

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. 23 / No 1 / 2024

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

Информатика

Павлюковец С. А., Вельченко А. А.,
Радкевич А. А., Чаплыгин Д. Ю.

Моделирование системы управления гусеничным
мобильным роботом с учетом кинематических
и динамических параметров 5

Машиностроение и машиноведение

Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г.,
Сидоров В. А., Оковитый В. В.,
Асташинский В. М., Блюменштейн В. М.

Исследование структуры и свойств многослойных
плазменных порошковых покрытий из керамики
и сплавов на основе никеля 15

Дьяконов О. М., Литвинко А. А.

Задача осесимметричного прессования
дискретных металлических материалов 21

CONTENTS

Informatics

Pauliukavets S. A., Velchenko A. A., Radkevich A. A.,
Tschaplygin D. Yu.

Modeling of Control System for Tracked Mobile
Robot Taking Into Account Kinematic
and Dynamic Parameters 5

Mechanical Engineering and Engineering Science

Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G.,
Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M.,
Blumenstein V. M.

Study of the Structure and Properties of Multilayer
Plasma Powder Coatings of Ceramics
and Nickel-Based Alloys 15

Dyakonov O. M., Litvinko A. A.

Axisymmetric Pressing Problem
of Discrete Metal Materials 21

Селивончик Н. М., Нестеренко Н. Л.

Определение предельных расчетных суммарных значений ветровых нагрузок на элементы противоугонного устройства из эксцентрикового и клинового механизмов 33

Строительство

Повколас К. Э.

Методика расчета дополнительных динамических осадок оснований плитных фундаментов зданий и сооружений от вибраций, распространяющихся в грунтовой среде 46

Энергетика

Струцкий Н. В., Романюк В. Н.

Некоторые вопросы обеспечения полноты и достоверности эксплуатационных данных, получаемых в ходе приборного обследования стальных подземных газопроводов 58

Экономика промышленности

Добрынина М. В., Растимешина Т. В.

Университет как драйвер новой промышленной политики России: оценка эффективности (на примере Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники») 67

Gaibnazarova Z. T., Solieva B. T., Iminova N. A.

Forecasting the Risk of Bankruptcy in Poorly Formalized Processes
(Гаибназарова З. Т., Солиева Б. Т., Иминова Н. А.)
Прогнозирование риска банкротства в слабо формализованных процессах) 80

Selivonchik N. M., Nesterenko N. L.

Determination of Maximum Calculated Total Values of Wind Loads on the Elements of Anti-Theft Device from Eccentric and Wedge Mechanism 33

Civil and Industrial Engineering

Povkolas K. E.

Methodology for Calculating Additional Dynamic Settlements of the Bases of Slab Foundations of Buildings and Structures from Vibrations Propagating in the Soil Environment 46

Power Engineering

Strutsky N. V., Romaniuk V. N.

Some Issues of Ensuring Completeness and Reliability of Operational Data Obtained in the Course of Instrument Inspection of Steel Underground Gas Pipelines 58

Economy in Industry

Dobrynina M. V., Rastimeshina T. V.

University as a Driver of New Industrial Policy of Russia: Efficiency Evaluation (Using the Case of National Research University of Electronic Technology) 67

Gaibnazarova Z. T., Solieva B. T., Iminova N. A.

Forecasting the Risk of Bankruptcy in Poorly Formalized Processes 80

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),
- Опяляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

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

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),
Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),
Романюк Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотини, Греческая Республика),
Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),
Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),
Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижи́к 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 научный редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

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

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

<http://sat.bntu.by>

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

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

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 31.01.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 10,01. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2024

Lead Science Editor

V. N. Guryanichyk

Address

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

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by

<http://sat.bntu.by>

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-5-14>

УДК 621.316.71

Моделирование системы управления гусеничным мобильным роботом с учетом кинематических и динамических параметров

Кандидаты техн. наук, доценты С. А. Павлюковец¹⁾, А. А. Вельченко¹⁾,
магистрант А. А. Радкевич¹⁾, асп. Д. Ю. Чаплыгин¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В работе рассмотрена задача построения системы управления движением автономных мобильных гусеничных роботов в неформализованной внешней среде. На основе предложенной математической модели системы управления гусеничным мобильным роботом, учитывающей кинематические и динамические параметры, проведено имитационное моделирование гусеничного мобильного робота в средах динамического моделирования технических систем MATLAB Simulink и SimInTech, что позволило с определенной точностью управлять координатами гусеничного мобильного робота по заранее заданной траектории. Для повышения устойчивости системы управления движением мобильного робота в нее был внедрен ПИД-регулятор тока якоря и электромагнитного момента. В ходе имитационного исследования получены графические зависимости от времени: напряжения питания; угла поворота корпуса робота; скорости гусениц; тока якоря двигателей; электромагнитного момента двигателей; тока якоря двигателей с ПИД-регулятором; пройденного гусеницами пути; электромагнитного момента двигателей с ПИД-регулятором, а также проводилось задание центра масс робота при задании траектории радиусом 10 м в течение 6,2 с. В программном пакете MATLAB Simulink построены модели: общая имитационная, имитационная кинематическая и имитационная динамическая гусеничного мобильного робота, имитационная подсистема блока управления электроприводами. В программной среде SimInTech получена имитационная модель динамической части правого электропривода гусеничного мобильного робота. Проведен сравнительный анализ графических зависимостей угловой скорости катка и тока якоря двигателя гусеничного мобильного робота, полученных в пакетах MATLAB Simulink и SimInTech, который выявил ряд достоинств и недостатков при проверке работы системы управления гусеничным мобильным роботом в неформализованной внешней среде.

Ключевые слова: мобильный робот, гусеничный робот, система управления, имитационное моделирование, математическая модель, ПИД-регулятор, электропривод, кинематические параметры, динамические параметры

Для цитирования: Моделирование системы управления гусеничным мобильным роботом с учетом кинематических и динамических параметров / С. А. Павлюковец [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-5-14>

Modeling of Control System for Tracked Mobile Robot Taking Into Account Kinematic and Dynamic Parameters

S. A. Pauliukavets¹⁾, A. A. Velchenko¹⁾, A. A. Radkevich¹⁾, D. Yu. Tschaplygin¹⁾

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

Abstract. The paper examines the problem of constructing a motion control system for autonomous mobile tracked robots in an informal external environment. Based on the proposed mathematical model of the control system for a tracked mobile

Адрес для переписки

Павлюковец Сергей Анатольевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
s.pauliukavets@gmail.com

Address for correspondence

Pauliukavets Siarhei A.
Belarusian National Technical University
9, B. Khmel'nitsky str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-95-61
s.pauliukavets@gmail.com

robot, which takes into account kinematic and dynamic parameters, simulation modeling of a tracked mobile robot was carried out in the dynamic modeling environments of technical systems MATLAB Simulink and SimInTech, which made it possible to control the coordinates of a tracked mobile robot along a predetermined trajectory with a certain accuracy. To increase the stability of the mobile robot motion control system, a PID controller of the armature current and electromagnetic torque was introduced into it. During the simulation study, graphical dependences on time were obtained: supply voltage; rotation angle of the robot body; track speeds; motor armature current; electromagnetic torque of engines; armature current of motors with PID controller; the path traveled by the caterpillars; electromagnetic torque of motors with a PID controller, and also the center of mass of the robot was set when setting a trajectory with a radius of 10 m for 6.2 s. Models were built in the MATLAB Simulink software package: general simulation, kinematic simulation and dynamic simulation of a tracked mobile robot, simulation subsystem of the electric drive control unit. In the SimInTech software environment, a simulation model of the dynamic part of the right electric drive of a tracked mobile robot was obtained. A comparative analysis of the graphical dependencies of the angular velocity of the roller and armature current of the motor of a tracked mobile robot, obtained in the MATLAB Simulink and SimInTech packages, was carried out, which revealed a number of advantages and disadvantages when testing the operation of the control system of a tracked mobile robot in an unformalized external environment.

Keywords: mobile robot, tracked robot, control system, simulation modeling, mathematical model, PID controller, electric drive, kinematic parameters; dynamic parameters

For citation: Pauliukavets S. A., Velchenko A. A., Radkevich A. A., Tschaplygin D. Yu. (2024) Modeling of Control System for Tracked Mobile Robot Taking Into Account Kinematic and Dynamic Parameters. *Science and Technique*. 23 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-5-14> (in Russian)

Введение

В мировой робототехнике нишу гусеничных мобильных автономных роботов успешно заняли производители тракторов и самоходной сельскохозяйственной техники для применения в точном земледелии. Несмотря на ряд недостатков, в числе которых высокая стоимость и масса гусеничных движителей, относительно низкая скорость движения, гусеничные роботы являются наиболее универсальными с точки зрения выполнения всех сельскохозяйственных операций. Гусеничные ленты позволяют работать на почвах с низкой несущей способностью, одновременно снижая удельное давление и нагрузку на поверхность почвы, тем самым повышая ее плодородность. Высокая маневренность и малый радиус поворота гусеничных роботов повышают производительность при выполнении работ в ограниченных пространствах, обеспечивают стабильность работы и плавность хода на неровностях, а применение резинометаллических и резиновых гусениц позволяет передвигаться по дорогам с усовершенствованным покрытием.

Математическое моделирование гусеничных мобильных роботов рассматривается в различных научных источниках, в частности в статье [1] рассмотрена задача управления движением мобильного робота в неопределенных средах с обходом препятствий с использованием лазерных систем для управления. В источ-

нике [2] предложена комплексная методика процесса построения численной модели гусеничной машины для анализа ее движения, однако без учета ее кинематических и динамических параметров. В [3–5] проанализировано применение методов искусственного интеллекта для управления мобильными роботами. В данных работах рассматриваются математические модели гусеничных мобильных роботов без учета их кинематических и динамических параметров либо анализируются системы управления мобильными роботами в общем случае, без учета специфики гусеничных движителей.

Поскольку гусеничные мобильные роботы с автономным управлением и перемещением в заранее неопределенной среде функционируют в неформализованных и изменяющихся условиях, это представляет проблему для адаптивного управления движением таких объектов. Для решения этой проблемы необходима разработка алгоритмов создания управляющих систем планирования траектории и управления мобильным роботом с целью повышения эффективности его функционирования в условиях изменяющихся внешних сил.

Для формирования требуемой траектории движения необходимо определить условия, в которых объект взаимодействует с окружающей средой. Формализация описания внешней среды рабочей области робота для определения его действий в условиях неопределенности ра-

бочей зоны представляет определенную сложность. В этом случае возможно использование как внутреннего алгоритма принятия решений с автоматической коррекцией действий, так и интерактивное супервизорное управление, осуществляемое оператором и выполняющее оперативную коррекцию движения с высокой эффективностью.

Целью данной работы является проведение имитационного компьютерного моделирования системы траекторного управления гусеничным мобильным автономным роботом с учетом его кинематических и динамических параметров. Достижение поставленной цели включает решение таких задач, как:

- 1) планирование траектории перемещения гусеничного мобильного автономного робота;
- 2) структурно-параметрический синтез системы траекторного управления гусеничным мобильным роботом на основании его математической модели;
- 3) оценка качества параметров системы и повышение управляемости гусеничного мобильного автономного робота.

Для решения поставленных задач необходимо определить допущения, определяющие методы и цель управления.

Объектом управления является гусеничный мобильный автономный робот.

Назначение моделируемого гусеничного мобильного робота предполагает его применение в сельском хозяйстве для точного земледелия. В данной статье рассматриваются моделирование и анализ системы траекторного управления ходовой частью робота, обеспечивающей его перемещение по заранее заданной траектории, определяемой требуемой последовательностью выполнения операций. Для примера, робот может быть оснащен бортовой системой полива растений, и цикл его работы предусматривает перемещение от одного объекта к другому по определяемой системой управления траектории. В таком случае объект управления можно классифицировать как мобильный робот первого поколения.

Моделирование системы управления происходит при движении гусениц по грунту, в связи с чем для динамического описания гусеничного мобильного робота примем допущения, что движение робота происходит по горизонталь-

ной поверхности в горизонтальной плоскости XY , механизмы робота являются жестко связанными, катки недеформируемые и находятся в жестком зацеплении с гусеничной неэластичной лентой, движение гусениц происходит без проскальзывания.

Исходя из того, что система траекторного управления гусеничным мобильным роботом относится к числу контурных систем автоматического управления, одним из требований, предъявляемых к ней, является точность обработки заданной траектории. Оценка качества переходных процессов в динамических режимах работы гусеничного мобильного робота включает в себя измерение таких параметров, как перерегулирование, время перерегулирования, колебательность системы. Дальнейшее повышение качества регулирования – актуальная задача для улучшения управляемости гусеничного мобильного робота.

Имитационное моделирование гусеничного мобильного робота

Для исследования кинематических и динамических свойств гусеничного робота на основе математической модели, полученной в работе [6], которая учитывала кинематические и динамические параметры, произведем компьютерное математическое моделирование мобильного робота в программных пакетах математического моделирования MATLAB Simulink и SimInTech.

Структурная схема архитектуры мобильного гусеничного робота включает в себя основные узлы двигателей, блока управления электроприводами, трансмиссии и ходовой части, выраженные математическими моделями [7]. Компьютерная математическая модель, созданная в пакете MATLAB Simulink, приведена на рис. 1.

Для моделирования зададимся параметрами робота: радиус катка $r = 0,015$ м, ширина ленты $b = 0,15$ м, длина ленты $l = 1$ м, масса робота $m = 15$ кг, напряжение питания $U = 24$ В, коэффициент трения катков $\mu_R = 0,095$, коэффициент трения ленты $\mu_l = 0,4$, угловые скорости катков $\omega_1 = \omega_2 = 8$ рад/с, движение осуществляется по окружности радиусом 10 м в течение 6,2 с.

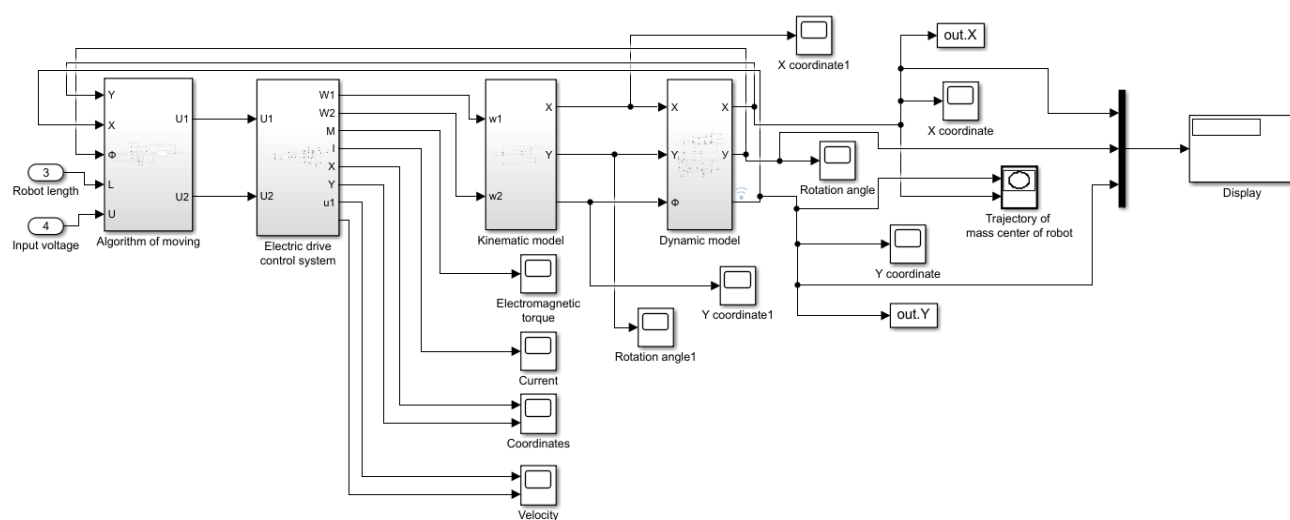


Рис. 1. Имитационная модель гусеничного мобильного робота

Fig. 1. Simulation model of a tracked mobile robot

Данная модель содержит в себе следующие блоки [7]:

- алгоритма движения, задает траекторию движения робота, используя задатчик интенсивности и графический алгоритм, имитированный блоком 1-D Lookup Table. На вход блока подаются заданные параметры входного напряжения питания и геометрические параметры робота. Также на вход блока подаются сигналы отрицательной обратной связи по координатам и углу поворота, рассогласование которых корректируется звеном ПИ-регулятора. Данный блок генерирует сигнал требуемой скорости для каждого электропривода в соответствии с алгоритмом диаграммы;
- управления электроприводами, представляет собой имитационное управление двумя

электродвигателями постоянного тока последовательного возбуждения, использующее в качестве входного воздействия сигналы, поступающие из блока алгоритма движения. На выходе блок формирует сигналы тока якоря, электромагнитного момента, частоты вращения и угла поворота каждого двигателя;

– блоки кинематической и динамической модели, являются математическим описанием поведения робота в пространстве и реализуют управление роботом по сигналам от блока управления электродвигателями. Выходными координатами блоков являются координаты точки центра масс робота, координаты каждой из гусениц робота и угол поворота робота.

Более подробно содержимое некоторых подсистем показано на рис. 2–4.

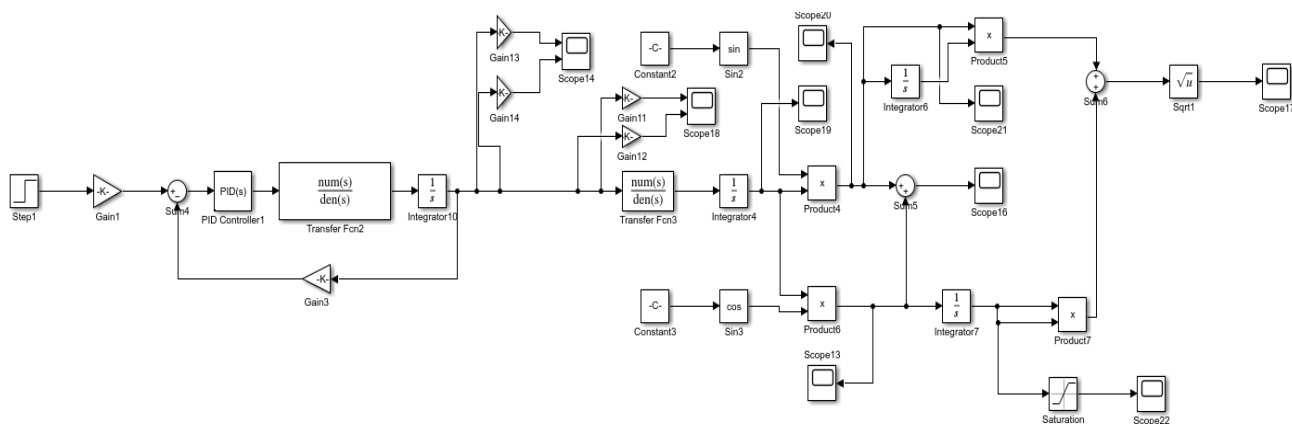


Рис. 2. Имитационная модель подсистемы блока управления электроприводами

Fig. 2. Simulation model of the electric drives control unit subsystem

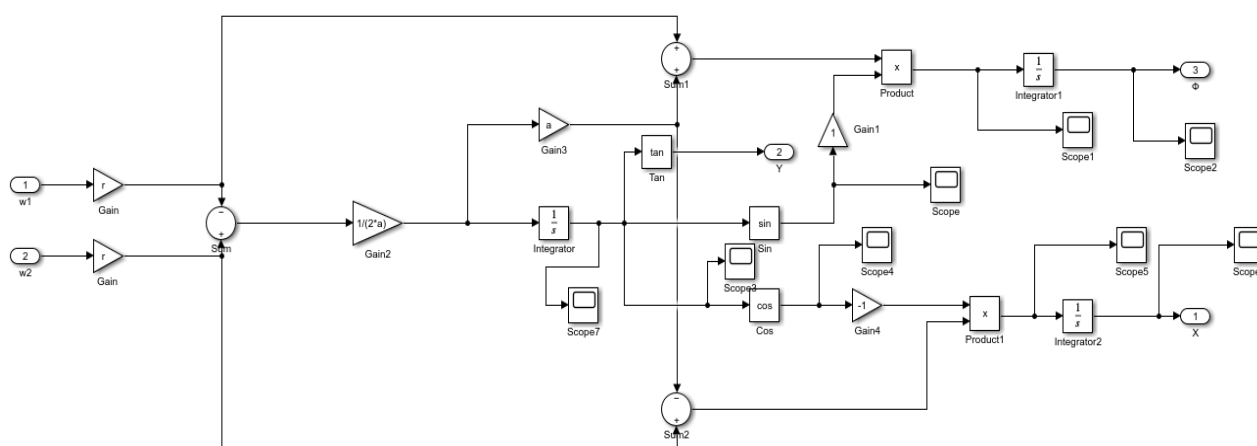


Рис. 3. Имитационная кинематическая модель гусеничного мобильного робота

Fig. 3. Simulation kinematic model of a tracked mobile robot

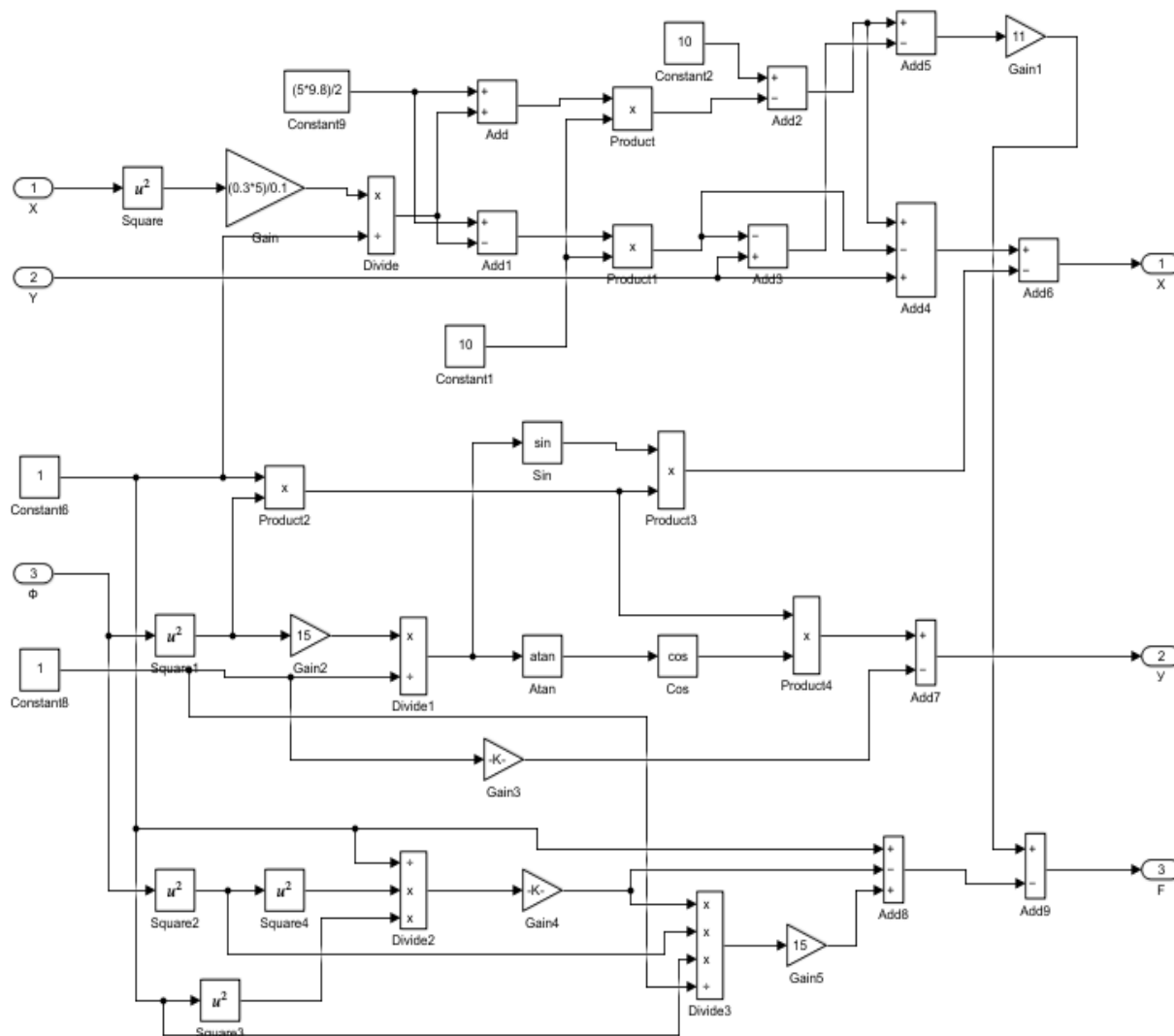


Рис. 4. Имитационная динамическая модель гусеничного мобильного робота

Fig. 4. Simulation dynamic model of a tracked mobile robot

Анализ полученных результатов

Проведем анализ полученных результатов в ходе имитационного моделирования гусеничного мобильного робота. На рис. 5а показан график зависимости напряжения питания от времени, из которого видно, что на интервалах времени от 0,7 до 0,75 с и от 6,4 до 6,5 с происходят всплески напряжения до 25 и 27 В соответственно, а на 3,1 с происходит скачкообразное падение напряжения до 13,5 В, вызванное поворотом робота и колебательностью системы, обусловленной статизмом характеристик и процессами коммутации в электродвигателях. На рис. 5б показан график зависимости угла поворота корпуса робота от времени, на котором видно, что за 6,2 с робот совершил поворот по гиперболической траектории, а затем продолжил движение по прямой, что отмечено постоянством угла поворота от времени на интервале от 6,2 до 8 с.

