0 = (1,272)^n R_0.$$

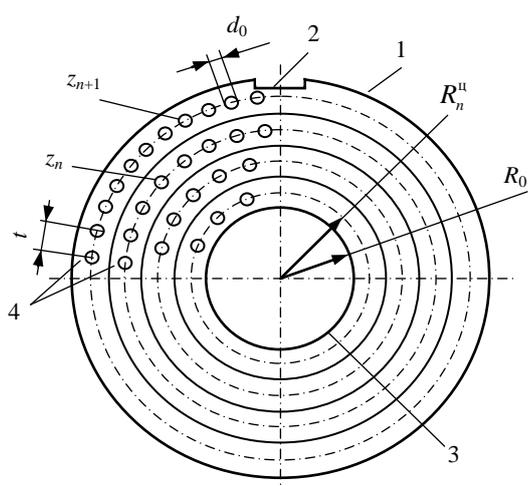


Рис. 5. Схема перфорированной перегородки (патент РФ № 2047368): 1 – корпус; 2 – шпоночный паз; 3 – центральное отверстие; 4 – отверстие перфорации; R_0 – радиус центрального отверстия; R_n^u – центральный радиус n -го условного кольца; t – шаг между отверстиями; d_0 – диаметр отверстий

Fig. 5. Perforated partition scheme (Patent of Russian Federation No 2047368): 1 – body; 2 – keyway; 3 – center hole; 4 – perforation hole; R_0 – center hole radius; R_n^u – central radius of the n^{th} conditional ring; t – step between holes; d_0 – hole diameter

Количество отверстий перфорации на условных кольцах увеличивается в направлении от центра к периферии и связано между собой соотношением

$$z_{n+1} = [1,618z_n],$$

где $n = 1, 2, 3, 4, \dots$; z_{n+1} – количество отверстий перфорации на $n + 1$ условном кольце; z_n – то же на n -м условном кольце, а квадратные скобки обозначают целую часть числа.

В результате получаем пропускную способность перегородки, равномерную по всей рабочей поверхности и максимально возможную. При этом наружный диаметр D перегородки определяем из формулы

$$F_n = D^2 / \sqrt{\Phi},$$

где F_n – общая площадь перегородки, м^2 .

Экспериментальная часть. Для подтверждения разработанной методики провели лабораторные исследования. Эксперименты выполняли на цилиндрической трубе диаметром 140 мм (использовали корпус глушителя шума автомобиля ГАЗ-52), внутри которой неподвижно устанавливалась перегородка.

Через трубу продувался воздух, нагнетаемый вентилятором типа ЦАГИ. Испытывали две пары перегородок с тремя рядами отверстий, расположенных в одном случае обычным традиционным способом, в другом – по соотношению золотого сечения. Общее количество отверстий в парах оставалось неизменным и соответственно составляло 42 и 68. Перегородки были изготовлены из пластмассы, тщательно отшлифованы и плотно закреплены в середине опытного участка трубы. В ходе опытов микроманометром типа ММН-2400(5)-1,0 измерялась величина статического давления до и после перегородки. Результаты экспериментов приведены в табл. 1, откуда следует, что расположение отверстий в перегородке, согласно разработанной методике, приводит к весьма существенному уменьшению потери давления: аэродинамическое сопротивление перегородки уменьшается в среднем на 4,65–6,25 % при скорости движения воздуха 6,6 м/с.

Таблица 1

Результаты экспериментов
Experimental results

Перегорodka	Число отверстий в рядах	Разность статического давления	Потери давления Δp , Па
Первая	10; 15; 17	1032	48
	8; 13; 21	984	
Вторая	16; 24; 28	576	36
	13; 21; 34	540	

Примечание. Число колец – три, скорость движения воздуха 6,6 м/с.

Таким образом, эксперименты подтверждают перспективность использования соотношения золотой пропорции в глушителях шума, поскольку уменьшение аэродинамического сопротивления поперечных перфорированных перегородок обуславливает снижение затрат эффективной мощности двигателя на прокачку газов через конструкцию.

Глушители шума.

Построение математической модели

Основными рабочими органами глушителя шума являются вертикальные перфорированные перегородки и горизонтальные перфорированные трубы, образующие систему резонансных камер. По ходу движения потока отработавших газов ДВС диаметр отверстий в трубах

и перегородках уменьшается, а их количество увеличивается, что совместно с резонансными камерами приводит к снижению скорости и соответственно уменьшению уровня шума (звукового давления). На рис. 6 представлена принципиально-конструктивная схема типового глушителя шума.

С целью оптимизации конструкции и достижения технического совершенства данного устройства конструктивные и геометрические параметры всех внутренних элементов глушителя целесообразно взаимоувязать между собой на основе теории чисел и с использованием математической модели перфорированной перегородки. Согласно этой новой модели, расчет глушителя шума осуществляется в приведенной ниже последовательности.

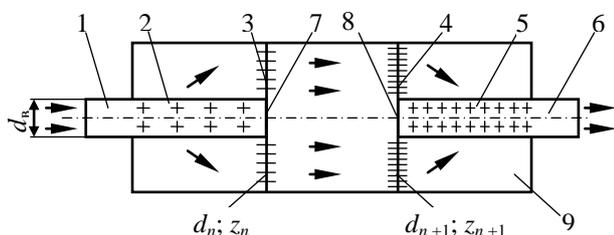


Рис. 6. Принципиально-конструктивная схема глушителя шума [15]: 1, 6 – впускной и выпускной патрубков; 2, 5 – входная и выходная центральные трубы; 3, 4 – входная и выходная поперечные перегородки; 7, 8 – заглушка; 9 – корпус глушителя; $d_{вп}$ – диаметр впускного патрубка; d_n – то же отверстий перфорации n -го внутреннего элемента; z_n – число отверстий перфорации в n -м элементе

Fig. 6. Principle-constructive diagram of noise muffler [15]: 1, 6 – inlet and outlet branch pipe; 2, 5 – inlet and outlet center pipes; 3, 4 – inlet and outlet transverse partitions; 7, 8 – plug; 9 – muffler body; $d_{вп}$ – diameter of inlet branch; d_n – diameter of perforation holes of n^{th} inner element; z_n – number of perforation holes in the n^{th} element

1. В качестве определяющего параметра глушителя принят диаметр впускного патрубка $d_{вп}$, площадь проходного сечения перфорации входной центральной трубы определяется в зависимости от площади поперечного сечения впускного патрубка F_1 диаметром $d_{вп}$

$$F_2 = \sqrt{\Phi} F_1.$$

2. Диаметры отверстий перфорации во внутренних элементах глушителя связаны между собой соотношением

$$d_n = \Phi d_{n+1},$$

где d_n – диаметр отверстий перфорации n -го внутреннего элемента глушителя, считая от впускного патрубка, м; n – порядковый номер

внутреннего элемента, считая от впускного патрубка.

3. Количество отверстий перфорации во внутренних элементах глушителя связано между собой соотношением

$$z_n = \frac{z_{n+1}}{\Phi^2}.$$

4. Расположение отверстий перфорации на входной 3 и выходной 4 перегородках (рис. 6) принимаем концентрическое. Радиусы окружностей, на которых расположены отверстия, определяются по формулам:

$$R_n = (1,272)^n R_0 \text{ или } R_n = (\sqrt{\Phi})^n R_0,$$

где R_n – радиус n -й окружности, на которой расположены отверстия, м; n – порядковый номер окружности, считая от оси глушителя; R_0 – радиус впускного патрубка, м.

5. Расположение отверстий перфорации на входной 2 и выходной 5 трубах (рис. 6) – шахматное с равномерным шагом как в поперечном, так и в продольном направлениях, при этом принимаем:

$$\frac{a}{b} = 1,618 \text{ или } \frac{a}{b} = \Phi,$$

где a , b – шаг перфорации в поперечном направлении и по длине трубы соответственно.