На графиках (рис. 6, 8–10) красным цветом обозначены характеристики правого дифференциального привода и правой гусеницы, синим цветом – характеристики левого дифференциального привода и левой гусеницы.

На рис. 6а, б представлены графики зависимости скорости гусениц и пройденного гусени-

цами пути от времени. Из графиков видно, что левый привод набирает скорость больше, чем правый, из-за движения по криволинейной траектории соответственно и путь, проходимый левым приводом, меньше, чем правым, с учетом геометрических параметров лент и корпуса робота.

Как следует из рис. 6а, на отметке времени 0,8 с левый и правый приводные катки начинают разгон со скорости 0,2 м/с. На протяжении 8 с, когда робот совершает полную отработку заданной траектории, изображенной на рис. 7, происходит разгон с постоянным ускорением гусеничного робота, причем с увеличением времени рассогласование графиков левого и правого приводных катков увеличивается, что связано со смещением тела корпуса мобильного робота в зависимости от изменения траектории движения. К окончанию моделирования левый приводной каток достиг скорости 4,3 м/с, правый приводной каток – 3,2 м/с. На рис. 6б рассогласование пути, пройденного левым и правым приводными катками, составляет 0,3 м, что соответствует поправке, сделанной на ширину гусеничных лент, и с увеличением времени и скорости возрастает в связи с отработкой траектории, показанной на рис. 7.

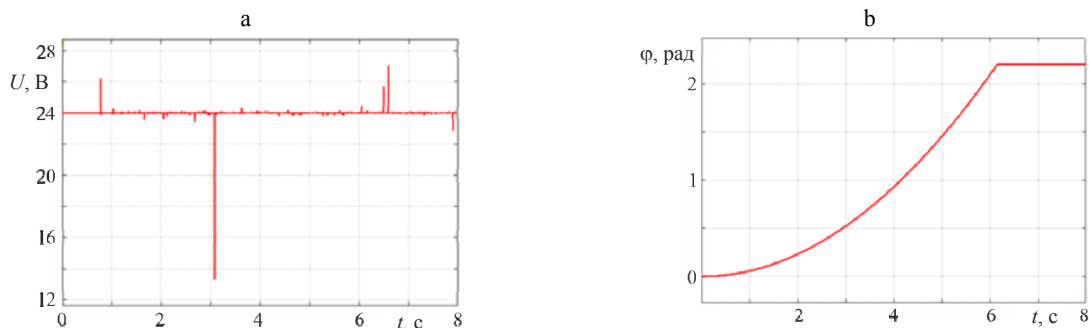


Рис. 5. Графики зависимостей: а – напряжения питания $U(t)$ от времени; б – угла поворота корпуса робота $\varphi(t)$ от времени

Fig. 5. Graphs: а – voltage source $U(t)$ to time dependence; б – rotation angle of robot body $\varphi(t)$ to time dependence

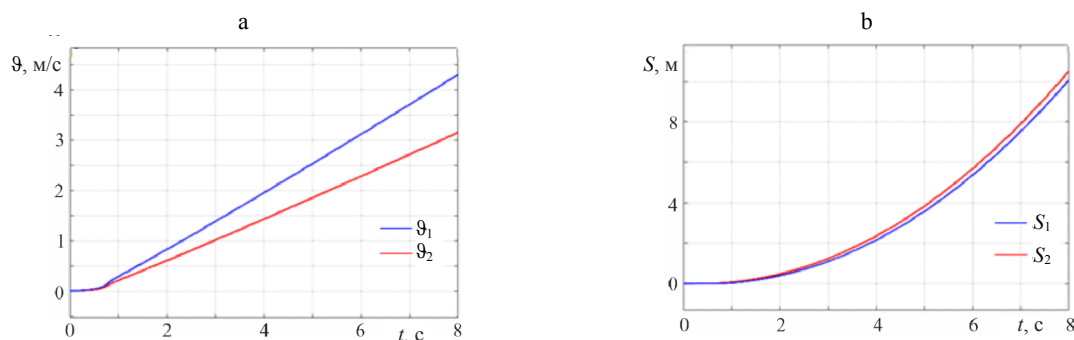


Рис. 6. Графики зависимостей: а – скорости гусениц $v(t)$ от времени; б – пройденного гусеницами пути $S(t)$ от времени

Fig. 6. Graphs: а – speed $v(t)$ to time dependence; б – path traveled by the tracks $S(t)$ to time dependence

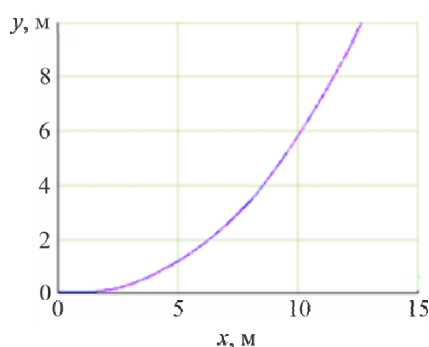


Рис. 7. График задания круговой траектории центра масс робота радиусом 10 м в течение 6,2 с

Fig. 7. Graph of the circle trajectory setting of the robot center of mass with a radius of 10 m for 6.2 s

Аналогичным образом можно объяснить и разность в токах якоря левого и правого приводов робота, связанную с поворотом корпуса робота и разной угловой скоростью катков при движении.

Графики зависимостей механической и электрической составляющих левого и правого приводных катков робота, изображенные на рис. 8а и 8б, характеризуются высокими значениями колебательности, достигающими для тока показателя 14 А, для момента – величины 6 Н·м, а также существенным перерегулированием, установившимся на максимальной отметке 27 и 26 А для левого и правого дифференциальных приводов и 12,8 и 12,1 Н·м для левого и правого катков соответственно. Время перерегулирования составляет 3,7 с для графиков тока и момента, пока значения не установятся в рамках технического оптимума. Однако и при достижении указанного времени сохраняется высокая колебательность и просадки тока, при этом число полных колебаний не уменьшается.

Из графиков (рис. 8а, б) видно, что зависимости тока и момента от времени имеют большие пульсации и характеризуются высокой колебательностью переходных процессов. Исходя из этого следует вывод, что система не обладает достаточной устойчивостью и характеризуется низкими показателями переходных процессов. С этой целью для поддержания требуемого качества астатической системы целесообразно в имитационную динамическую модель двигателя постоянного тока ввести ПИД-регулятор по току с настройкой по модульному оптимуму (блок PID Controller из библиотеки Simulink) [8].

ПИД-регулятор формирует сигнал управления по закону

$$u(k) = -c_0 \cdot x_1(k) - c_1 \cdot x_2(k) - c_2 \cdot x_3(k),$$

где k – номер шага расчета; c_0, c_1, c_2 – коэффициенты усиления интегрирующего, пропорционального и дифференцирующего каналов регулятора. Адаптивный ПИД-регулятор учитывает нелинейные свойства объекта управления, представленного апериодическим звеном 2-го порядка с учетом инерционности цепи якоря. Адаптация методом обучения происходит при неопределенности параметров объекта. Точность управления повышается увеличением пропорциональной составляющей и обеспечивается наличием интегрирующего звена, но при этом снижаются быстродействие системы и запас устойчивости. Наличие дифференциальной составляющей повышает динамическую и статическую точность регулирования по сравнению с другими регуляторами. Влияние ПИД-регулятора на графики зависимостей тока якоря и электромагнитного момента двигателей показано на рис. 9.

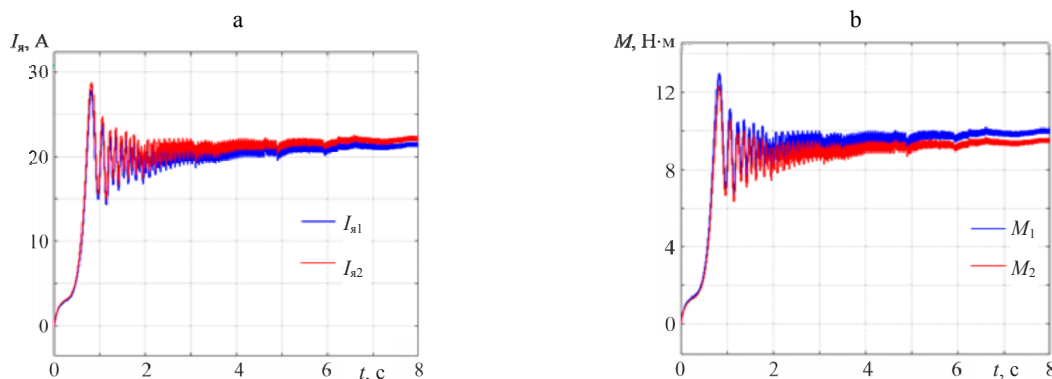


Рис. 8. Графики зависимостей:

а – тока якоря двигателей $I_{я}(t)$ от времени; б – электромагнитного момента двигателей $M(t)$ от времени

Fig. 8. Graphs: а – motors rotor current $I_{я}(t)$ to time dependence; б – electromagnetic torque of the engines $M(t)$ to time dependence

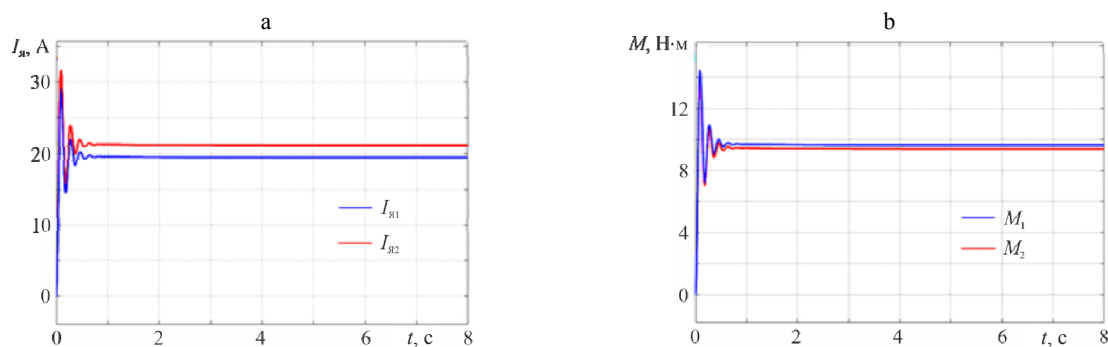


Рис. 9. Графики зависимостей: а – тока якоря двигателей $I_a(t)$ от времени с ПИД-регулятором; б – электромагнитного момента двигателей $M(t)$ от времени с ПИД-регулятором

Fig. 9. Graphs: a – motors rotor current $I_a(t)$ to time dependence with PID controller; b – electromagnetic torque of motors $M(t)$ to time dependence with PID controller

Как следует из полученных графиков тока и момента (рис. 9а, б), внедрение ПИД-регулятора значительно уменьшило время перерегулирования (0,4 с, уменьшилось на 89,2 % по сравнению с результатами моделирования без внедрения регулятора) и число полных колебаний системы (4 полных колебания), однако перерегулирование при коммутации левого приводного катка составило 29,6 %, правого приводного катка – 34,4 %. Поскольку значения пускового тока и пускового момента могут превышать допустимые значения, в системе следует ограничивать данные характеристики защитной и пускорегулирующей аппаратурой.

Проведя сравнительный анализ графиков (рис. 8, 9), можно сделать вывод, что ПИД-регулятор позволяет обеспечить стабильность динамических свойств системы в условиях ограниченных параметрических и внешних возмущений объекта. Модель управления с внедрением ПИД-регулятора повышает качество процесса регулирования, что положительно сказывается на управляемости при передвижении гусеничного робота [9, 10].

Рассмотрим случай, когда скорости гусеничных катков не равны и корпус робота совершает поворот вокруг своего центра масс. В таком случае координаты центра масс робота описываются уравнениями:

$$\begin{cases} x_C = R \cdot \cos(\omega t); \\ y_C = R \cdot \sin(\omega t), \end{cases}$$

где R – радиус кривизны окружности, по которому движется центр масс робота; ω – угловая скорость корпуса робота.

Угол поворота робота относительно системы координат, с учетом $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ и направленности вектора скорости по касательной к траектории, в этом случае изменяется по закону

$$\varphi = \omega t + \varphi_0,$$

где φ_0 – начальный угол, определяющий положение робота на траектории.

Произведем моделирование динамической модели гусеничного робота для случая, когда скорость правой гусеницы $\omega_1 = 8$ рад/с, скорость левой гусеницы $\omega_2 = 12$ рад/с. Результаты представлены на рис. 10.

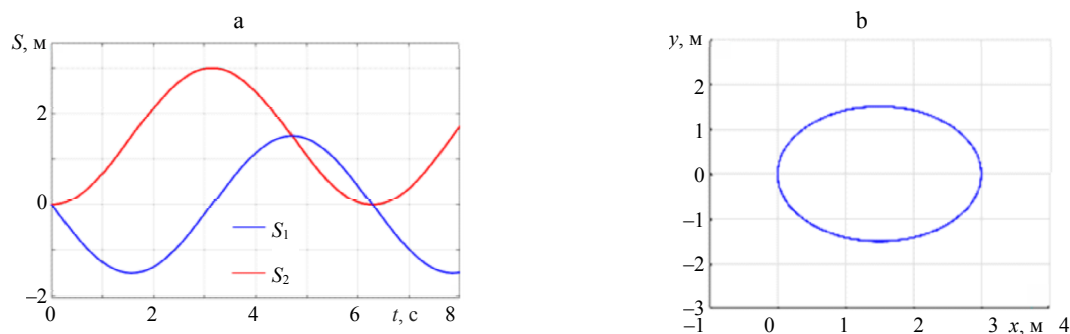


Рис. 10. Графики зависимостей: а – пройденного гусеницами пути $S(t)$ от времени; б – траектория движения мобильного робота

Fig. 10. Graphs: a – path traveled by the tracks $S(t)$ to time dependence; b – mobile robot trajectory

Полученные результаты показали, что при осуществлении движения с различной скоростью приводных катков центр масс робота описывает замкнутую фигуру, имеющую эллипсоидную форму, которая при определенных значениях скорости может принимать форму окружности. При указанных при моделировании значениях угловых скоростей катков 8 и 12 рад/с центр масс робота описывает эллипс, достигающий максимального диаметра 3 м. При этом каждый из катков совершает путь, имеющий синусоидальную форму с амплитудой 3 м и периодом 6 с.

Далее проведем моделирование динамической части электропривода в среде SimInTech. Математическая модель электропривода правого катка показана на рис. 11.

Графики угловой скорости катка и тока якоря двигателя представлены на рис. 12а, б.

На графиках рис. 12 по сравнению с аналогичными графиками, полученными в пакете Simulink, отмечается меньшая колебательность системы, достигнутая за счет использования фильтров и лучшей настройки ПИД-регулятора. Имитация изменения нагрузки осуществлялась путем ручной настройки инструмента «Стрелочный прибор». График зависимости угловой скорости катка от времени отмечается

перерегулированием (13 %), числом полных колебаний, равным 3, а график зависимости тока якоря от времени характеризуется временем перерегулирования, составившим 6,3 с, с перерегулированием 8 % и шестью полными колебаниями. При этом по сравнению с аналогичным графиком, полученным в среде Simulink, время перерегулирования наступает на 5,2 с позже, достигнутое значение тока на 0,2 А ниже и составляет 20,8 А. Данную разбежку в полученных результатах можно объяснить особенностями построения имитационных моделей в используемых средах для динамического моделирования технических систем MATLAB Simulink и SimInTech.

ВЫВОДЫ

1. В ходе моделирования системы траекторного управления гусеничным мобильным автономным роботом с учетом его кинематических и динамических параметров получено имитационное моделирование на основе математической модели гусеничного мобильного робота с учетом кинематических и динамических параметров, позволяющее с определенной точностью управлять координатами робота по заранее заданной траектории.

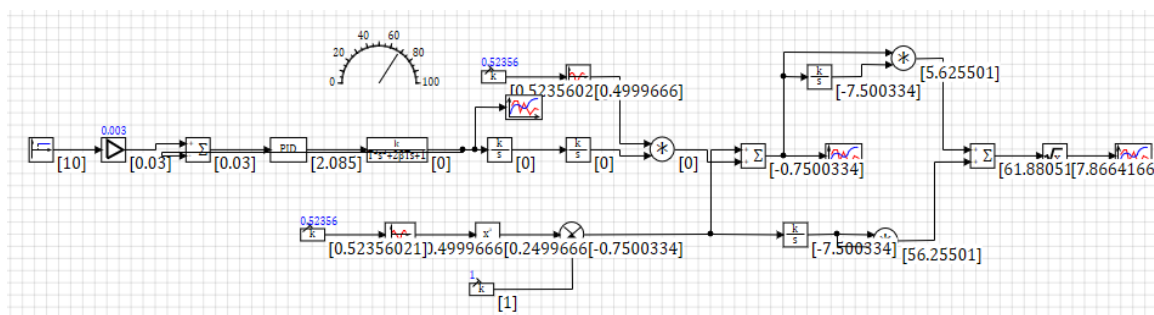


Рис. 11. Имитационная модель динамической части правого электропривода гусеничного робота, выполненная в среде SimInTech

Fig. 11. Simulation model of the dynamic part of the right electric drive of a tracked robot, made in the SimInTech environment

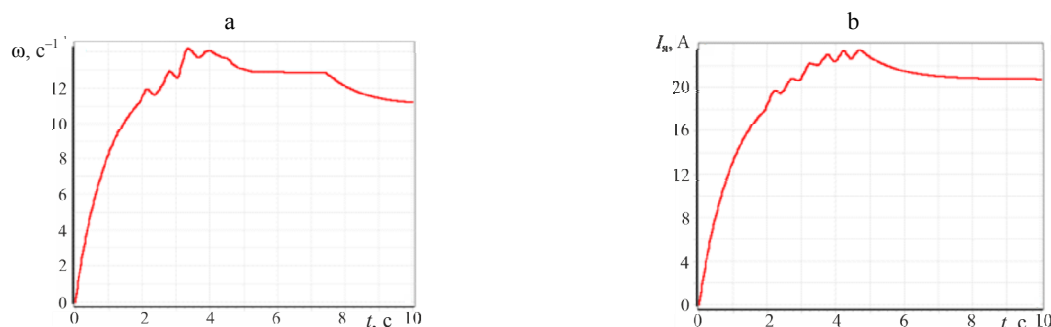


Рис. 12. Графики зависимостей: а – угловой скорости правого катка $\omega(t)$ от времени; б – тока якоря двигателя $I_a(t)$ от времени

Fig. 12. Graphs: a – right roller angular velocity $\omega(t)$ to time dependence; б – motor rotor current $I_a(t)$ to time dependence

2. Получены в пакетах MATLAB Simulink и SimInTech варианты различного управления движением мобильного робота и повышения устойчивости системы путем внедрения ПИД-регулятора тока якоря и электромагнитного момента.

3. Имитационное моделирование позволяет провести оценку качества динамических параметров системы, которая показала соответствие системы установленным критериям и требованиям, а повышение управляемости гусеничного мобильного автономного робота достигнуто внедрением ПИД-регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Farhan, A. S. Dynamic and Kinematic Models and Control for Differential Drive Mobile Robots / A. S. Farhan // *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2013. Vol. 3, Iss. 2. P. 253–263.
2. К вопросу управления мобильным роботом с колесами всенаправленного типа / С. А. Павлюковец [и др.] // BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics: сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17–18 мая 2023 г.: в 2 ч. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. Минск, 2023. Ч. 2. С. 94–102.
3. Романов, П. С. Подходы к созданию интеллектуальной системы управления мобильным роботом [Электронный ресурс] / П. С. Романов, И. П. Романова // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1. Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_80_romanov.pdf_1ed870ce12.pdf.
4. Ahmad, A. M. Modeling, Simulation and Dynamics Analysis Issues of Electric Motor, for Mechatronics Applications, Using Different Approaches and Verification by MATLAB/Simulink / A. M. Ahmad, M. K. Mohammed, A. S. Farhan // *I. J. Intelligent Systems and Applications*. 2013. Vol. 5, No 5. P. 39–57. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2013.05.06>.
5. Круглова, Т. Н. Моделирование системы управления полноприводным четырехколесным сельскохозяйственным мобильным роботом / Т. Н. Круглова, А. С. Власов // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2019. Т. 4, № 5. С. 147–154. https://doi.org/10.34031/article_5ce292ca6fa530.67486694.
6. Павлюковец, С. А. Математическая модель системы управления мобильным гусеничным роботом с учетом кинематических и динамических параметров / С. А. Павлюковец, А. А. Вельченко, А. А. Радкевич // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2023. № 3. С. 33–38. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-3-33-38>.
7. Sandeep, K. M. Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot / K. M. Sandeep, M. Jharana // *Global Journal of Researches in Engineering: H Robotics & Nano-Tech*. 2014. Vol. 14, Iss. 1. P. 1–8.
8. Gonzalez, R. Adaptive Control for a Mobile Robot Under Slip Conditions Using an LMI-Based Approach / R. Gonzalez, M. Fiacchini, T. Alamo, J. L. Guzman, F. Rodriguez // *European Journal of Control*. 2010. Vol. 16, Iss. 2. P. 144–155. <https://doi.org/10.3166/ejc.16.144-155>.
9. Wheeled Mobile Robotics. From Fundamentals Towards Autonomous Systems / G. Klancar, A. Zdesar, S. Blazic, I. Škrjanc. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 502 p.
10. Liu, J. Modeling and Simulation of Robotic Arm in MATLAB for Industrial Applications / J. Liu, Q. Luo // *11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 24–25 August 2019. IEEE, 2019. P. 346–349. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2019.00086>.

Поступила 02.09.2023

Подписана к печати 14.11.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Farhan A. S. (2013) Dynamic and Kinematic Models and Control for Differential Drive Mobile Robots. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3 (2), 253–263.
2. Pavlyukovets S. A., Vel'chenko A. A., Sin'sin' U., Radkevich A. A., Savko N. O. (2023) On the issue of Controlling a Mobile Robot with Omnidirectional Wheels. *BIG DATA and Advanced Analytics: Collection of Scientific Articles of the IX International Scientific and Practical Conference*, Minsk, 17–18 May, 2023. Part 2. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023, 94–102 (in Russian).
3. Romanov P. S., Romanova I. P. (2018) Approaches to Creating an Intelligent Control System for a Mobile Robot. *Inzhenernyi Vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, (1). Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_80_romanov.pdf_1ed870ce12.pdf (in Russian).
4. Ahmad A. M., Mohammed M. K., Farhan A. S. (2013) Modeling, Simulation and Dynamics Analysis Issues of Electric Motor, for Mechatronics Applications, Using Different Approaches and Verification by MATLAB/Simulink. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 5 (5), 39–57. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2013.05.06>.
5. Kruglova T. N., Vlasov A. S. (2019) Modeling of the Management System of a Four-Drive Four-Wheel Agricultural Mobile Robot. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 4 (5), 147–154 (in Russian). https://doi.org/10.34031/article_5ce292ca6fa530.67486694.
6. Pauliukavets S. A., Velchenko A. A., Radkevich A. A. (2023) Mathematical Model of the Control System for Mobile Tracked Robot Taking into Account Kinematic and Dynamic Parameters. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (3), 33–38 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-3-33-38>.
7. Sandeep K. M., Jharana M. (2014) Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot. *Global Journal of Researches in Engineering: H Robotics & Nano-Tech*, 14 (1), 1–8.
8. Gonzalez R., Fiacchini M., Alamo T., Guzman J. L., Rodriguez F. (2010) Adaptive Control for a Mobile Robot Under Slip Conditions Using an LMI-Based Approach. *European Journal of Control*, 16 (2), 144–155. <https://doi.org/10.3166/ejc.16.144-155>.
9. Klancar G., Zdesar A., Blazic S., Škrjanc I. (2017) *Wheeled Mobile Robotics From Fundamentals Towards Autonomous Systems*. Oxford, Butterworth-Heinemann. 502.
10. Liu J., Luo Q. (2019) Modeling and Simulation of Robotic Arm in MATLAB for Industrial Applications. *11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 24–25 August 2019. IEEE, 346–349. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2019.00086>.

Received: 02.09.2023

Accepted: 14.11.2023

Published online: 31.01.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-15-20>

УДК 621.793.7:621.762

Исследование структуры и свойств многослойных плазменных порошковых покрытий из керамики и сплавов на основе никеля

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. А. Сидоров¹⁾, инж. В. В. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾,
докт. техн. наук, проф. В. М. Блюменштейн³⁾

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

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

³⁾Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Кемерово, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье рассмотрены проведенные исследования сформированных при оптимальных технологических режимах плазменных покрытий из порошковых композиций $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlYTa$. Они обладают приемлемой плотностью и имеют допустимое для эксплуатации количество поверхностных дефектов – пор и трещин. Крупногабаритные керамические частицы $Al_2O_3-TiO_2$ внедрены в $NiCrAlYTa$ матрицу при формировании покрытия. Такое строение связано с подвижностью у расплавленных жидкофазных составляющих $NiCrAlYTa$, которые стремятся заполнить промежутки и трещины, возникающие в процессе плазменного напыления металлооксидного покрытия и способствуют повышению плотности покрытий. В процессе высокотемпературного осаждения оксидная составляющая плавится в органическое целое с металлической в области границы раздела, элементы диффундируют и проникают друг в друга, поэтому граница раздела не является четко определенной, нет очевидных границ между слоистыми структурами, наравне с химическими и механическими связями присутствуют и металлургические связи. При установленных нами оптимальных параметрах напыления в системе покрытия наблюдается микрогетерогенная структура с содержанием элементов, обеспечивающих его износостойкость (орторомбическая фаза оксида титана, $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$, $\alpha-Al_2O_3$, $\gamma-Al_2O_3$). Происходит растекание расплавленных порошковых частиц на подложке с минимальным разбрызгиванием и потерями при ударе о подложку. К основным кристаллическим фазам в системе сформированного покрытия можно отнести $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$, $\gamma-Al_2O_3$, анатаз (TiO_2) в дополнение к рутилу и $\alpha-Al_2O_3$. При анализе дифракционные пики у рутила выявляются в пределах $2\theta = 32^\circ$ и $2\theta = 70^\circ$, при этом содержание растет после процесса распыления, что подтверждает переход из фазы анатаза в рутильную фазу при высокой температуре. На основании результатов количественного анализа установлено, что содержание в покрытии $\alpha-Al_2O_3$ и рутила TiO_2 составляет примерно 30,4 и 32,2 % соответственно, являясь при этом основными фазовыми структурами покрытий. Проведены исследования по влиянию дистанций процесса плазменного напыления на эксплуатационные характеристики износостойких плазменных покрытий – прочность сцепления, твердость и пористость.

Ключевые слова: процессы плазменного напыления, порошковые композиции, плазменное напыление на воздухе, металлические сплавы на основе никеля, оксидная керамика, эксплуатационные характеристики, морфология и структура

Для цитирования: Исследование структуры и свойств многослойных плазменных порошковых покрытий из керамики и сплавов на основе никеля / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 15–20. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-15-20>

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

Study of the Structure and Properties of Multilayer Plasma Powder Coatings of Ceramics and Nickel-Based Alloys

F. I. Panteleenko¹⁾, V. A. Okovity¹⁾, O. G. Devoino¹⁾, V. A. Sidorov¹⁾, V. V. Okovity¹⁾,
V. M. Astashinsky²⁾, V. M. Blumenstein³⁾

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

²⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev (Kemerovo, Russian Federation)

Abstract. The paper deals with the studies of plasma coatings formed under optimal technological conditions from Al_2O_3 – TiO_2 – NiCrAlYTa powder compositions. They have an acceptable density and have a number of surface defects acceptable for operation – pores and cracks. Large-dimensional ceramic Al_2O_3 – TiO_2 particles are embedded in the NiCrAlYTa matrix during the formation of the coating. This structure is associated with the mobility of the molten liquid-phase components of NiCrAlYTa , which tend to fill gaps and cracks that occur during plasma spraying of metal oxide coating and contribute to an increase in the density of coatings. In the process of high-temperature deposition, the oxide component melts into an organic whole with a metal one in the area of the interface, the elements diffuse and penetrate each other, so the interface is not clearly defined, there are no obvious boundaries between layered structures. These structures, along with chemical and mechanical bonds, also contain metallurgical bonds. With the optimal spraying parameters we have established, a microheterogeneous structure is observed in the coating system with the content of elements that ensure its wear resistance (orthorhombic phase of titanium oxide, $\text{Cr}_{1.12}\text{Ni}_{2.88}$, α - Al_2O_3 , γ - Al_2O_3). Spreading of molten powder particles on the substrate occurs with minimal spattering and losses upon impact on the substrate. The main crystalline phases in the system of the formed coating include $\text{Cr}_{1.12}\text{Ni}_{2.88}$, γ - Al_2O_3 , anatase (TiO_2) in addition to rutile, and α - Al_2O_3 . In the analysis, diffraction peaks in rutile are detected in the ranges $2\theta = 32^\circ$ and $2\theta = 70^\circ$, while the content increases after the sputtering process, which confirms the transition from the anatase phase to the rutile phase at high temperature. Based on the results of quantitative analysis, the content in coating of α - Al_2O_3 and rutile TiO_2 is approximately 30.4 % and 32.2 %, respectively, being the main phase structures of the coatings. Studies have been carried out on the influence of distances of the plasma spraying process on the performance characteristics of wear-resistant plasma coatings – adhesion strength, hardness and porosity.

Keywords: plasma spraying processes, powder compositions, plasma spraying in air, nickel-based metal alloys, oxide ceramics, performance characteristics, morphology and structure

For citation: Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Blumenstein V. M. (2024) Study of the Structure and Properties of Multilayer Plasma Powder Coatings of Ceramics and Nickel-Based Alloys. *Science and Technique*. 23 (1), 15–20. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-15-20> (in Russian)

Введение

Проведенное нами исследование связано с аспектами технологий формирования защитных покрытий с применением оборудования для плазменного напыления на воздухе. Получаемые покрытия способны повышать износостойкость деталей, работающих в тяжелых условиях, с улучшением их эксплуатационных характеристик. В первую очередь, это относится к таким областям промышленности, как моторостроение, металлургическое оборудование, авиационная, космическая техника [1–7]. Ранее проведенные исследования для таких условий эксплуатации предлагают применять защитные газотермические покрытия на основе металлокерамических композиций [8–11] с последующей модификацией высокоэнергетическими источниками [12–14]. Одним из факто-

ров износостойкости является состав применяемых композиционных частиц исходных порошковых материалов, создающих необходимую структуру защитных покрытий. Оптимизация процессов напыления и последующей высокоэнергетической обработки обеспечивает увеличение прочностных характеристик благодаря уплотнению с созданием измельченных, неравновесных структур при сверхбыстром переохлаждении модифицированных слоев толщиной 50–150 мкм [15–18]. Для дальнейшего успешного внедрения металлокерамических покрытий требуется изучить различные аспекты разработки и создания композиционных покрытий; продолжить исследование и оптимизацию технологических факторов плазменного напыления для вновь разрабатываемых материалов и оборудования. В предлагаемой работе мы более внимательно отнеслись к во-

просам влияния на физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий получаемых структур на базе сплавов NiCrAlYTa и оксидов. Покрытия только на основе никелевых металлических сплавов не годятся для трибологических применений. Они обладают недостаточной твердостью, способствующей сильному износу в условиях повышенных нагрузок на этапах приработки при низких температурах. Следовательно, создание композитных защитных покрытий на основе никелевых сплавов и оксидной керамики – правильное решение для данной проблемы при сопоставлении стойкости металлов к окислению с химической стабильностью и твердостью оксидной керамики [19].

Структуры и свойства плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики и никелевых сплавов

Внешний вид защитного плазменного покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--NiCrAlYTa}$ представлен на рис. 1а. Видно, что покрытию присуща хорошая плотность, отсутствие поверхностных дефектов – сколов, трещин. Керамические составляющие $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ скреплены друг с другом и введены в расплавленные покрытия на базе никелевых сплавов. Такое строение структуры связано с подвижностью жидкофазных NiCrAlYTa компонентов, которые заполняют полости, поры и трещины, образующиеся в процессе плазменного напыления покрытия, и способно повысить плотность покрытия. На рис. 1б представлена структура композиционных металлокерамических плазменных покрытий. Керамическая фаза $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ на структуре является темно-серой, а фаза металлического сплава на основе никеля – светло-серой. Сформированные покрытия представлены плотными и однородными структурами, заметны поры, качество межконтактных сцеплений достаточно хорошее, металлический сплав в покрытии находится в виде тонких продолговатых пластин. Сформированная структура получена в результате расплавленных частиц с вкраплениями переплавленных или нерасплавленных порошковых частиц. Пластинчатые микроstructures подтверждают то, что распыленные в процессе нахождения в плазменной струе капли не затвердели до

удара о подложку и воздействуют на нее или ранее сформированные слои с достаточно высокими скоростями. Уровень плавления порошковых частиц в дальнейшем непосредственно определяет эксплуатационные свойства – пористость, адгезию и твердость. Видно, что граница подложка – покрытие не является строго определенной, что подтверждает версию о том, что в процессе осаждения керамическая составляющая плавится в области границы раздела с металлической в органическое целое, элементы диффундируют, проникая друг в друга без заметных границ между слоями. В покрытии присутствуют металлургические связи, кроме химических и механических, к основным кристаллическим фазам можно отнести в сформированной системе α - и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, анатаз (TiO_2), фазу $\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, рутил TiO_2 . Дифракционные пики у рутила TiO_2 в промежутках $2\theta = 32^\circ$ и $2\theta = 70^\circ$, содержание растет после нанесения, что подтверждает переход при высокой температуре анатаза в рутильную фазу. Количественный анализ показал, что $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и анатаз TiO_2 – основные фазовые структуры высокотемпературных керамических покрытий с содержанием 30,4 и 32,2 % соответственно. Толщины у сформированных слоев износостойкого покрытия примерно 300 мкм. Элементный анализ подтвердил присутствие в нем алюминия, тантала, никеля, кислорода, иттрия с равномерным распределением вдоль всей толщины сформированного слоя. Оказываемое воздействие дистанции напыления на эксплуатационные характеристики у плазменных покрытий, сформированных на оптимальных режимах нанесения, показано на рис. 2.

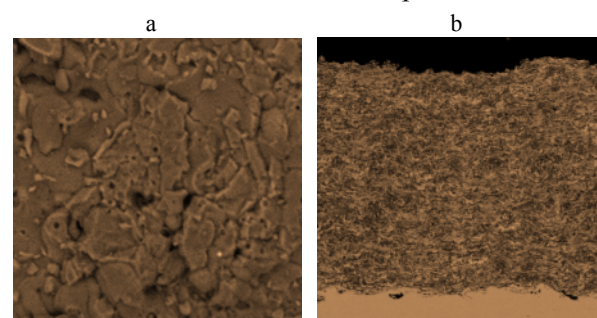


Рис. 1. Поверхность сформированного износостойкого покрытия (а) и его микроструктура (б) из порошкового материала $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--NiCrAlYTa}$ ($\times 200$)

Fig. 1. Surface of the formed wear-resistant coating (a) and its microstructure (b) from $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--NiCrAlYTa}$ powder material at ($\times 200$)

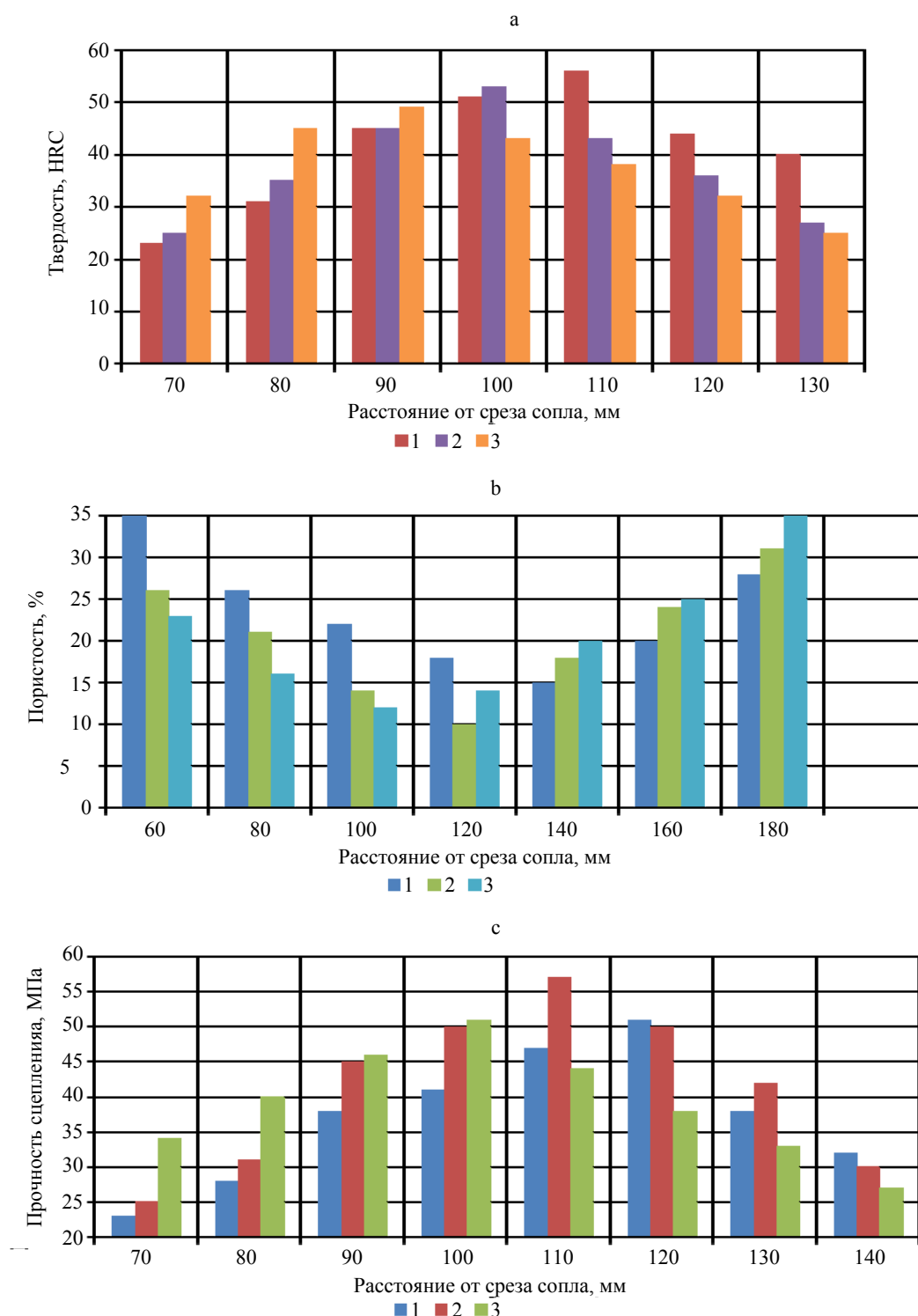


Рис. 2. Влияние на технологические характеристики композиционного металлокерамического покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--NiCrAlYTa}$ дистанции напыления L , мм: 1 – 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 30 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 2 – 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 40 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 3 – 50 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 50 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; фракция 40...63 мкм, $I = 500$ А, $R_N = 45$ л/мин, $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч); а – твердость (HRC); б – пористость, %; в – прочность сцепления

Fig. 2. Influence on the technological characteristics of the composite cermet coating $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--NiCrAlYTa}$ of the deposition distance L , mm (1 – 70 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 30 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 2 – 60 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 40 % Ni--Cr--Al--Y--Ta ; 3 – 50 % $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ – 50 % Ni--Cr--Al--Y--Ta , fraction 40...63 μm , $I = 500$ А, $R_N = 45$ l/min, $R_{\text{por}} = 4.5$ kg/h); а – hardness (HRC); б – porosity, %; в – adhesion strength

ВЫВОДЫ

1. Исследованы полученные при оптимизированных режимах плазменного напыления структуры и свойства порошковых покрытий из $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--NiCrAlYTa}$. Они обладают хорошей плотностью и минимальным количеством поверхностных дефектов. Керамические составляющие $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ внедрены в мягкую матрицу металлического сплава на базе никеля. Это определяется подвижностью расплавленных жидкофазных NiCrAlYTa составляющих, способных заполнять полости и трещины, улучшая плотность покрытия. Граница раздела в покрытии ярко не выражена, керамические составляющие покрытия переплавляются в органическое целое с металлической с диффузированием и проникновением друг в друга, не создавая видимых границ между слоями.

2. У напыленного покрытия создается микрогетерогенная структура с содержанием элементов ($\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, α - и γ - Al_2O_3 , орторомбическая фаза оксида титана), обеспечивающих износостойкость. Дифракционные пики рутила TiO_2 находятся в пределах $2\theta = 32^\circ$ и $2\theta = 70^\circ$, с увеличением после нанесения, подтверждая переход из фазы анатаза в рутильную фазу. Содержание α - Al_2O_3 и рутила TiO_2 – 30,4 и 32,2 % соответственно. Рассмотрено влияние параметров дистанции нанесения на твердость, пористость и прочность сцепления металлокерамических покрытий.