Расчет геометрических параметров глушителя шума по приведенным выше формулам позволяет получить одинаковые площади проходных сечений всех внутренних элементов по ходу движения газов, значение которых в 1,272 раза больше площади впускного патрубка. При этом существенно упрощается методика расчета, а в конструкции глушителя появляется системная, гармоничная и пропорциональная взаимосвязь внутренних элементов между собой [7, 8].

Экспериментальная часть. Данная методика была частично реализована в опытном образце глушителя шума, изготовленного и испытанного на Могилевском автомобильном заводе имени С. М. Кирова. Опытный образец изготавливали на базе серийного глушителя при неизменных габаритных и присоединительных размерах. Испытания проводили в загородной зоне на серийном скрепере МоА3-6014 с двигателем ЯМЗ-238 АМ2 при температуре окружающей среды 278 К (5 °С), средней скорости ветра 3,5 м/с и фоновом уровне шума 60 дБ(А). Результаты измерений (средние величины по трем измерениям) представлены в табл. 2.

Результаты измерений
Experimental results

Режим испытания	Число оборотов двигателя, об/мин	Температура отработавших газов на выходе, К (°С)	Гидравлическое сопротивление глушителя, Па	Уровень звукового шума*, дБ(А)
Без глушителя (труба)	600	608 (335)	96	87,0
	2000	706 (433)	640	107,0
Серийный глушитель	600	602 (329)	480	80,0
	2000	706 (433)	1520	95,5
Новый глушитель	600	596 (323)	320	80,0
	2000	706 (433)	1120	94,5

* Уровень звукового шума измеряли согласно ОСТ 23.3.23–88 на расстоянии 0,5 м от выпускного патрубка глушителя шума.

Обработку результатов испытаний проводили по методике, изложенной в [16]. При этом для оценки технического уровня и оптимизации конструкции глушителя шума использовали следующий комплекс относительных и удельных оценочных параметров:

– относительный объем глушителя: $V_{отн} = V_{гл}/iV_h$, где $V_{гл}$, V_h – объем глушителя и рабочий объем цилиндра двигателя; i – число цилиндров;

– удельное заглушение на единицу относительного объема [дБ(А)/ед. $V_{отн}$]: $\Delta L_{A(V)} = \Delta L_A/V_{отн}$;

– относительное гидравлическое сопротивление: $H_{отн} = H_1/H_2$, где H_1 , H_2 – гидравлическое сопротивление систем с глушителем и без него;

– удельное заглушение на единицу относительного сопротивления [дБ(А)/ед. $H_{отн}$]: $\Delta L_{A(H)} = \Delta L_A/H_{отн}$;

– относительный теплообмен: $T_{отн} = T_2/T_1$, где T_1 , T_2 – температуры отработавших газов на выходе, К.

В табл. 3 приведены основные комплексные оценочные параметры испытываемых глушителей шума. Как видно из таблицы, новый глушитель шума по всем основным оценочным параметрам имеет более совершенные тепловые, газодинамические и акустические характеристики, что свидетельствует о его высоком техническом уровне по сравнению с серийным.

На рис. 7 представлен макет предлагаемой конструкции глушителя шума поршневых ДВС на основе теории чисел.

В конструктивном отношении новый (модернизированный) глушитель шума имеет следующие преимущества:

– уменьшается количество внутренних деталей с восьми в серийном до четырех в новом исполнении, снижается масса с 19 до 17 кг, что упрощает конструкцию;

Таблица 3

Основные комплексные оценочные параметры
испытываемых глушителей шума
Main complex evaluation parameters
of tested noise mufflers

Оценочный параметр	Глушитель			
	Серийный		Новый	
	Число оборотов двигателя, об/мин			
	600	2000	600	2000
$V_{отн}$	2,698		2,698	
$\Delta L_{A(V)}$, дБ(А)/ед. $V_{отн}$	2,595	4,262	2,595	4,633
$H_{отн}$	5,000	2,375	3,333	1,750
$\Delta L_{A(H)}$, дБ(А)/ед. $H_{отн}$	1,400	4,842	2,100	7,143
$T_{отн}$	1,018	1,000	1,037	1,000
ΔL_A , дБ(А)	7,000	11,500	7,000	12,500
$\Delta L_{A(H, V_{гл})}$, дБ(А)/(ед. $H_{отн} \cdot \text{ед. } V_{отн}$)	0,519	1,795	0,778	2,647
$\Delta L_{A(H, V_{гл})}$, дБ(А)/(Па·м ³)	0,365	0,189	0,547	0,279
Масса, кг	19		17	

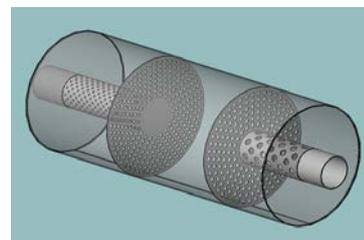


Рис. 7. Макет предлагаемой конструкции глушителя шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел

Fig. 7. Model of proposed design of noise muffler for piston internal combustion engines based on number theory

– улучшается производственная технологичность конструкции по размерам и формам поверхности внутренних деталей, сокращается число технологических операций и их унифи-

кация, снижаются затраты труда на изготовление и сборку;

– существуют технологическая и конструктивная преемственность, а также возможность унификации основных деталей глушителей семейства машин типа МоАЗ и создания параметрического ряда глушителей.

Вместе с тем необходимо отметить, что в новой конструкции глушителя шума из-за требования по неизменности размеров корпуса серийного глушителя не удалось в полной мере (65 %) на практике реализовать принцип золотой пропорции. В целом испытания показали, что расчет параметров перфорации по новой методике, основанной на применении принципа золотой пропорции и свойств чисел Фибоначчи, позволяет существенно повысить технический уровень конструкции глушителя в части снижения газодинамического сопротивления при стабильности шумоглушения [7, 8].

ВЫВОДЫ

1. Показаны основные направления развития теории чисел. Приведена современная классификация рядов предпочтительных чисел, на основе которых разработана математическая модель перфорированной перегородки и дано расчетное обоснование геометрическим и конструктивным параметрам глушителя шума активно-реактивного типа.

2. Предложена инновационная модель глушителя шума поршневых двигателей внутреннего сгорания с улучшенными гидравлическими и акустическими характеристиками на основе теории чисел [17]. Теория предпочтительных чисел применима к любым техническим устройствам [18–21].

3. Установлена теоретическая взаимосвязь между основными рядами предпочтительных чисел, золотой пропорцией и числами ряда Фибоначчи.

ЛИТЕРАТУРА

- Шатров, М. Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания / М. Г. Шатров, А. Л. Яковенко, Т. Ю. Кричевская. М.: МАДИ, 2014. 68 с.
- Шум. Руководство по снижению шума глушителями: ГОСТ 31328–2006 (ИСО 14163:1998). Введ. 01.04.2007. М.: Межгос. совет по стандарт., метрологии и сертиф., 2007. 66 с.
- Комкин, А. И. Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей с требуемыми характеристиками / А. И. Комкин. СПб.: Балтийский гос. техн. ун-т «Военмех» имени Д. Ф. Устинова, 2012. 48 с.
- Белоцерковский, С. В. Автомобильные глушители: современные требования, тенденции развития, методы расчета и испытаний / С. В. Белоцерковский, В. Е. Тольский // *Техническая акустика*. 2001. № 1. С. 30–37.
- Реактивный глушитель шума: пол. модель к пат. RU 171331 U1, МПК F01N13/02, F01N1/06 / С. Г. Смирнов, В. А. Николаева, А. И. Комкин, А. И. Быков. Оpubл. 29.05.2017.
- Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания: пат. RU 2243388 C2, МПК F01N1/24 / В. Л. Жданов, Э. Б. Куновский, А. П. Ракомсин, В. В. Корсаков, М. И. Горбачевич. Оpubл. 10.08.2004.
- Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей / В. Я. Груданов, Л. Т. Ткачева // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2017. Т. 57, № 4. С. 17–28.
- Бухштаб, А. А. Теория чисел / А. А. Бухштаб. М.: Просвещение, 1966. 384 с.
- Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Л. Т. Ткачева, Г. И. Белохвостов // *Горная механика и машиностроение*. 2020. № 4. С. 28–42.
- Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел: ГОСТ 8032–84 (СТ СЭВ 3961–83). Введ. 01.07.1985. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1987. 19 с.
- Воробьев, Н. Н. Числа Фибоначчи / Н. Н. Воробьев. М.: Наука, 1969. 216 с.
- Васютинский, Н. А. Золотая пропорция / Н. А. Васютинский. М.: Молодая гвардия, 1990. 238 с.
- Иванус, А. И. Код да Винчи в бизнесе, или Гармоничный менеджмент по Фибоначчи / А. И. Иванус. М.: Ленанд, 2005. 104 с.
- Фернандо, К. Золотое сечение. Математический язык красоты / К. Фернандо; пер. с англ. М.: Де Агостини, 2013. 160 с.
- Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания: пат. РФ 2056508 C1, МПК F01N1/08 / В. Я. Груданов, С. В. Акуленко. Оpubл. 20.03.1996 // *Открытия. Изобретения*. 1996. 9 с.
- Разумовский, М. А. Методика оценки технического уровня глушителей шума выпуска поршневых двигателей / М. А. Разумовский, А. Ф. Безручко, И. М. Мотыль // *Двигателестроение*. 1990. № 3. С. 37–38.
- Инновационная конструкция глушителя шума поршневых двигателей с улучшенными гидравлическими и акустическими характеристиками на основе теории чисел / руков. разработки В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов // *Инновации в машиностроении*. Бобруйск: БелИСА, 2019. С. 18–19.
- Вайтехович, П. Е. Моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования / П. Е. Вайтехович, В. С. Францкевич. Минск: БГТУ, 2014. 268 с.

19. Груданов, В. Я. Основы инженерного творчества / В. Я. Груданов. Минск: БГУ, 2005. 299 с.
20. Груданов, В. Я. Золотая пропорция в инженерных задачах / В. Я. Груданов. Могилев: Могилев. гос. ун-т имени А. А. Кулешова, 2006. 288 с.
21. Груданов, В. Я. Теория чисел в развитии машиностроительного комплекса Республики Беларусь / В. Я. Груданов, Е. Н. Филидович, Г. И. Белохвостов // Инженер-механик. 2020. № 1. С. 7–9.

Поступила 02.03.2021

Подписана в печать 25.05.2021

Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. Shatrov M. G., Yakovenko A. L., Krichevskaya T. Yu. (2014) *Noise of Automobile Internal Combustion Engines*. Moscow, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. 68 (in Russian).
2. State Standard 31328–2006 (ISO 14163:1998). *Noise. Manual on Noise Reduction with Mufflers*. Moscow, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2007. 66 (in Russian).
3. Komkin A. I. (2012) *Development of Modern Methods of Calculation and Design of Automobile Mufflers with the Required Characteristics*. Saint-Petersburg, Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D. F. Ustinov. 48 (in Russian).
4. Belotserkovsky S. V., Tolsky V. E. (2001) Car Mufflers: Modern Requirements, Development Trends, Calculation and Testing Methods. *Tekhnicheskaya Akustika = Technical Acoustics*, (1), 30–37 (in Russian).
5. Smirnov S. G., Nikolaeva V. A., Komkin A. I., Bykov A. I. (2017) *Reactive Silencer*. Gender Model for Patent RU No 171331 U1 (in Russian).
6. Zhdanov V. L., Kunovsky E. B., Rakomsin A. P., Korsakov V. V., Gorbatshevich M. I. (2004) *Internal Combustion Engine Silencer*. Patent RU No 2243388 C2 (in Russian).
7. Grudanov V. Ya., Tkachova L. T. (2017) Modeling and Optimization of Hydraulic and Acoustic Characteristics of Piston Engine Mufflers. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], 57 (4), 17–28 (in Russian).
8. Bukhshtab A. A. (1966) *Number Theory*. Moscow, Prosveshchenie Publ. 384 (in Russian).
9. Grudanov V. Ya., Tkachova L. T., Belokhvostov G. I. (2020) Modeling and Optimization of Hydraulic and Acoustic Characteristics of Piston Engine Noise Mufflers Based on Number Theory. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroenie = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, (4), 28–42 (in Russian).
10. State Standard 8032–84 Standard (Council for Mutual Economic Assistance 3961–83). *Preferred Numbers and Series of Preferred Numbers*. Moscow, USSR State Committee for Standards, 1987. 19 (in Russian).
11. Vorobiov N. N. (1969) *Fibonacci Numbers*. Moscow, Nauka Publ. 216 (in Russian).
12. Vasyutinsky N. A. (1990) *Golden Proportion*. Moscow, Molodaya Gvardiya Publ. 238 (in Russian).
13. Ivanus A. I. (2005) *The Da Vinci Code in Business, or Fibonacci Harmonious Management*. Moscow, Lenand Publ. 104 (in Russian).
14. Fernando K. (2013) *Golden Ratio. The Mathematical Language of Beauty*. Moscow, De Agostini Publ. 160 (in Russian).
15. Grudanov V. Ya., Akulenko S. V. (1996) *Internal Combustion Engine Silencer*. Patent Russian Federation No 2056508 C1 (in Russian).
16. Razumovsky M. A., Bezruchko A. F., Motyl I. M. (1990) Methodology for Assessing the Technical Level of Piston Engine Exhaust Silencers. *Dvigatelistroyeniye*, (3), 37–38 (in Russian).
17. Grudanov V. Ya., Belokhvostov G. I. (2019) Innovative Piston Engine Silencer Design with Improved Hydraulic and Acoustic Performance Based on Number Theory. *Innovations in Mechanical Engineering*. Bobruisk, Belarusian Institute of System Analysis, 18–19 (in Russian).
18. Vaytekhovich P. E., Frantskevich V. S. (2014) *Modeling and Optimization of Technological Processes and Equipment*. Minsk, Belarusian State Technological University. 268 (in Russian).
19. Grudanov V. Ya. (2005) *Fundamentals of Engineering Creativity*. Minsk, Belarusian State University. 299 (in Russian).
20. Grudanov V. Ya. (2006) *The Golden Proportion in Engineering Problems*. Mogilev, Mogilev State A. A. Kuleshov University. 288 (in Russian).
21. Grudanov V. Ya., Filidovich E. N., Belokhvostov G. I. (2020) Number Theory in the Development of the Machine-Building Complex of the Republic of Belarus. *Inzhener-Mekhanik* [Mechanical-Engineer], (1), 7–9 (in Russian).