3. На оптимизированных режимах значения эксплуатационных характеристик следующие: прочность сцепления – 52–57 МПа; твердость – 52–56 HRC; пористость – 7–9 %; износ покрытия (трение со смазкой) – 4,1–4,6 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Microwave Dielectric Properties of Low-energy Plasma-Coated $\text{NiCrAlY / Al}_2\text{O}_3$ Composite / Liang Zhou [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 210. P. 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.002>.
2. Bowler, N. Designing Dielectric Loss at Microwave Frequencies Using Multi-Layered Filler Particles in a Composite / N. Bowler // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2006. Vol. 13, No 4. P. 703–711. <https://doi.org/10.1109/tdei.2006.1667727>.
3. Tribology of $\text{NiCrAlY+Al}_2\text{O}_3$ Composite Coatings by Plasma Spraying with Hybrid Feeding of Dry Powder+Suspension / G. Bolelli [et al.] // *Wear*. 2015. Vol. 344–345. P. 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.014>.
4. Tolpygo, V. K. Surface Rumpling of a (Ni, Pt) Al Bond Coat Induced by Cyclic Oxidation / V. K. Tolpygo, D. R. Clarke // *Acta Mater*. 2000. Vol. 48, No 13. P. 3283–3293. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(00\)00156-7](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(00)00156-7).
5. Hybrid Intermetallic Ru/Pt-Modified Bond Coatings for Thermal Barrier Systems / B. Tryon [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 202, No 2. P. 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.086>.
6. Oxidation Resistance of a Zr-Doped NiAl Coating Thermally Chemically Deposited on a Nickel-Based Super Alloy / S. Hamadi [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 204, No 6–7. P. 756–760. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.09.073>.
7. Influence of Substrate Material on Oxidation Behavior and Cyclic Lifetime of EB-PVD TBC Systems / U. Schulz [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 146–147. P. 117–123. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01481-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01481-5).
8. Gao, J. G. Fabrication and High Temperature Oxidation Resistance of $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Micro Laminated Coatings on Stainless steel / J. G. Gao, Y. D. He, D. R. Wang // *Materials Chemistry and Physics*. 2010. Vol. 123, No 2–3. P. 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.05.047>.
9. Sathish, S. Comparative Study on Corrosion Behavior of Plasma Sprayed Al_2O_3 , ZrO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$, $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Coatings / S. Sathish, M. Geetha // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26, No 5. P. 1336–1344. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(16\)64236-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(16)64236-x).
10. A protective Ceramic Coating to Improve Oxidation and Thermal Shock Resistance on CrMn Alloy at Elevated Temperatures / X. Shan [et al.] // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41, No 3, Part B. P. 4706–4713. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.019>.
11. Microstructural Investigations of $\text{NiCrAlY + Y}_2\text{O}_3$ Stabilized ZrO_2 Cermet Coatings Deposited by Plasma Transferred Arc (PTA) / C. Demian [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 300. P. 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.046>.
12. Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of HVOF Sprayed NiCrAlY Coatings Without and with Nano Ceriat / X. Sun [et al.] // *Journal of Thermal Spraying Technology*. 2012. Vol. 21. P. 818–824. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9760-3>.
13. Формирование и исследование многослойных композиционных оксидных плазменных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 357–364. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364>.
14. 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.
15. Многослойные композиционные плазменные оксидных покрытия на элементах экранной защиты на основе диоксида циркония / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 422–431. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-422-431>.
16. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой NiCr и твердый ZrO_2) / 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>.
17. Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474>.
18. Разработка композиционного материала на основе керамики с применением добавок соединений туго-

плавких металлов / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 4 (140). С. 18–24. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-4-18-24>.

19. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методами 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>.

Поступила 10.01.2023

Подписана к печати 14.03.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Zhou L., Zhou W., Luo F., Su J., Zhu D., Dong Y. (2015) Microwave Dielectric Properties of Low-energy Plasma-Coated NiCrAlY / Al₂O₃ Composite. *Surface and Coatings Technology*, 210, 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.002>
2. Bowler N. (2006) Designing Dielectric Loss at Microwave Frequencies Using Multi-Layered Filler Particles in a Composite. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13 (4), 703–711. <https://doi.org/10.1109/tdei.2006.1667727>.
3. Bolelli G., Candeli A., Lusvardi L., Ravaux A., Cazes K., Denoirjean A., Valette S., Chazelas C., Meillot E., Bianchi L. (2015) Tribology of NiCrAlY+Al₂O₃ Composite Coatings by Plasma Spraying with Hybrid Feeding of Dry Powder+Suspension. *Wear*, 344–345, 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.014>.
4. Tolpygo V. K., Clarke D. R. (2000) Surface Rumbling of a (Ni, Pt) Al Bond Coat Induced by Cyclic Oxidation. *Acta Materialia*, 48 (3), 3283–3293. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(00\)00156-7](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(00)00156-7).
5. Tryon B., Murphy K. S., Yang J. Y., Levi C. G., Pollock T. M. (2012) Hybrid Intermetallic Ru/Pt-Modified bond Coatings for Thermal Barrier Systems. *Surface and Coatings Technology*, 202 (2), 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.086>.
6. Hamadi S., Bacos M.-P., Poulain M., Seyeux A., Maurice V., Marcus P. (2013) Oxidation Resistance of a Zr-Doped NiAl Coating Thermally Deposited on a Nickel-Based Super Alloy. *Surface and Coatings Technology*, 204 (6–7), 756–760. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.09.073>.
7. Schulz U., Menzebach M., Leyens C., Q Yang Y. (2001) Influence of Substrate Material on Oxidation Behavior and Cyclic Lifetime of EB-PVD TBC Systems. *Surface and Coatings Technology*, 146–147, 117–123. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01481-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01481-5)
8. Gao J. G., He Y. D., Wang D. R. (2010) Fabrication and High Temperature Oxidation Resistance of ZrO₂/Al₂O₃ Micro Laminated Coatings on Stainless Steel. *Materials Chemistry and Physics*, 123 (2–3), 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.05.047>.
9. Sathish S., Geetha M. (2016) Comparative Study on Corrosion Behavior of Plasma Sprayed Al₂O₃, ZrO₂, Al₂O₃/ZrO₂, ZrO₂/Al₂O₃ Coatings. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 26 (5), 1336–1344. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(16\)64236-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(16)64236-x).
10. Shan X., Wei L. Q., Zhang X. M., Li W. H., Tang W. X., Liu Y., Tong J., Ye S. F., Chen Y. F. (2015) A Protective Ceramic Coating to Improve Oxidation and Thermal Shock Resistance on CrMn Alloy at Elevated Temperatures. *Ceramics International*, 41 (3, Part B), 4706–4713. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.019>.
11. Demian C., Denoirjean A., Pawlowski L., Denoirjean P., El Ouardi R. (2016) Microstructural investigations of NiCrAlY + Y₂O₃ stabilized ZrO₂ Cermet Coatings Deposited by Plasma Transferred arc (PTA). *Surface and Coatings Technology*, 300, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.046>.
12. Sun X., Chen S., Wang Y., Pan Z., Wang L. (2012) Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of HVOF Sprayed NiCrAlY Coatings Without and with Nano Ceria. *Journal of Thermal Spraying Technology*, 21, 818–824. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9760-3>.
13. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. (2016) Formation and Research of multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteoroid Protection. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 15 (5), 357–364. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364> (in Russian).
14. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko E. F. (2017) Investigation Of Plasma Two-Layer Composite Zirconium dioxide – Nichrome Coatings. *Aktualnye Problemy v Mashinostroenii* [Actual Problems in Mechanical Engineering], 4 (3), 100–105 (in Russian).
15. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2017) Multilayer Composite Plasma Coatings on Screen Protection Elements Based on Zirconium Dioxide. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (5), 422–431. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-422-431> (in Russian).
16. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Yu., 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 Tehnika = Science & Technique*, 17 (1), 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28> (in Russian).
17. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2020) Formation of Plasma Powder Coatings from Cermet with Subsequent High-Energy Modification. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 19 (6), 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474> (in Russian).
18. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Rafal K. (2020) Development of Composite Material Based on Ceramics with the use of Additives of Refractory Metal Compounds. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, (4), 18–24. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-4-18-24> (in Russian).
19. 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. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 20 (5), 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374> (in Russian).

Received: 10.01.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 31.01.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-21-32>

УДК 621.77.014

Задача осесимметричного прессования дискретных металлических материалов

Докт. техн. наук, проф. О. М. Дьяконов¹⁾, инж. А. А. Литвинко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В работе приведено аналитически замкнутое решение задачи осесимметричного прессования дискретных металлических материалов методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности пористого тела с учетом всех без исключения факторов прессования: вида и свойств шихты, условий нагружения, пористости, температуры, трения и др. Целью настоящей работы является разработка основ инженерной теории обработки давлением дискретных материалов на примере решения задачи осесимметричного прессования структурно-неоднородной металлической стружки в подвижной закрытой матрице. В основу построения физико-математической модели процесса положен идеализированный случай однородного уплотнения пористого тела с последующим определением коэффициента бокового давления, соответствующего действительной степени уплотнения на различных этапах нагружения. Полученное уравнение связи компонентов тензора напряжений с пределом текучести и относительной плотностью прессовки представляет собой цилиндрическое условие пластичности Мизеса, которое в пределе при нулевой пористости переходит в условие пластичности компактных металлов. Краевая задача решена для касательных напряжений с учетом величины и направления действия сил контактного трения, которые по своей физической природе не отличаются от сил трения в глубине прессуемого материала. Физико-математическая модель позволяет производить расчеты полей напряжений и плотности тела по координатам очага деформации, а также энергосиловых параметров (давление, усилие, работа деформации) при условии определения трех структурно-реологических характеристик: предела текучести, относительного сжатия и показателя степени деформационного уплотнения. В силу того что задача решена применительно к телам вращения в общем виде и в общей постановке, само решение следует рассматривать как методологическое для любой схемы осесимметричного нагружения.

Ключевые слова: схема, модель, структура, реология, метод, стружка, тело, матрица, напряжения, плотность, трение, давление, сила, работа, деформация

Для цитирования: Дьяконов, О. М. Задача осесимметричного прессования дискретных металлических материалов / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 21–32. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-21-32>

Axisymmetric Pressing Problem of Discrete Metal Materials

О. М. Dyakonov¹⁾, А. А. Litvinko¹⁾

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

Abstract. The paper presents an analytically closed solution to the problem of axisymmetric pressing of discrete metal materials by the method of jointly solving the differential equations of equilibrium of the metal and the plasticity conditions of the porous body, taking into account all pressing factors without exception: the type and properties of the charge, loading conditions, porosity, temperature, friction, etc. The purpose of this work is to develop the foundations of the engineering theory of pressure processing of discrete materials using the example of solving the problem of axisymmetric pressing

Адрес для переписки

Дьяконов Олег Михайлович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: + 375 17 293-91-91
deaconco@mail.ru

Address for correspondence

Dyakonov Oleg Mikhaylovich
Belarusian National Technical University
22/2, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: + 375 17 293-91-91
deaconco@mail.ru

of structurally inhomogeneous metal chips in a movable closed matrix. The basis for constructing a physical and mathematical model of the process is the idealized case of uniform compaction of a porous body with the subsequent determination of the lateral pressure coefficient corresponding to the actual degree of compaction at various stages of loading. The resulting equation for the relationship between the stress tensor components and the yield stress and relative compaction density represents the cylindrical Mises plasticity condition, which in the limit at zero porosity transforms into the plasticity condition for compact metals. The boundary value problem is solved for tangential stresses, taking into account the magnitude and direction of action of contact friction forces, which in their physical nature do not differ from the friction forces in the depth of the pressed material. The physico-mathematical model makes it possible to calculate the stress fields and density of the body according to the coordinates of the deformation zone, as well as energy-power parameters (pressure, force, work of deformation) provided that three structural and rheological characteristics are determined: the yield strength, relative compression and the degree of deformation compaction. Due to the fact that the problem is solved in relation to bodies of rotation in a general form and in a general formulation, the solution itself should be considered as methodological for any axisymmetric loading scheme.

Keywords: scheme, model, structure, rheology, method, chips, body, matrix, stress, density, friction, pressure, force, work, deformation

For citation: Dyakonov O. M., Litvinko A. A. (2024) Axisymmetric Pressing Problem of Discrete Metal Materials. *Science and Technique*. 23 (1), 21–32. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-21-32> (in Russian)

Введение

В настоящее время в теории обработки давлением дискретных металлических материалов применяются два основных метода силового расчета: дискретно-контактный, основанный на выборе представительных элементов структуры тела и анализе их контактного взаимодействия, и континуальный, в соответствии с которым дискретное тело рассматривается как сплошное тело со своими особыми пластическими свойствами. И в том и в другом случае полученные результаты интегрируются и распространяются на весь деформируемый и уплотняемый объем.

Дискретно-контактный метод разработан в прошлом столетии М. Ю. Бальшиным, Г. М. Ждановичем и другими авторами [1, 2] применительно к структурно-однородным металлическим порошкам правильной сферической формы. Суть метода состоит в определении относительного контактного сечения прессовки и напряжений, действующих на площадях контакта. Задача упругопластической деформации сферы в контакте с определенным количеством окружающих ее других сферических частиц решалась чисто геометрически с привлечением математического аппарата теорий упругости, пластичности и сопротивления материалов. Метод не нашел широкого применения в инженерных расчетах из-за проблемы вычисления числа частиц в контактном сечении и числа контактов, приходящихся на одну частицу. Весьма проблематичным является также определение площади контактов, непрерывно изменяющихся в процессе прессования.

Для структурно-неоднородных материалов в конце прошлого столетия и в начале нынешнего А. Г. Залазинским, А. П. Поляковым и другими авторами была предложена теория, основанная на структурно-феноменологическом подходе к анализу процессов прессования [3–7]. Поиск исходного представительного элемента производится с учетом геометрической формы, пространственной частоты и повторяемости элементов тела, параметров анизотропии и масштабной инвариантности [5, с. 140–151]. Изменение формы структурных элементов в процессе их контактного взаимодействия изучается экспериментально методом вейвлетного анализа и с помощью компьютерного моделирования [6]. Авторы работы [7] отмечают высокую степень сложности и трудоемкости компьютерного моделирования.

Более универсальный континуальный метод предполагает использование ассоциированного закона пластического течения [8], который, как известно, основан на способности компактного металла передавать напряжения и деформации без изменения объема. Пластическое течение развивается по нормали к предельной поверхности текучести, которая в условиях осесимметричного нагружения у сжимаемых дискретных тел приобретает форму эллипсоида вращения [9, с. 110–116]. Расчет геометрических параметров эллипсоида представляет собой трудноразрешимую задачу определения дилатансионного соотношения между характеристиками объемного сжатия тела и степенями его пластической деформации. Отдельную проблему представляет определение положительно го скалярного множителя Лагранжа λ , установ-

ливающего связь между напряжениями и скоростями деформации тела. Существует ряд условностей при определении λ : для спеченных пористых материалов предложены методики Р. Дж. Грина [9, с. 110–116], А. К. Григорьева и А. И. Рудского [10, с. 89–96; 11, с. 18–23], для неспеченных – Ю. И. Рыбина [12, с. 36–40]. Все известные условия пластичности являются достаточно сложными и не находят широкого применения в инженерных расчетах.

Известные решения задачи осесимметричного прессования дискретных металлических материалов [8, 13] выполнены без учета действия сил бокового контактного трения. Полученные выражения для напряжений не являются функциями координат и, как следствие, из поля зрения выпадают вопросы распределения плотности и пористости по объему прессовки, от чего зависит качество изделия.

Схема прессования.

Условия контактного трения

Процесс прессования стружки 1 производим в жесткой цилиндрической матрице 2, запрессованной в поршень 3 пневмоцилиндра 4 (рис. 1). Поршень 3 в своем исходном верхнем положении удерживается давлением сжатого воздуха в подпоршневой полости пневмоцилиндра 4. При совершении верхним пуансоном 5 рабочего хода матрица 2 перемещается вместе с ним с одной и той же скоростью. При этом нижний пуансон 6 остается неподвижным. Объем пористого тела уменьшается, т. е. происходит процесс брикетирования. При обратном холостом ходе пуансона 5 пневмосистема с помощью пуансона 6 возвращает матрицу 2 в исходное верхнее положение. Брикет выталкивается из матрицы 2 пуансоном 6. Далее цикл повторяется [14].

На рис. 1 показаны графики скоростей перемещения: I – верхнего пуансона и матрицы; II – частиц металла по высоте прессовки 1; III – матрицы относительно прессовки. Скорость частиц металла по высоте прессовки уменьшается от максимального значения до нуля, т. е. матрица, движущаяся с постоянной скоростью, обгоняет прессуемый металл. И только по периметру верхнего торца прес-

совки в верхних углах закрытого пространства матрицы металл «защемлен», движется со скоростью матрицы, скорость перемещения металла относительно матрицы, а, следовательно, и силы трения равны нулю [14].

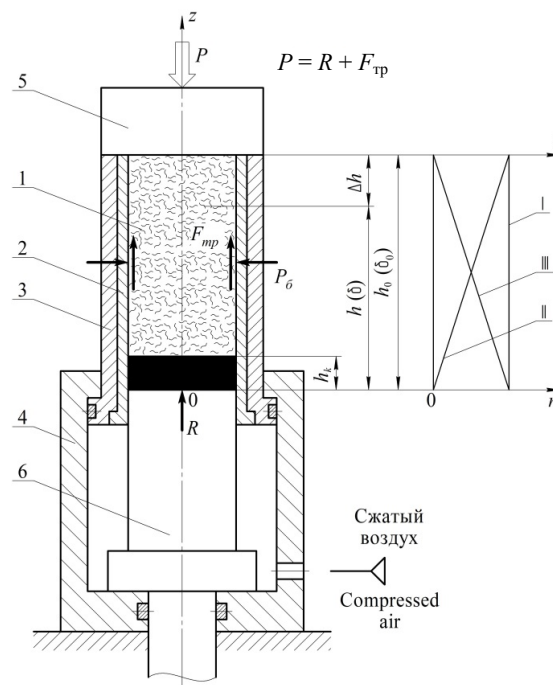


Рис. 1. Технологическая схема прессования дискретного пористого тела в подвижной матрице

Fig. 1. Technological scheme for pressing a discrete porous body in a movable matrix

При данной схеме нагружения усилие пресса P преодолевает сопротивление деформированию со стороны прессовки R и силу трения на боковой поверхности матрицы $F_{мп}$. На рис. 2 показаны направления векторов реактивных напряжений на боковой поверхности прессовки.

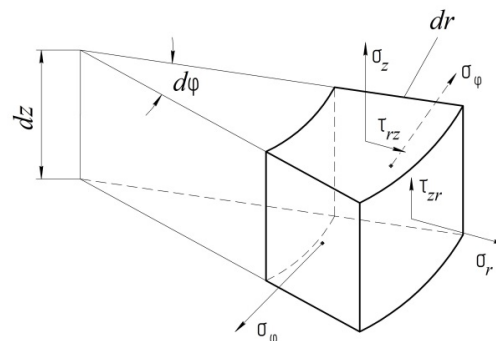


Рис. 2. Элементарный объем очага деформации с компонентами тензора напряжений

Fig. 2. Elementary volume of deformation zone with stress tensor components

Физическая модель деформируемого тела

Металлическая стружка изначально представляет собой дискретное тело, которое в процессе прессования после прохождения стадий структурного уплотнения, фрагментации частиц, упругой деформации превращается в единое пластически деформируемое пористое тело. В настоящей работе это тело рассматривается как изотропное жесткопластическое. Наличие пор в теле рассматривается лишь как особенность его геометрического строения, оказывающая влияние на величину и распределение напряжений. В процессе сжатия (осадки) в закрытой матрице объем тела уменьшается за счет уменьшения объема пор, при этом объем металла остается неизменным. Металл оказывает сопротивление деформированию, в то время как поры или пустоты никакого сопротивления не оказывают. Относительная плотность прессовки (средняя по объему) также, как и путь деформирования или время, является общим переменным параметром, но для рассматриваемого фиксированного момента выступает как константа при расчете напряженного состояния.

Параметры деформационного уплотнения.

Коэффициент бокового давления

Рассмотрим идеализированный случай однородного уплотнения, при котором плотность прессовки распределена равномерно по объему на любом этапе нагружения. Применим метод консолидации металлических сечений в плоскостях, перпендикулярных оси z (рис. 3). Консолидированное тело приобретает форму сплошного цилиндра, который при осадке сохраняет свою форму (цилиндр переходит в цилиндр – случай однородной деформации металла с нулевой пористостью). Относительная плотность прессовки δ определяется как отношение предельной или критической высоты h_k к ее текущему значению h или как отношение площади металлического сечения S_m к номинальной площади S :

$$\delta = \frac{V_k}{V} = \frac{Sh_k}{Sh} = \frac{S_m h}{Sh} = \frac{h_k}{h} = \frac{S_m}{S}. \quad (1)$$

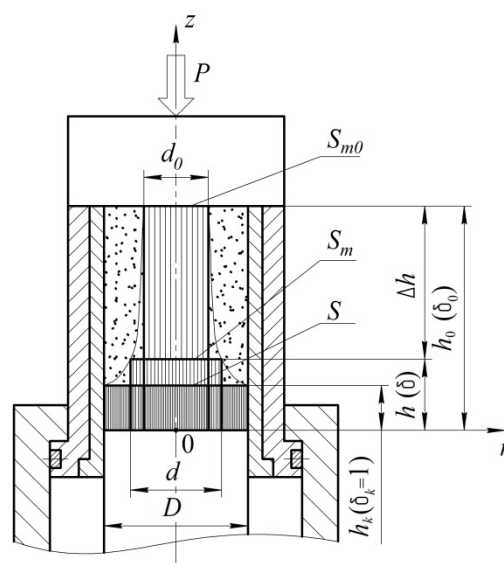


Рис. 3. Схема консолидации металлических сечений

Fig. 3. Scheme of consolidation of metal sections

Найдем отношение степеней уплотнения прессовки в поперечном $\varepsilon_{r\varphi}$ и продольном ε_z сечениях

$$\begin{aligned} \xi(\delta) &= \int_{\delta_0}^{\delta} d\xi = \int_{\delta_0}^{\delta} d \frac{\varepsilon_{r\varphi}}{\varepsilon_z} = \int_{\delta_0}^{\delta} d \left[\frac{S_m - S_{m0}}{S} \cdot \frac{h_0 - h}{h_0} \right] = \\ &= \int_{\delta_0}^{\delta} d \left[(\delta - \delta_0) \frac{\delta}{\delta - \delta_0} \right] = \int_{\delta_0}^{\delta} d\delta = \delta - \delta_0 < 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Отношение степеней уплотнения металлических сечений прямо пропорционально отношению соответствующих напряжений, в связи с этим параметр ξ представляет собой коэффициент бокового давления. Он равен отношению бокового давления к осевому. При однородном уплотнении его зависимость от плотности линейная, показатель степени равен единице. В случаях неоднородного уплотнения эта зависимость нелинейная, подчинена степенному закону и может быть представлена в виде следующей степенной функции:

$$\xi = \frac{\sigma_r + \tau_{rz}}{\sigma_z + \tau_{zr}} = \varepsilon(\delta - \delta_0)^m \leq 1, \quad (3)$$

где ε – характеристика пластичности материала, определяемая как относительное сжатие при заданных температурно-скоростных условиях деформации ($\varepsilon \leq 1$); m – показатель сте-

пени деформационного уплотнения, который зависит от начальной плотности прессовки и геометрии ее структурных элементов ($m \geq 0$); σ_z , σ_r , τ_{zr} , τ_{rz} – компоненты тензора напряжений в цилиндрических координатах z , r , φ .