Received: 02.03.2021

Accepted: 25.05.2021

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-445-448>

UDC 621.57

Automobile Absorption Conditioner

A. P. Ilyin¹, A. N. Terentiev¹, F. R. Arslanov²

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation),

²Izhevsk State Agricultural Academy (Izhevsk, Russian Federation)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Abstract. The purpose of this study is to develop a circuit for an automobile air conditioner, which will reduce the consumption of power developed by the engine. This paper proposes the design of an automobile absorption air conditioner. A description of the principle of operation of an automobile absorption air conditioner operating on a cycle of a one-stage absorption refrigeration machine has been given in the paper. It consists of a stripper (generator), a condenser, an absorber, an evaporator. Lithium bromide (LiBr) solution has been used as an absorbent, which has a low boiling point, is non-toxic and safe. 3D-models of the absorber and generator of an automobile absorption air conditioner has been developed in the course of the research. The absorber is designed to form a weak absorbent solution. This solution is supplied to the generator heat exchanger using a liquid pump. There it is heated by the exhaust gases to the boiling point. The solution evaporates and water vapor enters the condenser (evaporator). In the generator, the solution is concentrated from 52 to 60 %. After that, water vapor is supplied to the absorber from the condenser, and a concentrated absorbent solution is supplied from the generator. It should be noted that the generator is a key element of an automobile absorption air conditioning system. Inside it is a strong LiBr solution that feeds the absorber. The design of the air conditioning system does not provide for the use of a compressor and allows to reduce the power loss of the power plant to the drive of the liquid pump. According to calculations, the pump drive power was 0.17 kW. For comparison, the compressor of a modern car air conditioner consumes 7–11 kW. An absorption car air conditioner provides the following advantages: additional engine cooling, environmental friendliness, fuel economy, efficient use of the heat of vehicle exhaust gases. A distinctive feature of this design is that it is proposed to use the heat of the exhaust gases for the process of heating the absorbent. This design can fully compete with the existing modern car air conditioners.

Keywords: automobile conditioner, absorption bromide-lithium refrigerating machine, absorption, absorber, desorber, lithium bromide, exhaust gases

For citation: Ilyin A. P., Terentiev A. N., Arslanov F. R. (2021) Automobile Absorption Conditioner. *Science and Technique*. 20 (5), 445–448. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-445-448>

Автомобильный абсорбционный кондиционер

Кандидаты техн. наук, доценты А. П. Ильин¹, А. Н. Терентьев¹, Ф. Р. Арсланов²

¹Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация),

²Ижевская государственная сельскохозяйственная академия (Ижевск, Российская Федерация)

Реферат. Целью исследования являлась разработка схемы автомобильного кондиционера, позволяющего снизить потребление развиваемой двигателем мощности. Предложена конструкция и приведено описание принципа действия автомобильного абсорбционного кондиционера, работающего по циклу одноступенчатой абсорбционной холодильной

Адрес для переписки

Ильин Алексей Петрович
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
ул. Студенческая, 7,
426069, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +79 090 67-22-71
ilalp@inbox.ru

Address for correspondence

Ilyin Alexey P.
Kalashnikov Izhevsk State
Technical University
7, Studencheskaya str.,
426069, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +79 090 67-22-71
ilalp@inbox.ru

машины. Она состоит из десорбера (генератора), конденсатора, абсорбера, испарителя. В качестве абсорбента использовали раствор бромида лития (LiBr), который имеет низкую температуру кипения, не токсичен и безопасен. В процессе исследования разработаны 3D-модели абсорбера и генератора абсорбционного автомобильного кондиционера. Абсорбер предназначен для образования слабого раствора абсорбента, который при помощи жидкостного насоса поступает в теплообменник генератора, где нагревается отработавшими газами до температуры кипения. Раствор испаряется, и пар идет в конденсатор (испаритель). В генераторе раствор концентрируется от 52 до 60 %. После этого в абсорбер из конденсатора поступает водяной пар, а из генератора – концентрированный раствор абсорбента. Следует заметить, что генератор является ключевым элементом системы абсорбционного автомобильного кондиционера. Внутри него находится крепкий раствор LiBr, питающий абсорбер. Конструкция системы кондиционера не предусматривает использование компрессора и позволяет снизить потери мощности силовой установки на привод жидкостного насоса. Согласно расчетам, мощность привода насоса составила 0,17 кВт. Для сравнения, компрессор современного автомобильного кондиционера потребляет 7–11 кВт. Абсорбционный автомобильный кондиционер имеет следующие преимущества: дополнительное охлаждение двигателя, экологичность, экономию топлива, эффективное использование теплоты выхлопных газов автомобиля. Отличительная особенность данной конструкции в том, что для процесса нагрева абсорбента используется теплота отработавших газов. Такая конструкция может составить полноценную конкуренцию имеющимся современным автомобильным кондиционерам.

Ключевые слова: автомобильный кондиционер, абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина, абсорбция, абсорбер, десорбер, бромид лития, отработавшие газы

Для цитирования: Ильин, А. П. Автомобильный абсорбционный кондиционер / А. П. Ильин, А. Н. Терентьев, Ф. Р. Арсланов // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 445–448. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-445-448>

The car air conditioning system is actively progress. A lot of research is implement to improve the design. Much attention is pay to improving the evaporator heat exchanger and other details of existing systems [1, 2]. In addition, new air conditioning systems are being developed. For example, using an ejector [3]. Research is being conducted to select a new, more efficient type of refrigerants [4, 5]. The results of these studies, to one degree or another, solve the problem of improving the efficiency of the vehicle air conditioning system.

Air conditioning systems based on new principles are of great interest. These include systems based on an absorption refrigeration cycle. Ammonia or lithium bromide solution is considered as a refrigerant [6, 7].

A modern automobile conditioner averagely consumes from 3 up to 6 kW of power produced by the engine. The significant decrease of the mechanical losses on the conditioner drive can be achieved removing the compressor, which drives the cold carrier in the cooling system, from the system.

The conditioner adapted for the cycle of absorption bromide-lithium refrigerating machine (ABRM) can be used to produce cold, apart from the compression-type conditioner. In contrast to the compression method, where the single-phase cold carrier (freon) circulates in the refrigerating loop, in the absorption one the mixture of water and absorbent is used. Lithium bromide with low

boiling temperature (90 °C) is used as an absorbent. When moving along the refrigerating loop, this mixture splits into the components and then mixes again [8]. There is no compressor in ABRM design, the engine power is only consumed for the liquid pump drive providing the transport of strong and concentrated solution. ABRM functional scheme is given in Fig. 1.

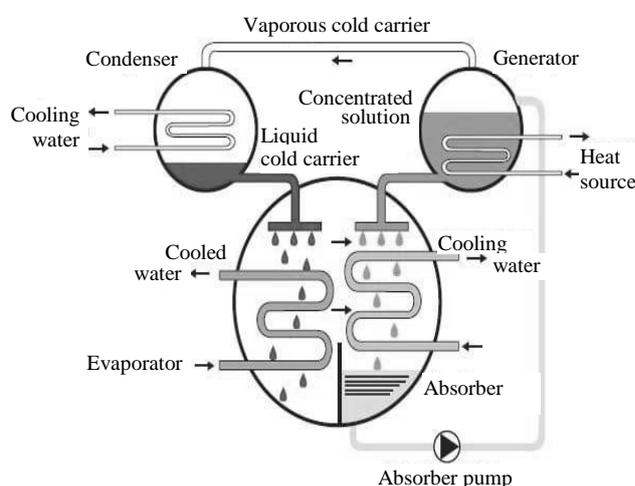


Fig. 1. Absorption bromide-lithium refrigerating machine functional scheme

The main elements of this device are: desorber (generator), condenser, absorber and evaporator. There are also auxiliary elements providing the reliability and safety of the refrigerating machine operation. These are different shutoff, throttle, solenoid valves and automation system.

The water vapor, formed under the action of cooled medium, comes from the evaporator to the absorber with the strong lithium bromide solution. As a result of water vapor and solution absorption, the concentration of the latter decreases [9, 10]. With the help of the liquid pump the weak solution is fed through the heat exchanger fixed on the exhaust pipe of the outlet header. Going through the heat exchanger, the solution is heated up and gets into the generator where it boils. The water vapor formed is fed into the condenser where it is condensed. The solution obtains low concentration again in the generator and gets into the absorber with the help of the bypass valve. Along the system pipes the condensate is fed into the evaporator. Thus the process cyclicity is provided.

The absorber (Fig. 2) is of closed type placed in one body with the evaporator. The desorber (generator) (Fig. 3) is the key element of the absorption automobile conditioner system. Strong LiBr solution, feeding the absorber, is inside the body.

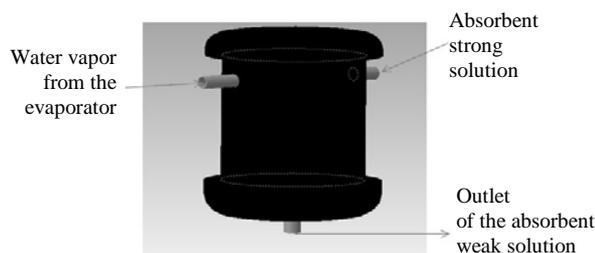


Fig. 2. Absorber 3D-model

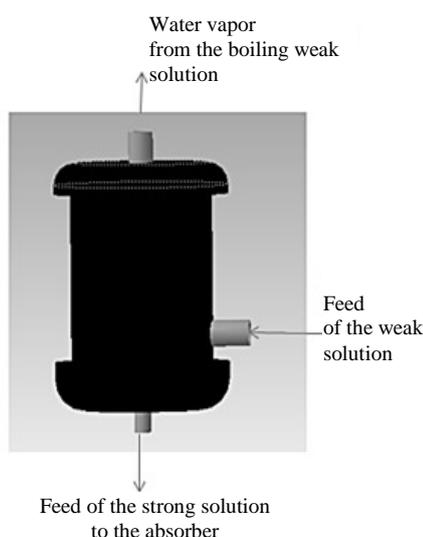


Fig. 3. Desorber 3D-model

The condenser (Fig. 4) consists of copper U-pipes, aluminum plates and brackets of galvanized steel. U-pipes are interconnected by the method of copper U-bends soldering. The couples in the heat exchanger pipes are permanently and uniformly blown by the outer air, which is fed by the fan.

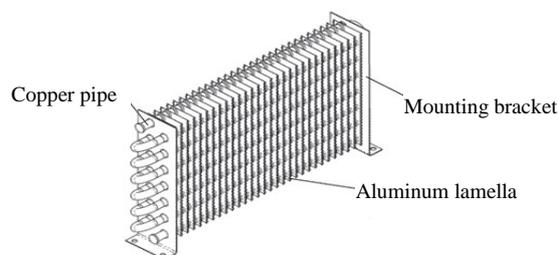


Fig. 4. Air-cooled condenser

The evaporator (Fig. 5) in absorption automobile conditioner is a starting point of the whole process. In the hot season, the warm outer air flows through the evaporator pipes with the help of the fan. As a result, the water circulating along the pipes starts evaporating producing water vapor, which is fed to the absorber via the special nozzle where it gets absorbed with LiBr solution.

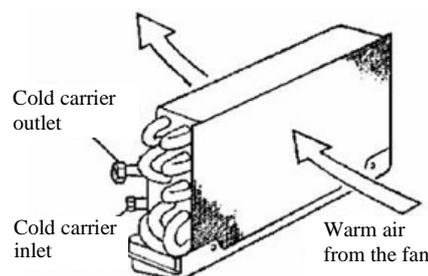


Fig. 5. Evaporator

Exhaust Gas Recirculation (EGR) is used in modern vehicles. This system is designed to improve engine efficiency and reduce fuel consumption [11]. One of the elements in the EGR-system is a shell-and-tube heat exchanger (Fig. 6), through the tubes of which the exhaust gases pass from the exhaust manifold of the engine.



Fig. 6. Exhaust Gas Recirculation heat exchanger

In this paper, it is proposed to introduce the EGR-system heat exchanger into the absorption cycle of the vehicle air conditioning system.

The liquid pump provides the forced cold carrier circulation in the absorption conditioner system. With its help, a weak LiBr solution is fed to the generator from the absorber. The automobile absorption conditioner design is given in Fig. 7.

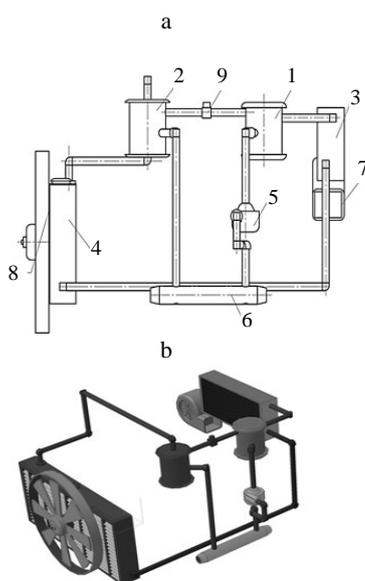


Fig. 7. Automobile absorption conditioner design:
a – schematic diagram; b – 3D-model of the conditioning system; 1 – absorber; 2 – desorber; 3 – evaporator; 4 – condenser; 5 – liquid pump; 6 – heat exchanger; 7 – evaporator fan; 8 – condenser fan; 9 – bypass valve

CONCLUSION

Thus, the design of an automobile absorption air conditioner has been developed. The main elements of this device are: desorber (generator), condenser, absorber and evaporator. Lithium bromide is proposed to be used as an absorbent. It has a low boiling point. Lithium bromide is non-toxic and safe. The resulting design of the air conditioner reduces the power loss of the power plant to drive the liquid pump. According to calculations, the pump drive power was 0.17 kW. For comparison, the compressor of a modern car air conditioner consumes 7–11 kW. An absorption car air conditioner provides the following advantages: additional engine cooling, environmental friendliness, fuel economy, efficient use of heat from vehicle

exhaust gases. This design can compete well with existing modern car air conditioners.

REFERENCES

1. Kaynaklı Ö., Horuz İ. (2003) An Experimental Analysis of Automotive Air Conditioning System. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 30 (2), 273–284. [https://doi.org/10.1016/s0735-1933\(03\)00038-1](https://doi.org/10.1016/s0735-1933(03)00038-1).
2. Lee G. H., Yoo J. (2000) Performance Analysis and Simulation of Automobile Air Conditioning System. *International Journal of Refrigeration*, 23 (3), 243–254. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00047-X).
3. Arifianto E. S., Berman E. T., Mutaufiq M. (2018) Investigation on the Improvement of Car Air Conditioning System Performance Using an Ejector. *MATEC Web of Conferences*, 197, 08013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819708013>.
4. Santoso Budi, Tjahjana D. D. D. P. (2017) Performance Analysis of the Electric Vehicle Air Conditioner by Replacing Hydrocarbon Refrigerant. *AIP Conference Proceedings*, 1788, 030015. <https://doi.org/10.1063/1.4968268>.
5. Steven Brown J., Yana-Motta Samuel F., Domanski Piotr A. (2002) Comparative Analysis of an Automotive Air Conditioning Systems Operating with CO₂ and R134a. *International Journal of Refrigeration*, 25 (1), 19–32. [https://doi.org/10.1016/s0140-7007\(01\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s0140-7007(01)00011-1).
6. Vicatos G., Gryzagoridis J., Wang S. (2008) A Car Air-Conditioning System Based on an Absorption Refrigeration Cycle Using Energy from Exhaust Gas of an Internal Combustion Engine. *Journal of Energy in Southern Africa*, 19 (4), 6–11. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2008/v19i4a3331>.
7. Patel M. (2017) Experimental Setup of Automotive Air-Conditioning Based on Vapor Absorption Refrigeration System. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 4 (4). <https://doi.org/10.21090/ijaerd.me072>.
8. *Dantex Conditioners for a Metropolis*. Available at: <https://dantex.ru/articles/absorbtsionnye-chillery> (in Russian).
9. Voitekunas R. P., Ilyin A. P. (2018) Development of Passenger Compartment Conditioning Systems. *Human in Natural, Social and Socio-Cultural Surroundings: Proceedings of II Regional Student Scientific-Practical Conference Dedicated to 25th Anniversary of Eastern-European University*. Izhevsk, 98–106 (in Russian).
10. *Electric Liquid Pump of a Cooling System*. Available at: <https://ustroystvo-avtomobilya.ru/sistemy-hlazhdeniya/elektricheskij-zhidkostny-j-nasos> (in Russian).
11. *Purpose of the EGR-System and Features of its Operation*. Available at: <https://techartoport.ru/dvigatel/vypusknaya-sistema/sistema-egr.html> (in Russian).