Боковое давление в отличие от жидкости в различных сечениях металлической прессовки (нормальных к оси z) распределено неравномерно. Оно значительно меньше осевого из-за наличия пористости, трения между частицами и других факторов, затрудняющих пластическое течение металла в стороны. Например, у сливной токарной стружки в начальной стадии процесс прессования протекает практически без раздачи металла в стороны, степень уплотнения в верхних слоях прессовки в значительной степени превышает уплотнение в нижних слоях. И только при $\delta = 0,6$ форма консолидированного тела приближается к цилиндрической, уплотнение становится однородным, его интенсивность в поперечном направлении резко возрастает.

Расчетные зависимости $\xi(\delta)$ показаны на рис. 4. Условно принято, что $\varepsilon = 0,5$. Графики построены для $m = 1,00, 1,25, 1,50, 2,00, 2,50$. При однородном уплотнении $m = 1,00$ зависимость $\xi(\delta)$ линейная. С ростом показателя степени m эта зависимость нелинейная, ее кривизна возрастает.

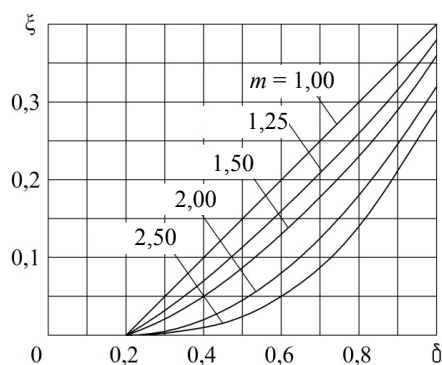


Рис. 4. Зависимость коэффициента бокового давления ξ от относительной плотности прессовки δ

Fig. 4. Dependence of lateral pressure coefficient ξ on relative compact density δ

Величина коэффициента бокового давления характеризует пластичность металла и нахо-

дится с ней в прямой пропорциональной зависимости. Чем выше пластичность, тем меньше разница между боковым и осевым давлением. В связи с тем, что боковое давление не может превысить осевое ($\xi \leq 1$), в уравнении (3): $\varepsilon \leq 1$, $m \geq 0$. При этом ξ не является функцией координат, так как δ есть величина средняя по объему прессовки.

В настоящее время накоплено большое количество экспериментальных данных [14, с. 195–197], свидетельствующих о том, что для многих структурно-однородных порошковых материалов между коэффициентом бокового давления ξ , характеристикой пластичности ε и плотностью прессовки δ существует прямая пропорциональная зависимость. При этом чем выше пластичность, тем большего значения достигает коэффициент бокового давления. Так, для малопластичных металлов (вольфрам, молибден, ванадий) и хрупких материалов (карбид вольфрама) $\xi_m = 0,45–0,50$, для порошка восстановленного железа $\xi_m = 0,65–0,67$, олова $\xi_m = 0,76–0,77$, меди $\xi_m = 0,83–0,85$, серебра $\xi_m = 0,90–0,94$, свинца $\xi_m = 0,98–0,99$. Эту прямую пропорциональную зависимость М. Ю. Бальшин [1, с. 108–110] выразил формулой $\xi = \xi_m \delta$, где ξ_m – коэффициент бокового давления в момент достижения плотности компактного металла при $\delta = 1$.

Заметим, что формула М. Ю. Бальшина не соответствует начальным условиям: $\delta = \delta_0$; $\xi = 0$. В случае брикетирования структурно-неоднородных материалов зависимость $\xi(\delta)$ может быть и непропорциональной. Все эти проблемные вопросы устраняет формула (3), которая является универсальной, способной учесть все без исключения факторы и закономерности процесса прессования.

Уравнение (3) устанавливает связь между компонентами тензора напряжений и плотностью δ (или пористостью $\theta = 1 - \delta$) и отображает, таким образом, физическую природу процесса уплотнения. Вывод этого уравнения основан на теореме теории пластичности металлических пористых тел о пропорционально-

сти напряжений и степеней их деформационного уплотнения. Это уравнение удовлетворяет граничным условиям: $\delta = \delta_0$, $\xi = 0$; $\delta = 1$, $\xi = \xi_m$.

Параметры линейного и объемного уплотнения связаны между собой следующим уравнением:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_r - \varepsilon_\varphi = \varepsilon_z. \quad (4)$$

В левой части равенства ε_z – степень линейного уплотнения по оси z , в правой – этот же параметр представляет собой степень объемного уплотнения. Отсюда следует, что степени уплотнения, а следовательно, и напряжения в направлении осей r и φ в условиях осесимметричного нагружения равны между собой:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \varepsilon_\varphi; \\ \sigma_r &= \sigma_\varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

Исходная система уравнений. Условие пластичности

На этапе пластической деформации уровень сопротивления деформированию пористого тела определяется пределом текучести металла σ_s , а степень сжатия в закрытом пространстве матрицы – величиной относительной плотности δ . Исходя из этого расчет сопротивления деформированию должен производиться при теоретически и экспериментально обоснованном условии пластичности Мизеса для компактных металлов, но с учетом соотношений (3), (5), т. е. с учетом пористости. В качестве исходных уравнений для расчета напряженного состояния прессовки принимаем дифференциальные уравнения равновесия и условие пластичности, которые в цилиндрических координатах r , φ , z записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0; \\ (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 3\tau_{rz}^2 &= \sigma_s^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\sigma_r = \sigma_\varphi$ исходя из равенства соответствующих степеней уплотнения (5). При известном значении коэффициента бокового давления ξ (3) с учетом закона парности касательных напряжений $\tau_{rz} = \tau_{zr} = \tau$ и обозначения $\sigma_z = \sigma$ система уравнений (6) приводится к двухпараметрической, т. е. к системе с двумя неизвестными σ и τ :

$$\xi \frac{\partial \sigma}{\partial r} - \eta \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial \sigma}{\partial z} + \frac{\tau}{r} = 0; \quad (8)$$

$$\eta^2 (\sigma + \tau)^2 + 3\tau^2 = \sigma_s^2, \quad (9)$$

где $\eta = 1 - \xi$.

Использование в системе уравнений (7)–(9) среднего значения ξ не означает, что напряжения и плотность во всех точках очага деформации имеют одно-единственное значение и по объему распределены равномерно. Уравнение (9) представляет собой цилиндрическое условие пластичности Мизеса для пористых материалов. Ось симметрии поверхности текучести, т. е. боковой поверхности цилиндра, совпадает с координатной осью z . В плоскостях z уравнение (9) является уравнением окружности с радиусом σ_s (рис. 5).



Рис. 5. Окружность пластичности

Fig. 5. Circle of plasticity

При отсутствии упрочнения металла, например при горячей деформации, цилиндр

сохраняет свою форму и размеры ($\sigma_s = \text{const}$). При наличии упрочнения ($\sigma_s = f(\delta)$) цилиндр расширяется в соответствии с функцией упрочнения, например при холодной деформации. В случае идеальной пластичности в условиях гидростатического сжатия уравнение (9) переходит в предельное условие пластичности Мизеса для компактных металлов: $\xi = \delta = 1$, $\eta = 0$, $\tau = k = \sigma_s/\sqrt{3}$.

Заметим, что в треугольнике пластичности ABC в плоскости z (рис. 5) значение напряжений σ и τ определяется величиной угла β :

$$\beta = \arcsin \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s} = \arctg \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}};$$

$$\tau = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \sin \beta = k \sin \beta; \quad \text{tg} \beta = \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}}. \quad (10)$$

В соответствии с законом пластического трения Прандтля сдвигающее напряжение $\tau = \mu k$, где $\mu = \sin \beta$ – коэффициент пластического трения. Соответственно в нашем случае β представляет собой угол пластического трения. Как будет показано в дальнейшем, решение осесимметричной задачи и расчет физико-математической модели процесса прессования сводятся к определению угла β .

Решение задачи.

Уравнение деформационного уплотнения

Решение осесимметричной задачи предполагает определение локальных характеристик напряженно-деформированного состояния и плотности прессовки по координатам, а также интегральных параметров: давления, усилия и работы деформации (основных параметров при выборе прессового оборудования). Решение проводится с учетом сил контактного трения. При этом заметим, что расчетная схема напряженного состояния элементарного объема очага деформации с выходом на боковую контактную поверхность матрицы (рис. 2) соответствует схеме нагружения с подвижной матрицей.

Как следует из условия (9), между напряжениями σ и τ устанавливается следующая взаимосвязь:

$$\sigma = \frac{1}{\eta} \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2} - \tau; \quad (11)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{(\eta^2 + 3)\sigma_s^2 - 3\eta^2\sigma^2} - \eta^2\sigma}{\eta^2 + 3}. \quad (12)$$

Анализ этих выражений показывает, что при $\xi \rightarrow 1$, $\eta \rightarrow 0$ осевое нормальное напряжение $\sigma \rightarrow \infty$, при этом касательное напряжение τ не может превысить величины константы пластичности: $\tau = k = \sigma_s/\sqrt{3}$. В процессе прессования давление прессования p не изменяет своего направления и остается положительной величиной:

$$p = \sigma + \tau = \frac{1}{\eta} \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}. \quad (13)$$

Производные от выражений (11), (12) вычисляются таким образом:

$$\sigma'_r = - \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) \tau'_r; \quad (14)$$

$$\sigma'_z = - \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) \tau'_z; \quad (15)$$

$$\tau'_r = - \frac{\eta^2 \sigma'_r}{\eta^2 + 3} \left[\frac{3\sigma}{\sqrt{(\eta^2 + 3)\sigma_s^2 - 3\eta^2\sigma^2}} + 1 \right]; \quad (16)$$

$$\tau'_z = - \frac{\eta^2 \sigma'_z}{\eta^2 + 3} \left[\frac{3\sigma}{\sqrt{(\eta^2 + 3)\sigma_s^2 - 3\eta^2\sigma^2}} + 1 \right]. \quad (17)$$

Для определения напряжений σ и τ представим уравнение (7) в виде функции $\tau'_r = f(\tau, \tau'_z)$ подстановкой (14):

$$\tau'_r = \frac{\tau'_z}{\xi \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) + \eta}. \quad (18)$$

Подставим (15) и (18) в уравнение (8)

$$\frac{1}{\xi \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) + \eta} \frac{\partial \tau}{\partial z} - \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) \frac{\partial \tau}{\partial z} + \frac{\tau}{r} = 0. \quad (19)$$

Проинтегрируем полученное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$\int \frac{1}{\xi \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) + \eta} \frac{\partial \tau}{\tau} - \int \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) \frac{\partial \tau}{\tau} + \frac{1}{r} \int dz = 0. \quad (20)$$

Сделаем замену:

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \frac{t}{\sqrt{1+t^2}}; \quad d\tau = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \frac{dt}{\sqrt{(1+t^2)^3}}; \quad \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{1+t^2}}. \quad (21)$$

Первый интеграл уравнения (20) преобразуется следующим образом:

$$\int \frac{1}{\xi \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) + \eta} \frac{\partial \tau}{\tau} = a \int \frac{dt}{(a+bt)t(1+t^2)},$$

$$\text{где } a = \eta; \quad b = \sqrt{3}\xi; \quad t = \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}}.$$

Представим подынтегральное выражение в виде суммы трех слагаемых

$$\frac{1}{(a+bt)t(1+t^2)} = \frac{A}{a+bt} + \frac{B}{t} + \frac{C+Dt}{1+t^2}.$$

После преобразований получим

$$(A+Bb+Db)t^3 + (Ba+Da+Cb)t^2 + (A+Bb+Ca)t + Ba = 1,$$

где

$$A = -\frac{b^3}{a(a^2+b^2)}; \quad B = \frac{1}{a}; \quad C = -\frac{b}{a^2+b^2}; \quad D = -\frac{a}{a^2+b^2}.$$

Тогда

$$a \int \frac{dt}{(a+bt)t(1+t^2)} = -\frac{b^2}{a^2+b^2} \int \frac{d(a+bt)}{a+bt} + \int \frac{dt}{t} - \frac{a}{a^2+b^2} \int \frac{b+at}{1+t^2} dt = -\frac{b^2}{a^2+b^2} \ln(a+bt) + \ln t - \frac{ab}{a^2+b^2} \operatorname{arctgt} - \frac{a^2}{2(a^2+b^2)} \ln(1+t^2).$$

Первый интеграл уравнения (20) принимает следующий вид:

$$\int \frac{1}{\xi \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) + \eta} \frac{\partial \tau}{\tau} = -\frac{3\xi^2}{\eta^2 + 3\xi^2} \times \times \ln \left(\eta + \frac{3\xi\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} \right) + \ln \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} - \frac{\sqrt{3}\xi\eta}{\eta^2 + 3\xi^2} \times \times \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} - \frac{\eta^2}{2(\eta^2 + 3\xi^2)} \ln \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 - 3\tau^2} \right).$$

Второй интеграл уравнения (20) определяется следующим образом:

$$\int \left(\frac{3\tau}{\eta \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} + 1 \right) \frac{\partial \tau}{\tau} = \frac{\sqrt{3}}{\eta} \int \frac{d\tau}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \right)^2 - \tau^2}} + \int \frac{d\tau}{\tau} = \frac{\sqrt{3}}{\eta} \arcsin \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s} + \ln \tau.$$

Общий интеграл уравнения (20) представляет собой уравнение деформационного уплотнения пористого тела

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3\xi^2}{\eta^2 + 3\xi^2} \ln \left(\eta + \frac{3\xi\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} \right) + \ln \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} - \\
 & -\frac{\sqrt{3}\xi\eta}{\eta^2 + 3\xi^2} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} - \frac{\eta^2}{2(\eta^2 + 3\xi^2)} \times \\
 & \times \ln \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 - 3\tau^2} - \frac{\sqrt{3}}{\eta} \arcsin \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s} - \ln \tau + \frac{z}{r} = C,
 \end{aligned} \quad (22)$$

или с учетом (10)

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3\xi^2}{\eta^2 + 3\xi^2} \ln \left(\eta + \sqrt{3}\xi \operatorname{tg} \beta \right) - \frac{\sqrt{3}[\eta^2(1+\xi) + 3\xi^2]}{\eta(\eta^2 + 3\xi^2)} \beta - \\
 & -\frac{\eta^2}{2(\eta^2 + 3\xi^2)} \ln (\operatorname{tg}^2 \beta + 1) + \ln \sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta + 1} - \\
 & - \ln \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} + \frac{z}{r} = C,
 \end{aligned} \quad (23)$$

где C – константа, определяемая из граничных условий на боковой поверхности прессовки.

Как уже отмечалось, в верхних углах закрытого пространства матрицы ($z = h$, $r = R$) на любом этапе нагружения металл «защемлен», трение отсутствует, а следовательно: $\tau = 0$, $\beta = 0$. Константа интегрирования находится по формуле

$$C = -\frac{3\xi^2}{\eta^2 + 3\xi^2} \ln \eta - \ln \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} + \frac{h}{R}. \quad (24)$$

Заметим, что физическая природа трения на поверхностях контакта прессовки с матрицей и в глубине очага деформации одна и та же, значения коэффициента трения совпадают. Поля напряжений с выходом на контактную поверхность непрерывны и соответствуют схеме напряженного состояния прессовки в подвижной матрице (рис. 2).

С учетом (24) уравнение деформационного уплотнения принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3\xi^2}{\eta^2 + 3\xi^2} \ln \frac{\eta}{\eta + \sqrt{3}\xi \operatorname{tg} \beta} - \frac{\sqrt{3}[\eta^2(1+\xi) + 3\xi^2]}{\eta(\eta^2 + 3\xi^2)} \beta - \\
 & -\frac{\eta^2}{2(\eta^2 + 3\xi^2)} \ln (\operatorname{tg}^2 \beta + 1) + \ln \sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta + 1} + \frac{z}{r} - \frac{h}{R} = 0.
 \end{aligned} \quad (25)$$

Данное уравнение является трансцендентным. Численное решение состоит в определении угла $\beta = \beta(z, r)$ и, что характерно, касательного напряжения $\tau = \tau(z, r)$ (10). Далее по формулам (11), (3), (5) определяются все остальные компоненты тензора напряжений по координатам точек очага деформации (z, r) на любом этапе нагружения.

Заметим, что краевая задача процесса пресования пластических пористых тел в закрытой матрице не решается для нормальных напряжений. Пластическая деформация тела не начинается при их нулевом значении.

Полученной системой уравнений можно воспользоваться при расчете процессов пресования изделий произвольной формы вращения. Граничные условия удовлетворяются подстановкой в (25) значения $R = R(z)$. Для цилиндрической матрицы $R = \text{const}$, для конической $R = R_0 + z \operatorname{tg} \alpha$, где R_0 – радиус матрицы у ее основания; α – угол наклона образующей конуса.

Уравнение деформационного уплотнения (25) получено в результате замкнутого решения осесимметричной задачи при условии пластичности Мизеса. Это уравнение универсальное – пригодно для расчета любых пластически деформируемых дискретных материалов как с регулярной, так и нерегулярной смешанной структурой. При феноменологическом подходе требуется определение трех реологических характеристик: предела текучести σ_s , относительного сжатия ϵ и показателя степени деформационного уплотнения m .

Расчет энергосиловых параметров

Построение силовых диаграмм и определение работы деформации связано с определением среднеинтегральных величин давления на поверхности контакта прессовки с верхним

пуансоном и удельной силы трения на ее боковой поверхности:

$$p = \frac{1}{S} \iint_S p(S) dS = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R [\sigma_z(r) + \tau_{zr}(r)] d\pi r^2 =$$

$$= \frac{2}{R^2} \int_0^R [\sigma_z(r) + \tau_{zr}(r)] r dr, \quad (26)$$

$$\tau_f = \frac{1}{S_f} \iint_{S_f} \tau_f(S_f) dS_f =$$

$$= \frac{1}{2\pi R h} \int_0^h \tau_f(h) d2\pi R h = \frac{1}{h} \int_0^h \tau_f(h) dh, \quad (27)$$

где τ_f – удельная сила трения на боковой поверхности прессовки; S_f – площадь боковой поверхности.

Усилие прессования пористого тела в подвижной матрице с учетом сил контактного трения рассчитывается по формуле

$$P = pS - \tau_f 2\pi R h =$$

$$= 2\pi \int_0^R [\sigma_z(r) + \tau_{zr}(r)] r dr - 2\pi r \int_0^h \tau_f(h) dh. \quad (28)$$

Путь деформирования и относительная плотность прессовки связаны между собой зависимостью $\Delta h = h_0 - h_k / \delta$. Соответственно выражение для определения работы деформации имеет вид

$$A = \int_0^{h_0 - h_k} P(\Delta h) d(\Delta h) = \int_{\delta_0}^{\delta_k} P(\delta) d\delta. \quad (29)$$

Зональная модель распределения плотности

Для определения плотности по координатам очага деформации необходимо определить величину шарового тензора напряжений в каждой точке

$$(T_\sigma^0)_i = \begin{Bmatrix} (\sigma_{cp})_i & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_{cp})_i & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_{cp})_i \end{Bmatrix},$$

где $(\sigma_{cp})_i$ – среднее напряжение в точке, равное первому инварианту тензора напряжений,

$$(\sigma_{cp})_i = \frac{\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\phi}{3} = \frac{\sigma_z + 2\sigma_r}{3}.$$

От величины шарового тензора зависит интенсивность всестороннего равномерного сжатия тела, а следовательно, и величина плотности.

Сущность зональной модели состоит в разделении объема прессовки на определенное число (n) зон и осреднения значения плотности в каждой зоне. Величина плотности в зоне (δ_i) прямо пропорциональна среднему напряжению $(\sigma_{cp})_i$ и определяется по известному значению средней относительной плотности (δ) по объему прессовки:

$$\delta_i = \delta \frac{(\sigma_{cp})_i}{\sigma_{cp}}; \quad (30)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots \sigma_i}{n},$$

где σ_{cp} – среднее напряжение по объему прессовки.

Экспериментально-аналитический метод определения структурно-реологических характеристик шихтовых материалов

Для дискретных металлических материалов предел текучести σ_s и относительное сжатие ε определяются путем построения экспериментальной диаграммы «осевое давление – относительная плотность» $p(\delta)$. Предел текучести принимается равным давлению прессования в момент, когда пластически деформируемое тело проявляет все признаки необратимого изменения формы и размеров. Из уравнений (13), (10) имеем:

$$\sigma_s = p = \frac{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}}{1 - \xi} = \frac{\sqrt{3k \sin \beta}}{(1 - \xi) \tan \beta} = \frac{\cos \beta}{1 - \xi} \sigma_s,$$

отсюда

$$1 = \frac{\cos \beta}{1 - \xi} \quad \text{или} \quad \xi = 1 - \cos \beta. \quad (31)$$

Решая совместно (31) и (25), находим ξ и β .

Величина ε определяется как относительное сжатие образца (брикетной массы) при испытании на сжатие непосредственно в подвижной цилиндрической матрице $\varepsilon = \Delta h / h_0$, где Δh – ход пуансона с момента начала пластической деформации до момента достижения 100%-й критической плотности; h_0 – первоначальная высота образца в момент начала пластической деформации.

Показатель степени деформационного уплотнения определяется из выражения (4)

$$m = \frac{\ln \xi}{\ln(\delta - \delta_0)}. \quad (32)$$

В случае расхождения расчетной диаграммы прессования с экспериментальной требуется уточнение (коррекция) значения показателя m путем последовательных приближений расчетной диаграммы к экспериментальной с максимально возможной степенью конформного отображения.

Полученные значения реологических характеристик материала σ_s , ε и m можно использовать при расчетах энергосиловых параметров процесса прессования того же материала в пресс-формах других размеров и другой геометрической формы.

ВЫВОДЫ

1. На основе решения задачи осесимметричного прессования дискретных металлических материалов разработана универсальная физико-математическая модель процесса прессования в виде замкнутой системы уравнений, полученной методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия металлического пористого тела и условия пластичности Мизеса с учетом всех без исключения факторов прессования: вида и свойств шихты, условий нагружения, температуры, трения и др. В основу моделирования положен идеализированный случай однородного уплотнения пористого тела с последующим определением коэффициента бокового давления,

соответствующего действительной степени уплотнения на различных этапах нагружения.

2. Физико-математическая модель позволяет производить расчеты полей напряжений и плотности по координатам очага деформации, а также энергосиловых параметров (давление, усилие, работа деформации) на любом этапе нагружения при условии определения трех структурно-реологических характеристик материала: предела текучести, относительного сжатия и показателя степени деформационного уплотнения. В силу того, что задача решена применительно к телам вращения в общем виде и в общей постановке, само решение следует рассматривать как методологическое для любой схемы осесимметричного нагружения.

3. Разработан экспериментально-аналитический метод определения структурно-реологических характеристик шихтовых материалов, составляющих основу численных расчетов феноменологической модели. Метод осуществляется путем последовательных приближений расчетных диаграмм прессования к экспериментальной с максимально возможной степенью конформного отображения, в результате чего искомые характеристики приобретают оптимальные значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальшин, М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М. Ю. Бальшин. М.: Металлургия, 1972. 336 с.
2. Жданович, Г. М. Соппротивление порошковых материалов / Г. М. Жданович. Минск: БГПА, 1999. 339 с.
3. Залазинский, А. Г. Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов / А. Г. Залазинский. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 495 с.
4. Соколкин, Ю. В. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел / Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. М.: Наука, 1984. 115 с.
5. Залазинский, А. Г. Модель пластически сжимаемого материала и ее применение к исследованию процесса прессования пористой заготовки / А. Г. Залазинский, А. П. Поляков // Прикладная механика и техническая физика. 2002. № 3. С. 140–151.
6. Поляков, А. П. Об исследовании иерархической структуры материала с помощью процедуры вейвлетного анализа / А. П. Поляков // Известия вузов. Черная металлургия, 2006. № 7. С. 40–44.
7. Березин, И. М. Определение условий пластического течения некомпактных материалов / И. М. Березин, А. Г. Залазинский // Фундаментальные исследования. 2013. № 8. С. 19–23.

8. Друянов, Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел / Б. А. Друянов. М.: Машиностроение, 1989. 164 с.
9. Грин, Р. Дж. Теория пластичности пористых тел / Р. Дж. Грин // Механика. 1973. № 4. С. 109–120.
10. Григорьев, А. К. Деформация и уплотнение порошковых материалов / А. К. Григорьев, А. И. Рудской. М.: Metallurgiya, 1992. 192 с.
11. Рудской, А. И. Физико-механический анализ процессов холодной пластической деформации пористых материалов / А. И. Рудской. СПб.: СПбГТУ, 1998. 146 с.
12. Рыбин, Ю. И. Теория уплотнения порошковых материалов. Теория и математическое моделирование процессов обработки давлением уплотняемых материалов / Ю. И. Рыбин. СПб.: Из-во СПбГПУ, 2002. 110 с.
13. Model for compaction of metal powders / Seon-Jun Park [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. 1999. Vol. 41, No 2. P. 121–141. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(98\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(98)00022-8).
14. Литвинко, А. А. Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей / А. А. Литвинко // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 5. С. 367–375. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375>.
15. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учеб. / В. Н. Анциферов [и др.]; под ред. С. Б. Митина. М.: Металлургия, 1987. 791 с.
5. Zalazinskii A. G., Polyakov A. P. (2002) Model of a Plastically Compressible Material and its Application to the analysis of the Compaction of a Porous Body. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, (3), 457–466.
6. Polyakov A. P. (2006) On the Study of the Hierarchical Structure of a Material Using the Wavelet Analysis Procedure. *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, (7), 40–44 (in Russian).
7. Berezin I. M., Zalazinskii, A. G. (2013) Determination of Conditions for Plastic Flow of Non-Compact Materials. *Fundamentalnye Issledovaniya = Fundamental Research*, (8), 19–23 (in Russian).
8. Druyanov B. A. (1989) *Applied theory of Plasticity of Porous Bodies*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 164 (in Russian).
9. Green R. J. (1972) A plasticity Theory for Porous Solids. *International Journal of Mechanical Sciences*, 14 (4), 215–224. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(72\)90063-X](https://doi.org/10.1016/0020-7403(72)90063-X).
10. Grigoriev A. K., Rudskoy A. I. (1992) *Deformation and Compaction of Powder Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ. 192 (in Russian).
11. Rudskoi A. I. (1998) *Physico-Mechanical Analysis of Cold Plastic Deformation Processes in Porous Materials*. St. Petersburg, Saint-Petersburg State Institute of Technology – Technical University. 146 (in Russian).
12. Rybin Yu. I. (2002) *Theory of Compaction of Powder Materials. Theory and Mathematical Modeling of Pressure Treatment Processes for Compacted Materials*. St. Petersburg, Saint-Petersburg State Polytechnical University. 110 (in Russian).
13. Park S.-J., Han H. N., Oh K. H., Lee D. N. (1999) Model for Compaction of Metal Powders. *International Journal of Mechanical Sciences*, 41 (2), 121–141. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(98\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(98)00022-8).
14. Litvinko A. A. (2023) Hot Briquetting Technology for Ferrous Metal Waste in Molds with Movable Matrix. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 22 (5), 367–375. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-367-375> (in Russian).
15. Antsiferov V. N., Bobrov G. V., Druzhinin L. K., Kiparisov S. S., Kostikov V. I., Krupin A. V., Kudinov V. V., Libenson G. A., Mitin B. S., Roman O. V. (1987) *Powder Metallurgy and Sprayed Coatings*. Moscow, Metallurgiya Publ. 791 (in Russian).

Поступила 06.10.2023

Подписана к печати 11.12.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Balshin M. Yu. (1972) *Scientific Foundations of Powder Metallurgy and Fiber Metallurgy*. Moscow, Metallurgiya Publ. 336 (in Russian).
2. Zhdanovich G. M. (1999) *Resistance of Powder Materials*. Minsk, Belarusian State Polytechnical Academy – BSPA. 339 (in Russian).
3. Zalazinskii A. G. (2000) *Plastic Deformation of Structurally Inhomogeneous Materials*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 495 (in Russian).
4. Sokolkin Yu. V., Tashkinov A. A. (1984) *Mechanics of Deformation and Destruction of Structurally Inhomogeneous Bodies*. Moscow, Nauka Publ. 115 (in Russian).

Received: 06.10.2023

Accepted: 11.12.2023

Published online: 31.01.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-33-45>

УДК 621.873.2

Определение предельных расчетных суммарных значений ветровых нагрузок на элементы противоугонного устройства из эксцентрикового и клинового механизмов

Н. М. Селивончик¹⁾, канд. техн. наук, доц. Н. Л. Нестеренко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Согласно требованиям Правил по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов, противоугонные устройства должны обеспечивать останов последних, находящихся под действием силы ветра, в любой точке рельсового пути, в том числе в месте стыка рельсов, соединяемых боковыми планками. Рекомендованные к применению различные типы противоугонных крановых устройств имеют ряд недостатков, о которых писали в предыдущих статьях. Известны также противоугонные крановые устройства, у которых останов грузоподъемных кранов на рельсовом пути осуществляется стопорным эксцентриком, взаимодействующим с поверхностью головки рельса. Надежность подобных устройств недостаточна, так как из-за постоянного усилия пружины сила сцепления эксцентрика с рельсом не зависит от изменяющейся силы ветра. Для проведения силового расчета противоугонного устройства грузоподъемных кранов, работающих на открытом воздухе, необходимо знать максимальное расчетное значение силы ветра, действующей на его элементы, удерживающие грузоподъемные краны на рельсах при нахождении в нерабочем состоянии. При движении крана, перемещающегося по рельсам под действием силы ветра P_w , эксцентрик, поворачиваясь, передает силу давления со стороны рельса на двуплечий рычаг, соединяющий эксцентриковый механизм с клиновым механизмом. Эксцентриковый механизм, по сути, является приводом вертикального перемещения клина, вследствие которого происходит замыкание клещевого захвата на головке рельса и останов крана. Таким образом, энергия, развиваемая краном, двигаемым силой P_w , используется на его останов. Для этого в статье рассмотрены вопросы определения предельных расчетных значений силы ветра, действующей на суммарные боковые поверхности различных типов грузоподъемных кранов, при разных климатических, аэродинамических, вероятностных и других ветровых нагрузках. Приведена методика определения предельных расчетных суммарных значений ветровых нагрузок на элементы разработанного противоугонного устройства для грузоподъемных кранов, перемещающихся по подкрановым рельсовым путям. Определены расчетные суммарные боковые площади и ветровые нагрузки на мостовые опорные одно- и двухбалочные краны, козловые и башенные краны для разных исполнений, пролетов, грузоподъемностей и других параметров. На основе выполненных расчетов возможно создание модельного ряда противоугонных устройств для различных конструкций грузоподъемных кранов, перемещающихся по подкрановым рельсам, при разных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: грузоподъемные краны, эксцентриковый механизм, клещевой механизм, ветровые нагрузки, плотность воздуха, динамический и аэродинамический коэффициенты, коэффициенты перегрузки, надежности, пульсации ветра

Для цитирования: Селивончик, Н. М. Определение предельных расчетных суммарных значений ветровых нагрузок на элементы противоугонного устройства из эксцентрикового и клинового механизмов / Н. М. Селивончик, Н. Л. Нестеренко // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 33–45. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-33-45>

Determination of Maximum Calculated Total Values of Wind Loads on the Elements of Anti-Theft Device from Eccentric and Wedge Mechanism

N. M. Selivonchik¹⁾, N. L. Nesterenko¹⁾

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

Abstract. To carry out a power calculation of the anti-driveaway device (from now on referred to as – AD) of lifting cranes operating in the open air, it is necessary to know the maximum calculated value of the wind force on the elements of the AD

Адрес для переписки
Селивончик Николай Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Партизанский, 77,
220107, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 350-71-55
selivonchik@mipk.by

Address for correspondence
Selivonchik Nikolay M.
Belarusian National Technical University
77, Partizansky Ave.,
220107, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 350-71-55
selivonchik@mipk.by

According to the requirements of the Rules for ensuring the industrial safety of load-lifting cranes, anti-theft devices must ensure stopping of the latter, which are under the influence of wind, at any point on the rail track, including at the junction of rails connected by side bars. The various types of anti-theft crane devices recommended for use have a number of disadvantages, which have been written about in previous papers. Anti-theft crane devices are also known, in which the stop of lifting cranes on the rail track is carried out by a locking eccentric interacting with the surface of the rail head. The reliability of such devices is insufficient, since due to the constant force of the spring, the adhesion force of the eccentric to the rail does not depend on the changing wind force. To carry out a power calculation of the anti-theft device for cranes operating in the open air, it is necessary to know the maximum calculated value of the wind force acting on its elements that hold the cranes on the rails when the cranes are inoperative. When a crane moves along rails under the influence of wind force P_w , the eccentric, turning, transmits the pressure force from the rail to the double-arm lever connecting the eccentric mechanism to the wedge mechanism. The eccentric mechanism is essentially a drive for the vertical movement of the wedge, as a result of which the pincer clamp closes on the rail head and the crane stops. Thus, the energy developed by the crane, driven by the force P_w , is used to stop it. For this purpose, the paper deals with the issues of determining the maximum design values of the wind force acting on the total lateral surfaces of various types of cranes under different climatic, aerodynamic, probabilistic and other wind loads. A methodology is given for determining the maximum calculated total values of wind loads on the elements of the developed anti-theft device for lifting cranes moving along crane rail tracks. The calculated total lateral areas and wind loads on bridge support single- and double-girder cranes, gantry and tower cranes for various designs, spans, load capacities and other parameters have been determined. Based on the calculations performed, it is possible to create a model range of anti-theft devices for various designs of load-lifting cranes moving on crane rails under various operating conditions.

Keywords: lifting cranes, anti-theft device, eccentric mechanism, tong mechanism, wind loads, air density, dynamic and aerodynamic coefficients, overload coefficients, reliability, wind pulsations.

For citation: Selivonchik N. M., Nesterenko N. L. (2024) Determination of Maximum Calculated Total Values of Wind Loads on the Elements of Anti-Theft Device from Eccentric and Wedge Mechanism. *Science and Technique*. 23 (1), 33–45. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-33-45> (in Russian)

Введение

Данная статья является продолжением идей, изложенных в патенте на полезную модель «Автоматическое противоугонное устройство для грузоподъемных кранов» [1], а также в статьях [2, 3].

Грузоподъемный кран, оснащенный таким противоугонным устройством (ПУ), приобретает возможность самоостанова с учетом требований «Правил по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов» [4]. При движении крана, перемещающегося по рельсам под действием силы ветра P_w , эксцентрик, поворачиваясь, передает силу давления со стороны рельса на двуплечий рычаг, соединяющий эксцентриковый механизм с клиновым механизмом.

Эксцентриковый механизм, по сути, является приводом вертикального перемещения клина, вследствие которого происходят замыкание клещевого захвата на головке рельса и останов крана. Таким образом, энергия, развиваемая краном, двигаемым силой P_w , используется на его останов.

Основная часть

Противоугонное устройство, представляющее собой кинематическое соединение двух механизмов – эксцентрикового и клинового, – показано на рис. 1.

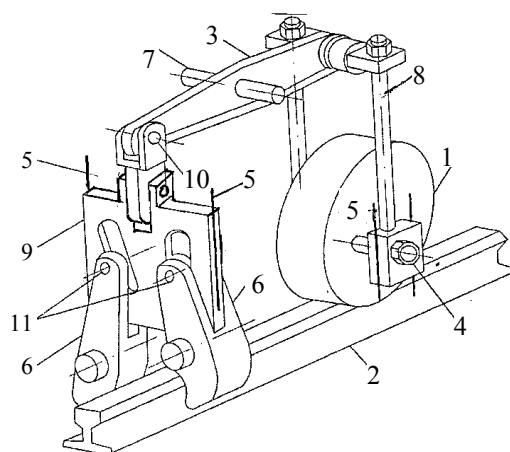


Рис. 1. Схема взаимодействия эксцентрикового и клинового механизмов в противоугонном крановом устройстве: 1 – эксцентрик, находящийся на рельсе; 2 – рельс кранового пути; 3 – рычаг; 4 – ползун; 5 – прорези в корпусе противоугонного устройства; 6 – рычаги клещевого захвата; 7 – ось поворота; 8 – тяга; 9 – клин; 10 – шарниры; 11 – ролики рычагов захвата

Fig. 1. Scheme of eccentric and wedge mechanisms interaction in anti-theft crane device: 1 – eccentric located on the rail; 2 – rail of crane runway; 3 – lever; 4 – slider; 5 – slots in the body of anti-theft device; 6 – grab levers; 7 – rotation axis; 8 – thrust; 9 – wedge; 10 – pivots; 11 – rollers of grab levers

Предельные расчетные суммарные значения ветровых нагрузок на элементы рассматриваемого противоугонного устройства, согласно приложению В, ГОСТ 32579.1–2013 [5], вычисляются по формуле

$$\Sigma P_w = P_w \Sigma A, \quad (1)$$

где P_w – суммарная распределенная расчетная ветровая нагрузка на единицу наветренной площади грузоподъемных устройств; ΣA – суммарная наветренная площадь грузоподъемных устройств (приложение 1, ГОСТ 1451–77 [6]).

Суммарная распределенная расчетная ветровая нагрузка на единицу площади для нерабочего состояния грузоподъемных устройств определяется по приложению В, ГОСТ 32579.1–2013 [5], как

$$P_w = (1 + 3 + m_n \varepsilon) K \gamma_p p = (1 + 3 + m_n \varepsilon) p_1, \quad (2)$$

где $p = g k c n$ – распределенная ветровая нагрузка на единицу наветренной площади грузоподъемных устройств, согласно ГОСТ 1451–77 [6]; $p_1 = p \gamma_p K$ – то же, что и параметр p , но с учетом коэффициентов γ_p и K ; $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха, согласно разделу 2, ГОСТ 1451–77 [6]; H – высота расположения от поверхности земли элементов грузоподъемных устройств; $c = 0,1 : 4$ – коэффициент аэродинамической силы, принимаемый по приложению 1, ГОСТ 1451–77 [6]; $n = 1,1$ – то же перегрузки, учитываемый при расчете элементов грузоподъемных устройств по методу предельных состояний, если в нормах на проектирование грузоподъемных устройств не приводится его другое значение согласно п. 5.3 ГОСТ 1451–77 [6]; $\gamma_p = 1,16$ – частный коэффициент надежности по нагрузке табл. 1 для ветровых нагрузок нерабочего состояния [5, табл. 1, 4] для комбинаций нагрузок группы С2 [5, табл. 5]; m_n – коэффициент пульсации ветра, зависящий от высоты расположения наветренной площади, согласно табл. В.2, ГОСТ 32579–2013 [5], или рис. 2; $g = \rho v^2 / 2$ – динамическое давление ветра, Па, на высоте 10 м от поверхности земли для конкретной точки ее поверхности, принимаемое для нерабочего состояния грузоподъемных устройств в зависимости от скорости ветра v в соответствии с табл. 2, ГОСТ 1451–77 [6], или рис. 3; v – скорость ветра, м/с, на высоте 10 м от земли для конкретной точки ее поверхности для нерабочего состояния грузоподъемных устройств, принимаемая в соответствии с табл. 2, ГОСТ 1451–77 [6], или рис. 3; K – коэффициент, учитывающий изменение динамического давления ветра g по высоте H в соответствии

с табл. 1, ГОСТ 1451–77 [6], или рис. 4; K – коэффициент, учитывающий вероятность появления ветра максимальной скорости в зависимости от срока эксплуатации грузоподъемных устройств для ветровой нагрузки нерабочего состояния этих устройств, согласно табл. В.1, ГОСТ 32579.1 [5], или рис. 5; $\varepsilon = 3,4(1 - 0,7e^{-0,4\tau}) = 1/2,68$ – коэффициент динамичности для ПУ грузоподъемных устройств, кроме свободно стоящих башенных кранов; $\tau = 0 - 3$ – период свободных колебаний грузоподъемных устройств по первому тону, в с, для устройств, рассмотренных в сопутствующей литературе [5, 7–10]; $e = 2,718$ – экспонента;

$$\varepsilon = 3 \sqrt{\frac{G_{\text{кн}} h_{\text{к}} + q Q h_Q}{J_{\text{к}}}} \quad \text{– коэффициент динамичности для свободно стоящих башенных кранов, согласно п. 7.3 ГОСТ 32579.1–2013 [5]; } G_{\text{кн}} \text{ – вес кранов, кН; } h_{\text{к}} \text{ – высота центра тяжести крана над плоскостью его опорного контура, м; } q \text{ – ускорение свободного падения, м/с}^2; Q \text{ – грузоподъемность крана, т; } h_Q \text{ – высота точки подвеса грузового полиспаста над плоскостью опорного контура крана, м; } J_{\text{к}} \text{ – момент инерции крана относительно ребра опрокидывания, т·м}^2 \text{ (схемы определения ребер опрокидывания кранов – ГОСТ 32579.1–2013 [5, рис. 1]).}$$

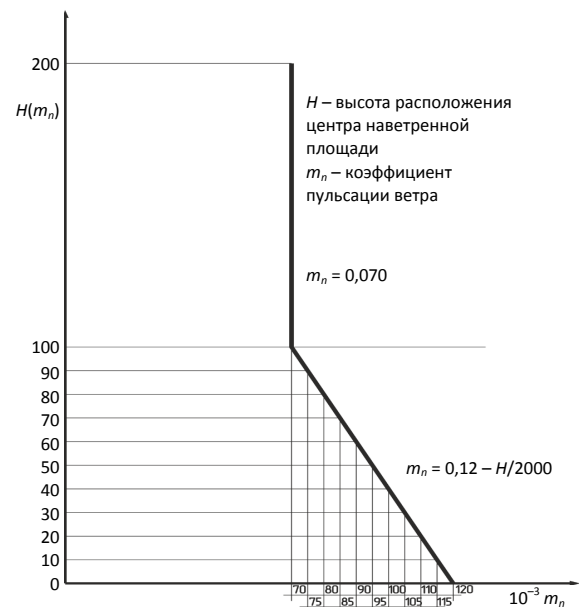


Рис. 2. Графическая и математическая зависимости между параметрами $H(m_n)$

Fig. 2. Graphic and mathematical dependencies between parameters $H(m_n)$

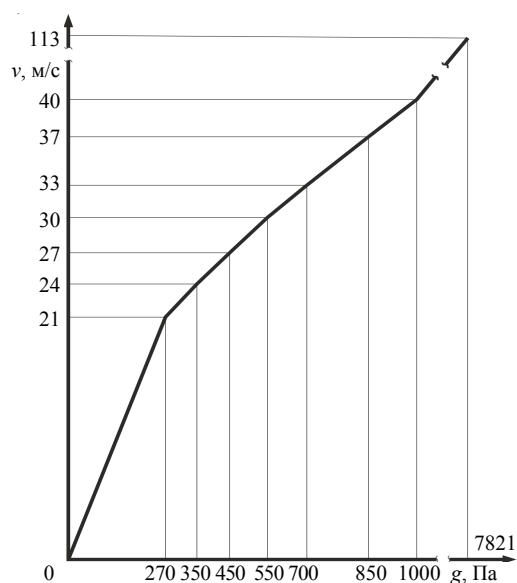


Рис. 3. Графическая зависимость динамического давления ветра g и скорости ветра v на высоте 10 м от поверхности земли для конкретной точки ее поверхности

Fig. 3. Graphic dependence of dynamic wind pressure g and wind speed v at height of 10 m from the earth surface for a specific point on its surface

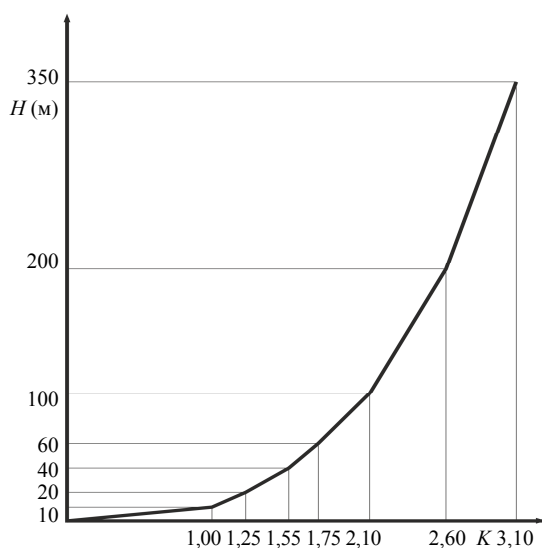


Рис. 4. Графическая зависимость коэффициента K , учитывающего изменение динамического давления ветра по высоте H , м

Fig. 4. Graphic dependence of coefficient K , taking into account the change in dynamic wind pressure along height H , m

Результаты вычислений параметра $(3m_n \epsilon)$ для значений ϵ от 0,25 до 4,0 с интервалом 0,25 для высот H от 10 до 100 м и свыше с интервалом 10 м при значениях m_n от 0,115 до 0,7 с интервалом 0,005 приведены на рис. 6.