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 30.09.2021

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-449-454>

УДК 625

Технико-экономическое сравнение конструкций дорожных одежд с использованием местных материалов

Докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾,
аспиранты А. В. Савуха¹⁾, В. В. Гиринский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рассмотрена возможность применения местных материалов при устройстве конструктивных слоев дорожной одежды. Приведен метод технико-экономического анализа, для которого необходимо знать расчетные модули деформации сравниваемых материалов. Зная межремонтные сроки для каждого из рассматриваемых вариантов, можно, сопоставляя их со сроками окупаемости, более полно выявить технико-экономические особенности таких вариантов. Основным критерием допустимости применения местного материала в соответствующем конструктивном слое является равнопрочность конструкций дорожных одежд или отдельных конструктивных слоев, устраиваемых из местных и привозных материалов. Критерий экономической целесообразности использования местного материала может быть записан в виде неравенства. Применяя принцип эквивалентности систем, можно заменять отдельные конструктивные слои дорожной одежды, устраиваемые из определенных материалов, эквивалентными по жесткости слоями из других материалов, увеличивая или уменьшая их толщину в зависимости от прочностных характеристик самих материалов. Исходя из условия равнопрочности конструкций из местных и привозных материалов, определено основное условие технической целесообразности использования местного материала. Построен график предварительного определения технико-экономической целесообразности применения местных материалов в конструктивных слоях дорожных одежд. В качестве дополнительного критерия экономической выгоды сравниваемых вариантов может быть использована суммарная величина вкладываемых затрат.

Ключевые слова: местные материалы, технико-экономический анализ, дорожная одежда, модуль деформации, эквивалентный слой, равнопрочность конструкций

Для цитирования: Ковалев, Я. Н. Технико-экономическое сравнение конструкций дорожных одежд с использованием местных материалов / Я. Н. Ковалев, А. В. Савуха, В. В. Гиринский // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 449–454. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-449-454>

Feasibility Study Comparison of Pavement Designs Using Local Materials

Ya. N. Kovalev¹⁾, A. V. Savukha¹⁾, V. V. Girinsky¹⁾

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

Abstract. The possibility of using local materials in the construction of structural layers of pavement is considered in the paper. The paper presents a method of technical and economic analysis, for which it is necessary to know the calculated deformation moduli of the materials being compared. Knowing the turnaround time for each of the options under consideration,

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-38-81
ftk75@bntu.by

it is possible, by comparing them with the payback periods, to more fully identify the technical and economic features of such options. The main criterion for the admissibility of the use of local material in the corresponding structural layer is the equal strength of pavement structures or individual structural layers made of local and imported materials. The criterion of economic feasibility of using local material can be written as an inequality. Using the principle of equivalence of systems, it is possible to replace individual structural layers of pavement, made of certain materials, with equivalent layers of stiffness from other materials, increasing or decreasing their thickness, depending on the strength characteristics of the materials themselves. The main condition for the technical feasibility of using local material has been determined on the basis of the condition of equal strength structures made from local and imported materials. A schedule for preliminary determination of the technical and economic feasibility of using local materials in the structural layers of road pavements has been built. The total value of the investment costs can be used as an additional criterion for the economic benefits of the compared options.

Keywords: local materials, technical and economic analysis, pavement, deformation modulus, equivalent layer, equal strength structures

For citation: Kovalev Ya. N., Savukha A. V., Girinsky V. V. (2021) Feasibility Study Comparison of Pavement Designs Using Local Materials. *Science and Technique*. 20 (5), 449–454. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-449-454> (in Russian)

Введение

Продукцией автомобильного транспорта является объем транспортной работы, а ее стоимость определяется себестоимостью перевозок грузов и пассажиров, являющейся важнейшим экономическим измерителем работы автомобильного транспорта. Следовательно, определение экономического эффекта от капиталовложений в дорожное строительство должно основываться, прежде всего, на уменьшении стоимости автоперевозок грузов и пассажиров на участках проектируемых дорог. В настоящее время имеется ряд достаточно подробно разработанных методических предложений по технико-экономическому анализу. Затраты на постройку и последующую эксплуатацию дорог, включая средства, необходимые для выполнения среднего и капитального ремонта, во всех существующих методах технико-экономического анализа предлагается учитывать в комплексе с транспортными расходами.

Технико-экономический анализ

К числу наиболее универсальных методов технико-экономического анализа относится метод СоюздорНИИ, разработанный Н. Ф. Хорошиловым [1], исходным положением которого является учет эффективности средств, вкладываемых в дорожное строительство, с помощью вводимого в расчеты коэффициента общественной эффективности развития народного хозяйства. Для выбора более выгодного варианта расчета по этому методу необходимо произвести подсчет приведенных затрат на рассматриваемый год по формуле

$$\begin{aligned}
 B = & CK_n + (D_1 + T_1 + X_1)K_{n-1} + \\
 & + (D_2 + T_2 + X_2)K_{n-2} + \dots + \\
 & + (D_{n-1} + T_{n-1} + X_{n-1})K_1 + \\
 & + (D_n + T_n + X_n) + \sum_1^n a,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где B – сумма общих, приведенных к n -му году, затрат по данному варианту; C – строительные затраты; K_n – коэффициент общественной эффективности капитальных вложений за n лет [1]; D – ежегодные дорожно-эксплуатационные расходы; T – транспортные расходы; X – прочие ежегодные расходы; n – рассматриваемый год сравнения; a – ежегодные отчисления на ремонт и переустройство данного варианта.

В тех случаях, когда ежегодные расходы за рассматриваемый период мало изменяются или остаются постоянными, формула подсчета приведенных затрат записывается в более простом виде

$$B = CK_n + (D + T + X) \sum_1^{n-1} K_n + \sum_1^n a. \quad (2)$$

Год, в котором приведенные затраты для двух сравниваемых вариантов становятся одинаковыми, является годом экономической равнозначности этих вариантов. Для определения дорожно-эксплуатационных, транспортных и других расходов Н. Ф. Хорошиловым разработана соответствующая методика с таблицами и графиками, позволяющими быстро и точно вычислять указанные расчетные величины [1, 2].

При определении суммарной величины транспортных расходов следует учесть, что

нарастание грузооборота на вновь строящихся дорогах, как показали исследования последних лет, подчиняется закону геометрической прогрессии. Поэтому суммарную экономию транспортных расходов за весь период срока окупаемости t_0 целесообразно определять по формуле [3]

$$\mathcal{E}_T = \frac{B_0(qt_0 - 1)}{q - 1}(z_0 - z_1), \quad (3)$$

где \mathcal{E}_T – суммарная экономия, или снижение дорожно-транспортных расходов за период окупаемости; B_0 – первоначальная грузонапряженность движения по дороге; q – знаменатель геометрической прогрессии роста первоначальной грузонапряженности движения; t_0 – срок окупаемости; z_0 – себестоимость перевозок (транспортные расходы) на дороге до постройки данного варианта дорожной одежды; z_1 – то же на дороге с рассматриваемым вариантом дорожной одежды.