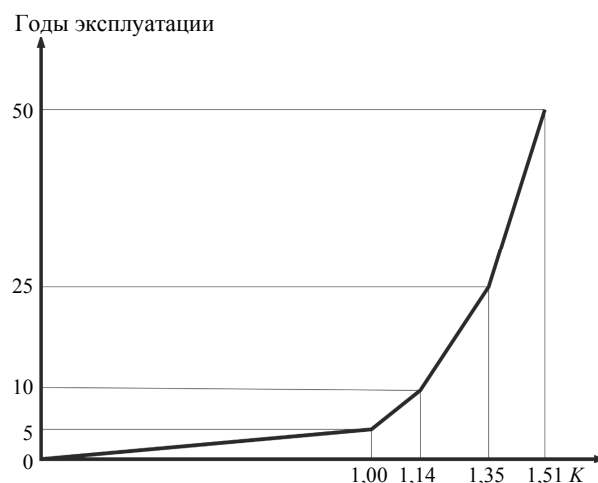


Рис. 5. Графическая зависимость динамического коэффициента K , учитывающего вероятность появления ветра максимальной скорости, от срока эксплуатации грузоподъемных устройств в годах для ветровой нагрузки нерабочего состояния

Fig. 5. Graphic dependence of dynamic coefficient K , which takes into account the probability of occurrence of wind of maximum speed, from the service life of lifting devices in years for the wind load of the non-operating state

Результаты вычислений зависимости параметра P_w от v , g , ϵ , c , K и H с учетом вероятности появления ветровой нагрузки нерабочего состояния максимальной скорости в зависимости от срока эксплуатации грузоподъемных устройств в течение 25 лет приведены на рис. 7.

Согласно разделу 1 ГОСТ 22045–89 [11], краны мостовые электрические однобалочные опорные должны изготавливаться типов:

- 1 – для работы в помещениях;
- 2 – для работы на открытом воздухе.

Каждый тип крана изготавливается двух исполнений:

- А – управление с пола;
- Б – управление из кабины.

Для рассматриваемого случая нас интересуют краны типа 2 в исполнении А и Б.

Основные параметры и размеры данных кранов приведены на рис. 5, 6 и в табл. 9–14 ГОСТ 22045–89 [11].

Из анализа рисунков и таблиц установлены суммарные наветренные площади кранов ΣA (m^2), включающие боковые площади кранов, кабины, электротали и других элементов в зависимости от применяемых пролетов L_k (м), исполнений и грузоподъемности Q (т). Эти данные приведены на рис. 8.

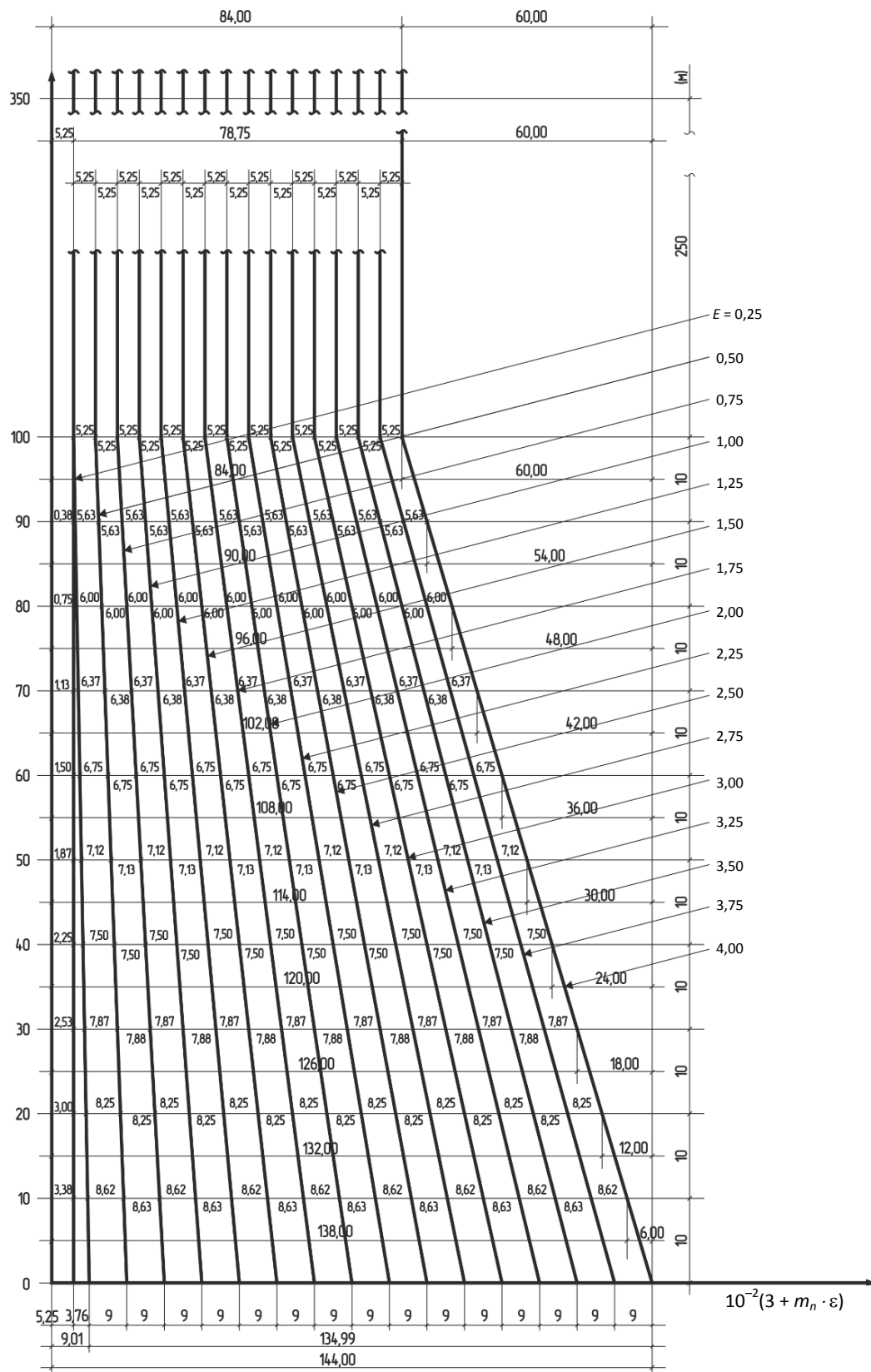

 Рис. 6. Зависимости между параметрами H и $10^{-2}(3 + m_n \cdot \epsilon)$

 Fig. 6. Dependencies between parameters H and $10^{-2}(3 + m_n \cdot \epsilon)$

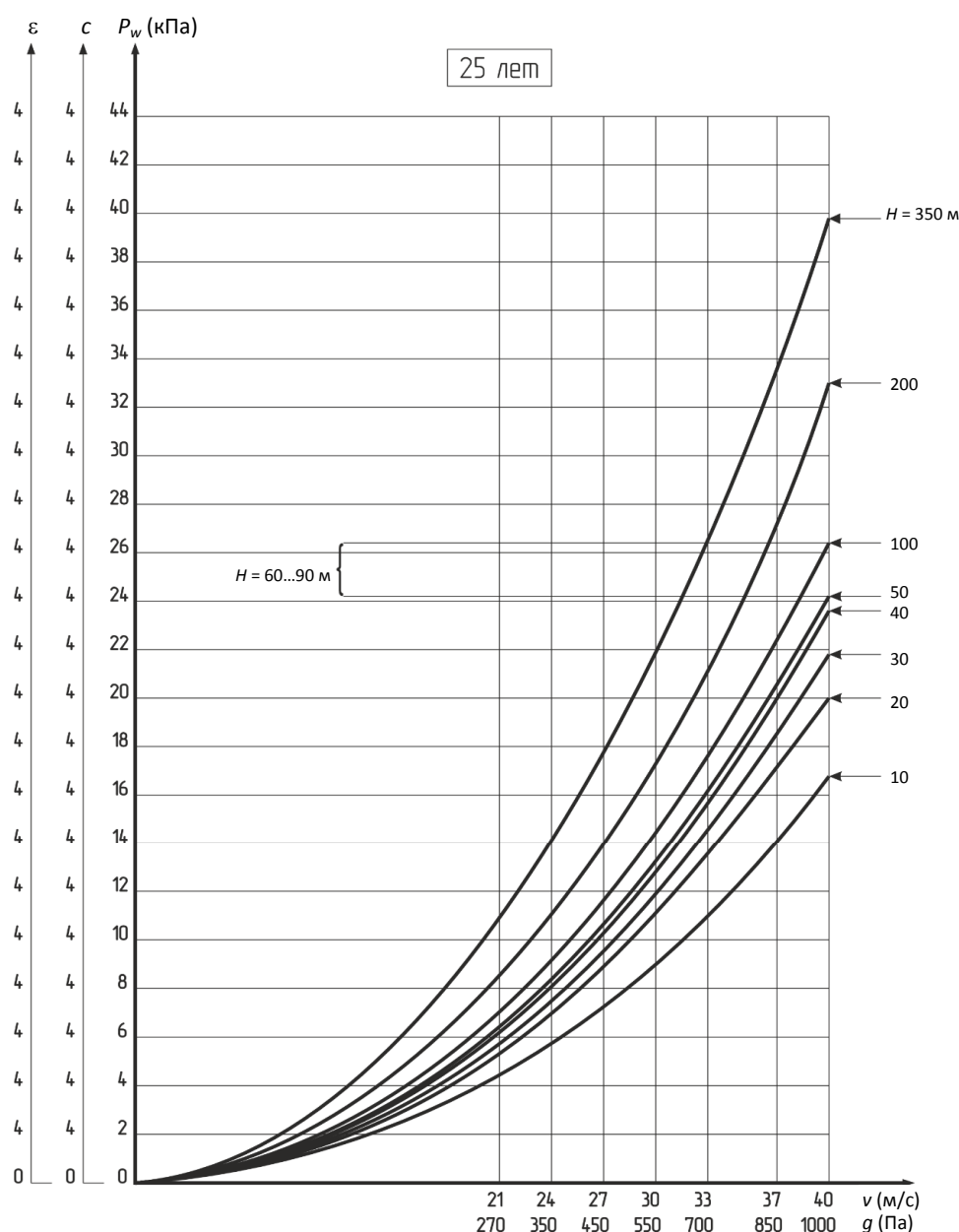


Рис. 7. Графические зависимости параметра P_w от g , ϵ , c , H

Fig. 7. Graphic dependencies of parameter P_w on g , ϵ , c , H

В соответствии с п. 1.5 ГОСТ 22045–89 [11] рекомендуется применять рассматриваемые краны для высоты H от поверхности земли до 40 м, а согласно п. 1.6 для кранового пути следует применять железнодорожные рельсы узкой колеи Р24 по ГОСТ 6368–82 [12] или квадрат 50 по ГОСТ 2591–2006 [13].

Согласно п. 2.12.1 ГОСТ 22045–89 [11], полный установленный срок службы кранов на открытом воздухе – 15 лет.

Согласно п. 2, 3, 11 и табл. 6 ГОСТ 25711–83 [14], краны мостовые электрические опорные двухбалочные общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 т должны изготавливаться типов: О – облегченный, режимная группа 3К; Н – нормальный, режимная группа 5К; Т – тяжелый, режимная группа 7К.

В зависимости от механизмов подъема краны изготавливают в следующих исполнениях:

- 1 – с одним механизмом подъема;
- 2 – с одним главным и одним вспомогательными механизмами подъема.

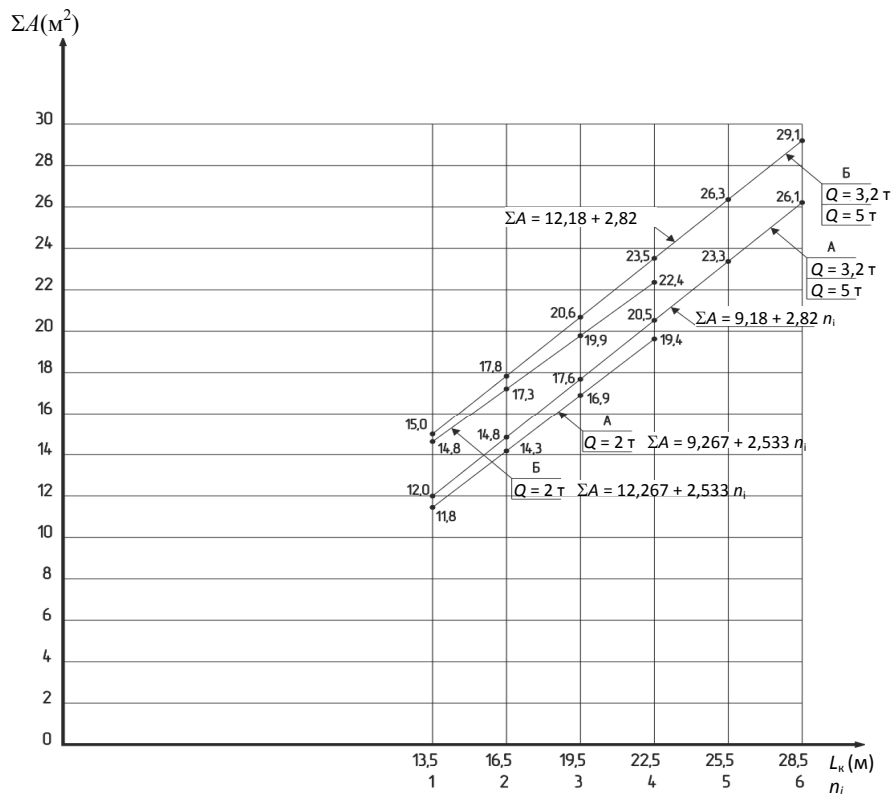


Рис. 8. Предельные расчетные суммарные боковые площади ΣA , m^2 , мостовых электрических однобалочных опорных кранов пролетом $L_k = 13,5\text{--}28,5$ м

Fig. 8. Maximum calculated total lateral areas ΣA , m^2 , of overhead electric single-girder support cranes with a span $L_k = 13.5\text{--}28.5$ m

В зависимости от места, с которого управляют краном, устанавливаются следующие исполнения: А – управление с пола; Б – управление из кабины.

Краны типа Н изготавливаются не менее чем с одной площадкой обслуживания, типа Т – с двумя площадками обслуживания.

Полный установленный срок службы кранов, размещенных в помещениях, должен быть не менее значений, приведенных в табл. 1 [15].

Срок службы крана определяется сроком службы несущих металлических конструкций.

Таблица 1

Наименование крана	Нормы для групп режима (лет)			
	1К, 2К	3К	4К, 5К	6К, 7К
Краны мостовые и козловые с грузовой тележкой	30	25	25	20
Козловые краны с электроталью	25	20	–	–

Для кранов, устанавливаемых на открытом воздухе, допускается уменьшать срок службы до 25 %.

Согласно прил. 4 ГОСТ 25711–83 [14], для кранового пути следует применять железнодо-

рожные рельсы типов Р43 и Р50 или крановые рельсы типов КР70 и КР80.

Основные параметры и размеры кранов по ГОСТ 25711–83 [14] приведены на рис. и в табл. 1–3 этого ГОСТа.

Из анализа рисунков и таблиц по аналогии с однобалочными кранами установлены суммарные наветренные площади кранов ΣA (m^2). Эти данные приведены на рис. 9.

Основные параметры и размеры мостовых электрических двухбалочных опорных кранов общего назначения грузоподъемностью от 80 до 500 т по ГОСТ 15150–69 [15] приведены на рис. 1–3 и в табл. 1–23 ГОСТ 6711–81 [16].

Из анализа рисунков и таблиц установлены предельные расчетные суммарные боковые площади ΣA m^2 мостовых электрических двухбалочных опорных кранов общего назначения, управляемых из кабины, при высоте подъема груза до 40 м и группах режима работы 3К, 5К, 6К для грузоподъемности $Q = 80/20, 100/20, 125/20$ т при пролетах $L_k = 10\text{--}43$ м с шагом 3 м. Эти данные приведены на рис. 10.

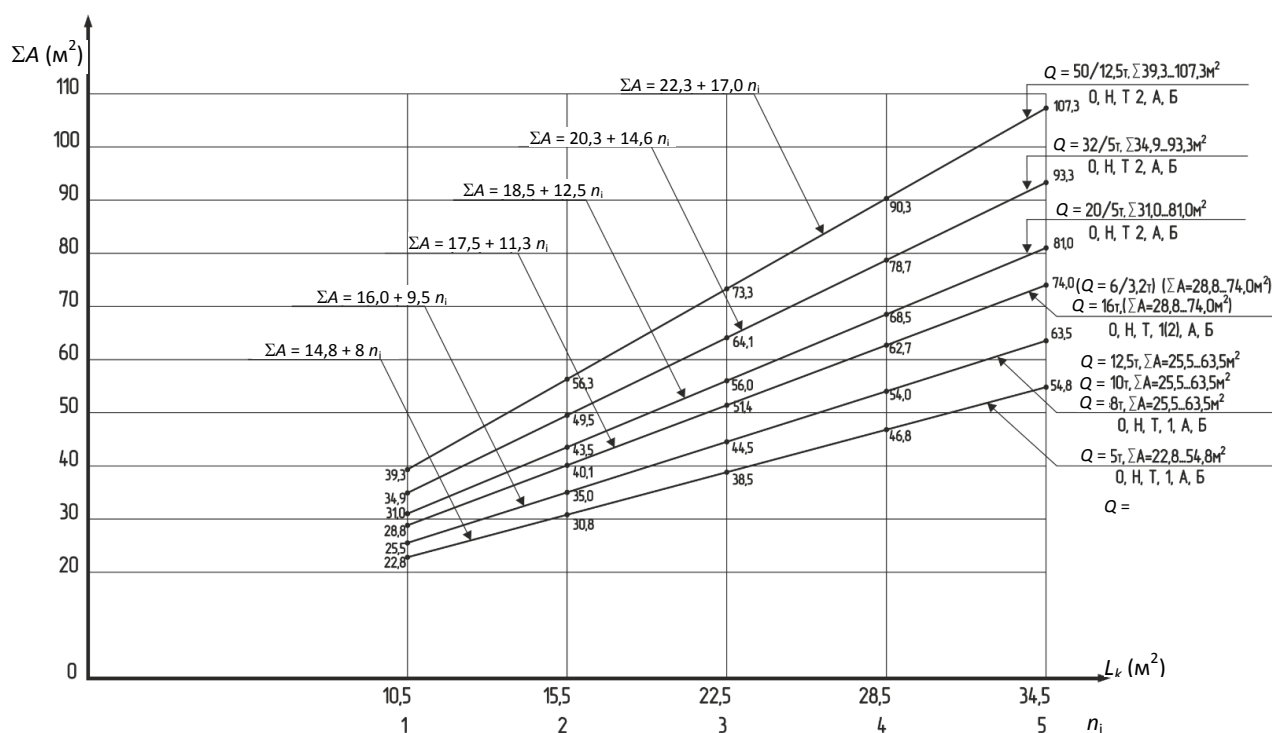


Рис. 9. Предельные расчетные суммарные боковые площади ΣA , м^2 , мостовых электрических двухбалочных опорных кранов пролетом $L_k = 10,5\text{--}34,5$ м

Fig. 9. Maximum calculated total lateral areas ΣA , м^2 , of overhead electric double-girder support cranes with a span $L_k = 10,5\text{--}34,5$ m

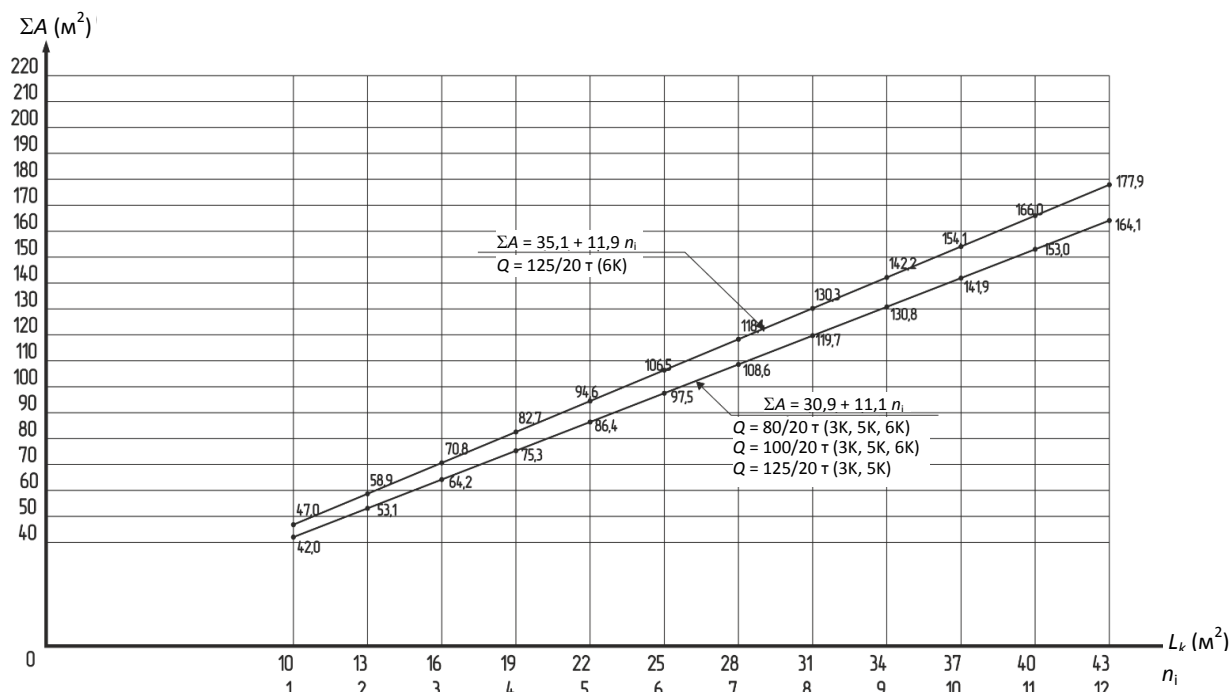


Рис. 10. Предельные расчетные суммарные боковые площади ΣA , м^2 , мостовых электрических двухбалочных опорных кранов грузоподъемностью $Q = 200/20, 100/10, 125/20$ т

Fig. 10. Maximum calculated total lateral areas ΣA , м^2 , of overhead electric double-girder support cranes $Q = 200/20, 100/10, 125/20$ t

На рис. 11 представлены аналогичные данные для кранов грузоподъемностью $Q = 160/32, 200/32, 250/32, 320/32, 400/80, 500/80$ т при пролетах $L_k = 9,5-33,5$ и $15,5-33,5$ м.