В качестве обобщенного показателя степени технико-экономической эффективности в соответствии с «Типовой методикой определения экономической эффективности, капитальных вложений» следует использовать срок окупаемости первоначальных затрат при строительстве с учетом последующих дорожно-эксплуатационных расходов и средств, необходимых для выполнения первого капитального ремонта, за счет экономии на транспортных расходах, образующейся при принятии более совершенного в техническом отношении варианта дорожной одежды [4]. Приняв годовые дорожно-эксплуатационные расходы за расчетный период в пределах срока окупаемости (но не далее срока службы варианта) постоянными, с учетом сказанного формулу для определения полных дорожно-транспортных затрат, приведенных к расчетному году (году экономической окупаемости t_0), можно записать в виде

$$B = CK_{t_0} + \left[dt_0 + \frac{B_0(qt_0 - 1)}{q - 1}(z_0 - z_1) + Xt_0 \right] K_{cp} + \sum_1 a, \quad (4)$$

где K_{t_0} – коэффициент общественной эффективности вложения средств за t_0 лет; K_{cp} – сред-

невзвешенное значение этого коэффициента за тот же период.

Согласно «Типовой методике», при расчетах экономической эффективности сравниваемых вариантов необходимо сопоставлять фактические сроки окупаемости t_0 с нормативными значениями этих сроков T_0 , которые для транспортных отраслей народного хозяйства установлены в пределах до 10 лет.

Составим уравнение окупаемости основных приведенных к нормативному году затрат за счет экономии на транспортных расходах

$$CK_{\text{норм}} + (DK_{cp} + XK_{cp} + a)T_0 = \frac{B_0(qt_0 - 1)}{q - 1}(z_0 - z_1). \quad (5)$$

Решая уравнение (5) относительно t_0 , получим следующее выражение:

$$t_0 = \frac{1}{\lg q} \times \left\{ 1 + \frac{[CK_{\text{норм}} + (DK_{cp} + XK_{cp} + a)T_0](q - 1)}{B_0(z_0 - z_1)} \right\}. \quad (6)$$

В соответствии с «Типовой методикой» примем:

за коэффициент фактической сравнительной экономической эффективности отношение

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{t}; \quad (7)$$

за отраслевой коэффициент сравнительной экономической эффективности

$$E = \frac{1}{T_0}. \quad (8)$$

Тогда очевидно, что вариант с меньшим сроком окупаемости (разумеется, в пределах нормативного срока) или, что то же самое, с большим значением коэффициента фактической сравнительной экономической эффективности будет более выгодным [5]. Зная межремонтные сроки (определяя их по формулам или таблицам) для каждого из рассматриваемых вариантов, можно, сопоставляя их со сроками окупаемости тех же вариантов, достаточно полно выявить технико-экономические особен-

ности сравниваемых вариантов. Более экономически выгодным будет тот вариант, для которого фактический срок окупаемости меньше соответствующего данному варианту межремонтного срока.

Анализ зависимости $B/t = f(t)$ показывает, что до определенного года значение B/t уменьшается, а затем, с дальнейшим увеличением срока, повышается. Поэтому в качестве дополнительного критерия экономической выгоды сравниваемых вариантов может быть использована суммарная величина вкладываемых затрат B_S , подсчитываемая по формулам:

$$B_{ST_0} = S_t + T_0 C_{тр}; \quad (9)$$

$$B_{SE} = S_{тр} + EK_1, \quad (10)$$

где S_t – капитальные вложения по каждому варианту, приведенные к нормативному сроку окупаемости; $C_{тр}$ – годовая себестоимость транспортных расходов по каждому варианту [6].

В свою очередь:

$$\left. \begin{aligned} S_i &= CK_{норм} + (DK_{ср} + XK_{ср} + a)t_0; \\ C_{тр} &= B_0 z_1. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Более выгодным будет вариант с меньшими значениями B_{ST_0} или B_{SE} . Научные исследования и производственный опыт ряда дорожных организаций указывают на принципиальную возможность широкого использования местных дорожно-строительных материалов при строительстве экономичных и долговечных дорожных одежд на автомобильных дорогах различных категорий. Конструктивные схемы дорожных одежд должны быть объединены по степени капитальности в равнопрочные группы с одинаковыми для каждой группы эквивалентными модулями деформации [6, 7].

Для каждой группы дорожных одежд с учетом категории дороги принят требуемый эквивалентный модуль деформации, соответствующий легкому и среднему автомобильному движению [8]. Дополнительно учитываются данные о строительной стоимости и затратах привозных и местных материалов. Данные о ежегодных дорожно-эксплуатационных рас-

ходах, отчислениях на восстановление и переустройство дорог и себестоимости перевозок, вплоть до накопления данных о службе дорожных одежд с местными материалами, можно получить из табл. 2–5 [1].

Выявление технико-экономической целесообразности применения местных материалов должно начинаться на стадии конструирования дорожной одежды. Основным критерием допустимости применения местного материала в соответствующем конструктивном слое является равнопрочность рассматриваемых конструкций дорожных одежд или отдельных конструктивных слоев, устраиваемых из местных и привозных материалов [9].

Согласно теории прочности нежестких одежд, равнопрочными считаются те конструктивные слои или многослойные системы, которые обладают одинаковой жесткостью и распределяющей способностью при действии одинаковых нагрузок [10]. Для равнопрочных систем должно существовать равенство их эквивалентных модулей деформации

$$E_{экр}^M = E_{экр}^П, \quad (12)$$

где $E_{экр}^M, E_{экр}^П$ – эквивалентный модуль деформации конструкции с местным и привозным материалами.

Эквивалентный модуль деформации многослойной системы зависит от модулей деформации каждого слоя, толщины слоев и модуля деформации грунтового основания. Используя принцип эквивалентности систем, можно заменять отдельные конструктивные слои дорожной одежды, устраиваемые из определенных материалов, эквивалентными по жесткости слоями из других материалов, увеличивая или уменьшая их толщину в зависимости от прочностных характеристик последних. Толщина эквивалентного слоя, приведенного к материалу грунтового основания, вычисляется по формуле Г. И. Покровского [2]

$$h_{экр} = h \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_1}{E_0}}, \quad (13)$$

где $h_{экр}$ – толщина эквивалентного слоя; h – толщина слоя материала с модулем деформации E ; E_0 – модуль деформации грунта основания.

Для случая применения привозного и местного материалов толщина эквивалентного слоя определяется соответственно по формулам:

$$h_{\text{экв}}^{\text{п}} = h \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{п}}}{E_0}}; \quad (14)$$

$$h_{\text{экв}}^{\text{м}} = h \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{м}}}{E_0}}. \quad (15)$$

Исходя из условия равнопрочности конструкций с местными и привозными материалами, можно написать основное условие технической целесообразности в следующем виде:

$$h_{\text{экв}}^{\text{м}} = h_{\text{экв}}^{\text{п}}. \quad (16)$$

Стоимость устройства единицы площади основания в общем случае

$$S = A + hc, \quad (17)$$

где A – расход на устройство 1 м^2 основания, не зависящий от вида каменного материала; h – толщина слоя, м; c – стоимость 1 м^3 материала франко-трасса.

Тогда:

$$S_{\text{м}} = A_1 + h_{\text{м}}c_{\text{м}}; \quad S_{\text{п}} = A_2 + h_{\text{п}}c_{\text{п}}. \quad (18)$$

где $A_1 + h_{\text{м}}c_{\text{м}} \leq A_2 + h_{\text{п}}c_{\text{п}}$, $A_1 \approx A_2$.

Критерий экономической целесообразности использования местного материала может быть записан в виде неравенства:

$$S_{\text{м}} \leq S_{\text{п}}; \quad (19)$$

$$\frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{м}}} \geq \frac{c_{\text{м}}}{c_{\text{п}}}. \quad (20)$$

Исходя из (19), (20), будем иметь:

$$h_{\text{м}} \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{м}}}{E_0}} = h_{\text{экв}}^{\text{м}} = h_{\text{п}} \cdot 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{п}}}{E_0}}; \quad (21)$$

$$\frac{h_{\text{п}}}{h_{\text{м}}} = 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{п}}}}. \quad (22)$$

Подставляя в (22) значение $h_{\text{п}}/h_{\text{м}}$, в окончательном виде получим нужное для технико-экономических сравнений уравнение

$$\frac{c_{\text{м}}}{c_{\text{п}}} \leq 2,5 \sqrt{\frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{п}}}}. \quad (23)$$

В уравнении (23) значения $c_{\text{м}}/c_{\text{п}}$ могут изменяться от 1 до 0. Практические пределы изменности этого отношения уже значительны. Границы предельно допустимых значений $c_{\text{м}}/c_{\text{п}}$ и $E_{\text{м}}/E_{\text{п}}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Границы предельно допустимых значений
Limits of maximum permissible values

$c_{\text{м}}/c_{\text{п}}$	1,000	0,900	0,800	0,700	0,600	0,500	0,400
$E_{\text{м}}/E_{\text{п}}$	1,000	0,768	0,606	0,410	0,279	0,177	0,101

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, для выполнения технико-экономического сравнения необходимо знать расчетные модули деформаций сравниваемых материалов. Следует иметь в виду, что расчетные значения модулей деформации зависят не только от свойств материала, но и от условий увлажнения и дренирования, режима промерзания и оттаивания.

2. При назначении расчетных модулей деформации необходимо пользоваться соответствующими таблицами и рекомендациями инструкции по назначению конструкций дорожных одежд нежесткого типа ВСН 46–60. Приводимые в таблицах значения модулей не могут учесть все многообразие условий и расширяющийся ассортимент местных материалов. В некоторых случаях возникает необходимость определения расчетного модуля деформации местного материала экспериментальным путем. При этом следует иметь в виду, что в процессе эксплуатации дороги материал конструктивного слоя будет измельчаться и изменять свою первоначальную прочность, оцениваемую модулем деформации. В связи с чем величину расчетного модуля деформации рекомендуется определять непосредственно в полевых условиях на существующих участках дороги, построенных из этих материалов.

3. Сведения о стоимости 1 м^3 материала франко-трасса получаются составлением соответствующих калькуляций. Сравнение сводится к установлению на графике (рис. 1) местонахождения точки, соответствующей полученным

численным значениям $E_M/E_{П}$ и $c_M/c_{П}$. Если точка располагается в зоне технико-экономического обоснования, то местный материал можно использовать в проектируемой конструкции дорожной одежды.

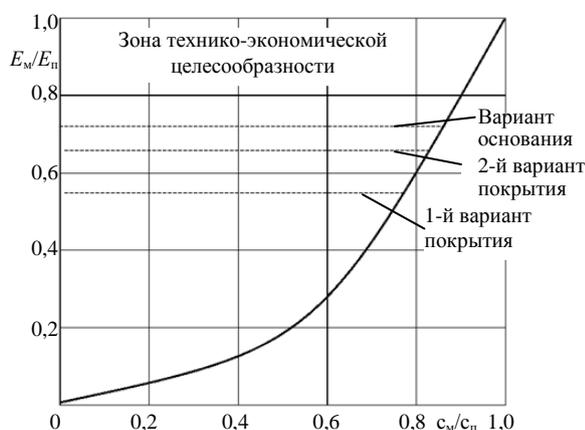


Рис. 1. Предварительное определение технико-экономической целесообразности применения местных материалов в конструктивных слоях дорожных одежд

Fig. 1. Preliminary determination of technical and economic feasibility for application of local materials in structural layers of pavement

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорошилов, Н. Ф. Транспортно-эксплуатационная оценка основных элементов автомобильных дорог при разработке проектно-сметной документации / Н. Ф. Хорошилов // Труды СоюздорНИИ. М., 1968. Вып. 19. С. 3.
2. Рациональные конструкции дорожных одежд из местных материалов Поволжья. Саратов: Изд-во Саратов. политех. ин-та, 1966. Вып. 21. С. 168–180.
3. Золотарь, И. А. Экономико-математические методы в дорожном строительстве / И. А. Золотарь. М.: Транспорт, 1974. 248 с.
4. Методические рекомендации по оценке эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных дорог: ВСН 21–83. М.: Транспорт, 1985.
5. Голубова, О. С. Экономика строительства / О. С. Голубова, С. В. Валицкий. Минск: ТетраСистемс, 2010. 172 с.
6. Леонович, И. И. Формулы и зависимости для решения дорожных и транспортных задач / И. И. Леонович, Н. П. Вырко, П. А. Лыщик. Минск: Высш. шк., 1974. 479 с.

7. Коганзон, М. С. Оценка и обеспечение прочности дорожных одежд нежесткого типа / М. С. Коганзон, Ю. М. Яковлев. М.: МАДИ, 1990. 53 с.
8. Семенов, В. А. Качество и однородность автомобильных дорог / В. А. Семенов. М.: Транспорт, 1989. 123 с.
9. Горельшев, Н. В. Материалы и изделия для строительства дорог / Н. В. Горельшев, И. Л. Гурычков, Е. Р. Пинус. М.: Транспорт, 1986. 288 с.
10. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа: ВСН 46–83. М.: Транспорт, 1985.

Поступила 27.05.2021

Подписана в печать 28.07.2021

Опубликована онлайн 30.09.2021

REFERENCES

1. Khoroshilov N. F. (1968) Transport Andoperational Assessment of Main Elements of Highways in the Development of Design and Estimate Documentation. *Trudy SoyuzdorNII* [Proceedings of SoyuzdorNII]. Moscow, Iss. 19, 3 (in Russian).
2. *Rational Designs of Pavements From Local Materials of the Volga Region*. Saratov, Publishing House of Saratov Polytechnical Institute, 1966, Iss. 21, 168–180 (in Russian).
3. Zolotar I. A. (1974) Economic and Mathematical Methods in Road Construction. Moscow, Transport Publ. 248 (in Russian).
4. VSN [Industry-Specific Construction Standards] 21–83. *Methodological Recommendations for Assessing Effective Capital Investments in the Construction and Reconstruction of Highways*. Moscow, Transport Publ., 1985 (in Russian).
5. Golubova O. S., Valitskii S. V. (2010) *Construction Economics*. Minsk, TetraSystems Publ. 172 (in Russian).
6. Leonovich I. I., Vyrko N. P., Lyschik P. A. (1974) *Formulas and Dependencies for Solving Road and Transport Problems*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ. 479 (in Russian).
7. Koganzon M. S., Yakovlev Yu. M. (1990) *Assessment and Assurance of Strength of Non-Rigid Road Pavements*. Moscow, State Technical University – MADI. 53 (in Russian).
8. Semenov V. A. (1989) *Quality and Uniformity of Roads*. Moscow, Transport Publ. 123 (in Russian).
9. Gorelyshev N. V., Guryachkov I. L., Pinus E. R. (1986) *Materials and Products for Road Construction*. Moscow, Transport Publ. 288 (in Russian).
10. VSN [Industry-Specific Construction Standards] 46–83. *Guidelines for Design of Non-Rigid Pavements*. Moscow, Transport Publ., 1985 (in Russian).

Received: 27.05.2021

Accepted: 28.07.2021

Published online: 30.09.2021