Для рассмотренных мостовых электрических одно- и двухбалочных опорных грузоподъемных кранов при определении суммарных распределенных расчетных ветровых нагрузок P_w на единицу площади для неработающего состояния кранов в запас прочности и для унификации ПУ принимаем срок эксплуатации грузоподъемных кранов 25 лет, тогда коэффициент $K = 1,35$; высота эксплуатации грузоподъемных кранов $H = 40$ м, тогда коэффициент $k = 1,55$; частный коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_p = 1,16$; коэффициент перегрузки $n = 1,1$; коэффициент аэродинамической силы $c = 2$; коэффициент динамичности $\varepsilon = 0$; распределенная ветровая нагрузка на единицу площади грузоподъемных кранов $p = gkc n = g \cdot 1,55 \cdot 2 \cdot 1,1 = 3,41g$; распределенная ветровая нагрузка на единицу площади грузоподъемных кранов с учетом частного коэффициента надежности по нагрузке и коэффициента срока эксплуатации грузоподъем-

ных кранов $p_1 = p\gamma_p K = 3,41g \cdot 1,16 \cdot 1,35 = 5,34g$; g – динамическое давление ветра (Па) на высоте 10 м от поверхности земли в соответствии с рис. 3; коэффициент пульсации ветра на высоте 40 м $m_n = 0,1$; величина $(1 + 3m_n\varepsilon)$ в формуле (2) равна $(1 + 3 \cdot 0,1 \cdot 0) = 1$.

Тогда, согласно формуле (2), $P_w = (1 + 3m_n\varepsilon) \times p_1 = 1 \cdot 5,34g = 5,34g$.

Численные значения P_w для различных g приведены в табл. 2.

Таблица 2

g (кПа)	270	350	450	550	700	850	1000
P_w (кПа)	1,442	1,869	2,403	2,937	3,738	4,539	5,340

Учитывая полученные значения P_w и ΣA , приведенные на рис. 8–11, согласно формуле (1), получим предельные расчетные суммарные значения ветровых нагрузок ΣP_w на элементы ПУ, устанавливаемые на мостовые электрические одно- и двухбалочные опорные краны разных типов, исполнений, грузоподъемности пролетов, режимных групп и других параметров, оговоренных в табл. 3–6.

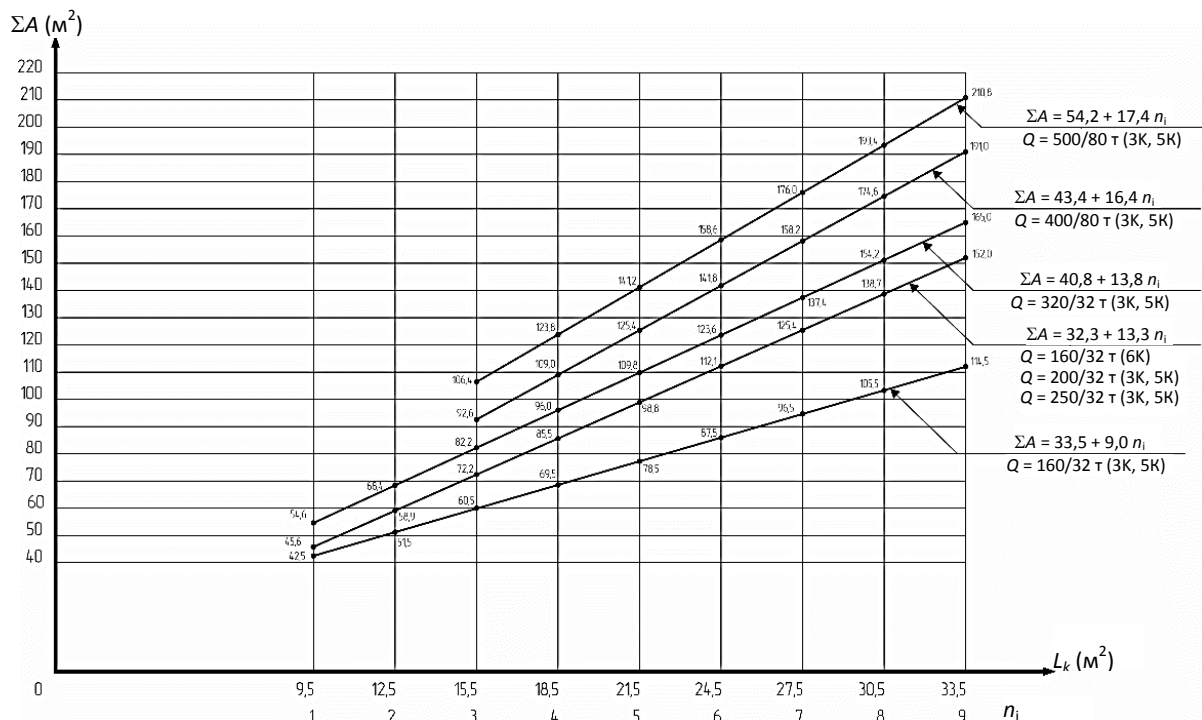


Рис. 11. Предельные расчетные суммарные боковые площади ΣA , m^2 , мостовых электрических двухбалочных опорных кранов грузоподъемностью $Q = 160/30, 250/32, 320/32, 900/80, 500/180$ т

Fig. 11. Maximum calculated total lateral areas ΣA , m^2 , of overhead electric double-girder support cranes $Q = 160/30, 250/32, 320/32, 900/80, 500/180$ t

Конструктивные решения козловых и башенных кранов настолько разнообразны, что их суммарные наветренные площади необходимо определять для каждого крана индивидуально с учетом высотного расположения их отдельных частей.

В общем виде для козловых и башенных кранов это решается по формуле

$$\Sigma A = A_i \Delta_i. \quad (3)$$

Здесь A_i – максимальные наветренные площади элементов кранов на каждой из отметок 10 м от уровня земли; Δ_i – процент дырчатости конструкций кранов, вычисленный по их фактическому конструктивному решению или взятый из паспортов кранов или других документов при их наличии.

Далее величина ΣP_w для данных кранов, как и для нерассмотренных, определяется с учетом рекомендаций данной статьи.

Таблица 3

g (Па)	P _w (кПа)	L _к (м)	ΣP _w (кН)	
			Q = 2 т	
			Исполнение	
			А	Б
270	1,442	13,5	17,016	21,342
		22,5	27,975	32,301
350	1,869	13,5	22,054	27,661
		22,5	36,259	41,886
450	2,403	13,5	28,355	35,564
		22,5	46,618	53,827
550	2,937	13,5	34,657	43,468
		22,5	56,978	65,789
700	3,738	13,5	44,108	55,322
		22,5	72,517	83,731
850	4,539	13,5	53,560	67,177
		22,5	88,057	101,674
1000	5,340	13,5	63,012	79,032
		22,5	103,596	119,616

g (Па)	P _w (кПа)	L _к (м)	ΣP _w (кН)	
			Q = 3,2 т; 5 т	
			Исполнение	
			А	Б
270	1,442	13,5	17,304	21,630
		28,5	37,636	41,962
350	1,869	13,5	22,428	28,035
		28,5	48,781	54,388
450	2,403	13,5	28,836	36,045
		28,5	62,718	69,927
550	2,937	13,5	35,244	44,055
		28,5	76,656	85,467
700	3,738	13,5	44,856	56,070
		28,5	97,562	108,776
850	4,539	13,5	54,468	68,085
		28,5	118,468	132,085
1000	5,340	13,5	64,080	80,100
		28,5	139,374	155,394

Таблица 4

g (Па)	P _w (кПа)	L _к (м)	ΣP _w (кН)					
			Q (т)					
			5	8; 10; 12,5	16; 16/3,2	20/5	32/5	50/12,5
270	1,442	10,5	32,878	36,771	41,530	44,702	50,326	56,671
		34,5	79,022	91,567	106,708	116,802	134,539	154,727
350	1,869	10,5	42,613	47,660	53,827	57,939	65,228	73,452
		34,5	102,421	118,682	138,306	151,389	174,378	200,544
450	2,403	10,5	54,788	61,277	69,206	74,493	83,865	94,438
		34,5	131,684	152,591	177,822	194,643	224,200	257,842
550	2,937	10,5	66,964	74,894	84,586	91,047	102,501	115,424
		34,5	160,948	186,500	217,338	237,897	274,022	315,140
700	3,738	10,5	85,226	95,319	107,654	115,878	130,456	146,903
		34,5	204,842	237,363	276,612	302,778	348,755	401,087
850	4,539	10,5	103,489	115,745	130,723	140,709	158,411	178,383
		34,5	248,737	288,227	335,886	367,659	423,489	487,035
1000	5,340	10,5	121,752	136,170	153,792	165,540	186,366	209,862
		34,5	292,632	339,090	395,160	432,540	498,222	572,982

Таблица 5

g (Па)	P _w (кПа)	L _к (м)	ΣP _w (кН)			
			Группы режимов работы			
			3К; 5К; 6К		3К; 5К	6К
			Q = 80/20 т	Q = 100/20 т	Q = 125/20 т	Q = 125/20 т
270	1,442	10	60,564			67,774
		43	236,632			256,532
350	1,869	10	78,498			87,843
		43	306,703			332,495
450	2,403	10	100,926			112,941
		43	394,332			427,493
550	2,937	10	123,354			138,039
		43	481,962			522,492
700	3,738	10	156,996			175,686
		43	613,406			664,990
850	4,539	10	190,638			213,333
		43	744,850			807,488
1000	5,340	10	224,280			250,980
		43	876,294			949,986

Таблица 6

g (Па)	P _w (кПа)	L _к (м)	ΣP _w (кН)				
			Группы режимов работы				
			3К; 5К	6К	3К; 5К		
			Q = 160/ 32 т	Q = 160/ 32 т	Q = 200/ 32 т	Q = 250/ 32 т	Q = 320/ 32 т
270	1,442	9,5	61,285	69,755			78,733
		33,5	165,109	219,184			237,930
350	1,869	9,5	79,433	85,226			102,047
		33,5	214,001	284,088			308,385
450	2,403	9,5	102,128	109,577			131,204
		33,5	275,144	365,256			396,495
550	2,937	9,5	124,823	133,927			160,360
		33,5	336,287	446,424			484,605
700	3,738	9,5	158,865	170,453			204,095
		33,5	428,001	568,176			616,770
850	4,539	9,5	192,908	206,978			247,829
		33,5	519,716	689,928			748,935
1000	5,340	9,5	226,950	243,504			291,564
		33,5	611,430	811,680			881,100

g (Па)	P _w (кПа)	L _к (м)	ΣP _w (кН)	
			Группы режимов работы	
			3К; 5К	
			Q = 400/ 80 т	Q = 500/ 80 т
270	1,442	15,5	133,529	153,429
		33,5	275,422	303,974
350	1,869	15,5	173,060	198,862
		33,5	356,979	393,985
450	2,403	15,5	222,518	255,679
		33,5	458,973	506,552
550	2,937	15,5	271,966	312,497
		33,5	560,967	619,120
700	3,738	15,5	346,139	397,723
		33,5	713,958	787,970
850	4,539	15,5	420,311	482,950
		33,5	866,949	956,821
1000	5,340	15,5	494,484	568,176
		33,5	1019,940	1125,672

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена методика определения предельных расчетных суммарных значений ветровых нагрузок на элементы разработанного противоугонного устройства для грузоподъемных кранов, перемещающихся по подкрановым рельсовым путям.

2. Установлены математические и графические зависимости динамического давления и скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли, коэффициентов, учитывающих изменение динамического давления ветра и пульсации, от высоты расположения наветренной площади, динамического коэффициента, учитывающего вероятность появления ветра максимальной скорости в зависимости от срока эксплуатации грузоподъемных устройств, другие зависимости.

3. Определены расчетные суммарные боковые площади и ветровые нагрузки на мостовые опорные одно- и двухбалочные краны, козловые и башенные краны для различных исполнений, пролетов, грузоподъемностей и других параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическое противоугонное устройство для грузоподъемных кранов: пат. ВУ 12950 / А. Н. Наталевич, Н. Л. Нестеренко, Н. М. Селивончик. Опубл. 30.08.2022.
2. Селивончик, Н. М. Основы расчета противоугонного кранового устройства из эксцентрикового и клещевого механизмов / Н. М. Селивончик, Н. Л. Нестеренко // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 4. С. 296–301. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-296-301>.
3. Селивончик, Н. М. Силовой расчет противоугонного кранового устройства из эксцентрикового и клинового механизмов / Н. М. Селивончик, Н. Л. Нестеренко // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 2. С. 113–118. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-113-118>.
4. Правила по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов [Электронный ресурс]: утв. постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 22.12.2018, № 66 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934170p&p1=1>. Дата доступа: 14.04.2021.
5. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 1:

Общие положения: ГОСТ 32579.1–2013. М.: Стандартинформ, 2015. 30 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/577/57770.pdf>.

6. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения: ГОСТ 1451–77. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 13 с.
7. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 2: Краны стреловые самоходные: ГОСТ 32579.2–2013. М.: Стандартинформ, 2015. 8 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293769/4293769479.pdf>.
8. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 3: Краны башенные: ГОСТ 32579.3–2013. М.: Стандартинформ, 2015. 8 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293769/4293769479.pdf>.
9. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 4: Краны стреловые: ГОСТ 32579.4–2013. М.: Стандартинформ, 2015. 10 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/577/57766.pdf>.
10. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 5: Краны мостового типа. ГОСТ 32579.5–2013. М.: Стандартинформ, 2015. 14 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293769/4293769477.pdf>.
11. Краны мостовые электрические однобалочные опорные. Технические условия: ГОСТ 22045–89. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 26 с.
12. Рельсы железнодорожные узкой колеи типов Р8, Р11, Р18 и Р24. Конструкция и размеры: ГОСТ 6368–82. М.: Изд-во стандартов, 1989. 6 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294852/4294852756.pdf>.
13. Прокат сортовой стальной горячекатаный квадратный. Сортамент: ГОСТ 2591–2006. М.: Стандартинформ, 2006. 17 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293832/4293832576.pdf>.
14. Краны мостовые электрические общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 т. Типы, основные параметры и размеры: ГОСТ 25711–83. Введ. 01.07.1985. М.: Изд-во стандартов, 1983. 20 с. Режим доступа: https://simkran.ru/upload/doc/gost/GOST_25711-83_www-simkran-ru.pdf.
15. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов, категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды: ГОСТ 15150–69. Введ. 01.01.1971. М.: Стандартинформ, 2010. 71 с. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003320>.
16. Краны мостовые электрические общего назначения грузоподъемностью от 80 до 500 т. Основные параметры и размеры: ГОСТ 6711–81. Введ. 01.01.1982. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1985. 35 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293802/4293802565.pdf>.

Поступила 03.10.2023

Подписана к печати 14.12.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Natalevich A. N., Nesterenko N. L., Selivonchik N. M. (2022). *Automatic Anti-Theft Device Fore Cranes*. Patent BY No 12950 (in Russian).
2. Selivonchik N. M., Nesterenko N. L. (2021) Basics of Calculating Anti-Theft Crane Device from Eccentric and Tick-Borne Mechanisms. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 20 (4), 296–301. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-296-301> (in Russian).
3. Selivonchik N. M., Nesterenko N. L. (2023) Power Calculation of Anti-Driveaway Crane Device from Eccentric and Wedge Mechanisms. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*. 22 (2), 113–118. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-113-118> (in Russian).
4. Rules on Ensuring Industrial Safety of Hoisting Cranes: Resolution of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus of December 22, 2018 No 66. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934170p&p1=1> (accessed 14 April 2021) (in Russian).
5. State Standard 32579.1–2013. *Cranes. Design Principles for Loads and Load Combinations. Part 1. General*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 30. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data/577/57770.pdf> (in Russian).
6. State Standard 1451–77. *Cranes. Wind Load. Norms and Method of Determination*. Moscow, Publishing House of Standards, 2003. 13 (in Russian).
7. State Standard 32579.2–2013. *Cranes. Design Principles for Loads and Load Combinations Part 3. Tower Cranes*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 8. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293769/4293769479.pdf> (in Russian).
8. State Standard 32579.3–2013. *Cranes. Design Principles for Loads and Load Combinations Part 3. Tower Cranes*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 8. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293769/4293769479.pdf> (in Russian).
9. State Standard 32579.4–2013. *Cranes. Design Principles for Loads and Load Combinations. Part 4: Jib Cranes*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 10. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data/577/57766.pdf> (in Russian).
10. State Standard 32579.5–2013. *Cranes. Design Principles for Loads and Load Combinations. Part 5. Overhead Type Crane*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 14. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293769/4293769477.pdf> (in Russian).
11. State Standard 22045–89. *Interstate Standard. Single-beam Electric Overhead Cranes. Technical Specifications*. Moscow, Publishing House of Standards, 1999. 26 (in Russian).
12. State Standard 6368–82. *Type R8, R11, R18 and R24 Narrow-Gauge Railway Rails. Design and Dimensions*. Moscow, Publishing House of Standards, 1989. 6. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294852/4294852756.pdf> (in Russian).
13. State Standard 2591–2006. *Square Hot-Rolled Steel Bars. Dimensions*. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 17. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293832/4293832576.pdf> (in Russian).
14. State Standard 25711–83. *Electrical Overhead Travelling type Cranes for General Purposes. Types, Basic parameters and Dimensions*. Moscow, Publishing House of Standards, 1983. 20. Available at: https://simkran.ru/upload/doc/gost_25711-83www-simkran-ru.pdf (in Russian).
15. State Standard 15150–69. *Machines, Instruments and Other Industrial Products. Modifications for Different Climatic regions. Categories, Operating, Storage and Transportation Conditions as to Environment Climatic Aspects Influence*. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 71. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200003320> (in Russian).
16. State Standard 6711–81. *General-Purpose Electric Bridge Cranes of Load Capacity From 80 to 500 tn* Basic Parameters and Dimensions*. Moscow, Publishing House of Standards, 1985. 35. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293802/4293802565.pdf> (in Russian).

Received: 03.10.2023

Accepted: 14.12.2023

Published online: 31.01.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57>

УДК 624.131.552

Методика расчета дополнительных динамических осадок оснований плитных фундаментов зданий и сооружений от вибраций, распространяющихся в грунтовой среде

Канд. техн. наук К. Э. Повколас¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье приводится методика расчета дополнительных осадок плитных фундаментов существующих зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, которые возникают при производстве различных строительных работ вблизи них (забивка свай, вибропогружение шпунтовых балок, уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками и виброкатками), а также от промышленного оборудования и транспорта. Методика включает следующие основные этапы. При помощи метода конечных элементов, или измеренных существующих вибрационных полей, определяется распределение максимальных ускорений колебаний грунта под подошвой фундамента по глубине и выявляется зона, в которой они превышают критические ускорения, при которых начинают проявляться объемные и сдвиговые деформации грунта. Грунт в основании фундамента разбивается на элементарные слои толщиной не более 1/4 ширины фундамента. Далее, по известным виброкомпрессионным зависимостям (зависимость изменения коэффициента пористости e образцов грунта от ускорения их колебаний a), которые получают в лабораторных условиях, определяются осадки каждого слоя, суммирование которых дает полную величину дополнительной динамической осадки S_d . Если она в совокупности со статической осадкой $S_{ст}$ превышает предельные нормируемые величины осадок, предлагается использовать три способа уменьшения или устранения S_d – буроинъекционное упрочнение зоны развития дополнительных осадок, использование горизонтальной инерционной плиты или вертикального барьера из легкосжимаемых материалов на пути распространения колебаний, применение которых снижает интенсивность вибродинамических воздействий, передаваемых на рассматриваемые фундаменты.

Ключевые слова: вибродинамические воздействия, буроинъекционное упрочнение, сдвиговые деформации грунта, здания, сооружения, фундаменты, осадки

Для цитирования: Повколас, К. Э. Методика расчета дополнительных динамических осадок оснований плитных фундаментов зданий и сооружений от вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 46–57. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57>

Methodology for Calculating Additional Dynamic Settlements of the Bases of Slab Foundations of Buildings and Structures from Vibrations Propagating in the Soil Environment

K. E. Povkolas¹⁾

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

Abstract. The paper provides a method for calculating additional settlements of slab foundations of existing buildings and structures from vibration-dynamic influences that arise during various construction works near them (driving piles, vibratory driving of sheet piling beams, soil compaction with heavy rammers and vibrating hammers), as well as from industrial

Адрес для переписки

Повколас Константин Эдуардович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/1,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-77
K_Povkolas@mail.ru

Address for correspondence

Povkolas Konstantin E.
Belarusian National Technical University
65/1, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-77
K_Povkolas@mail.ru

equipment and transport. The technique includes the following main steps. Using the finite element method, or measured existing vibration fields, the distribution of the maximum accelerations of ground vibrations under the base of the foundation along the depth is determined and the zone in which they exceed the critical accelerations at which volumetric and shear deformations of the soil begin to appear is identified. The soil at the base of the foundation is divided into elementary layers with a thickness of no more than 1/4 of the width of the foundation. Further, according to the known vibration-compression dependencies (the dependence of the change in the porosity coefficient e of soil samples on the acceleration of their vibrations a), which are obtained in laboratory conditions, the settlements of each layer are determined, the summation of which gives the total value of the additional dynamic settlement S_d . If it, together with the static settlement $S_{ст}$, exceeds the maximum normalized settlement values, it is proposed to use three methods to reduce or eliminate S_d – drilling injection strengthening of the zone of development of additional settlements, the use of a horizontal inertial plate or a vertical barrier made of easily compressible materials in the path of vibration propagation, the use of which reduces the intensity of vibration-dynamic impacts transmitted to the foundations under consideration.

Keywords: vibration-dynamic influences, drilling injection, shear deformations of the soil, buildings, structures, foundations, settlements

For citation: Povkolas K. E. (2024) Methodology for Calculating Additional Dynamic Settlements of the Bases of Slab Foundations of Buildings and Structures from Vibrations Propagating in the Soil Environment. *Science and Technique*. 23 (1), 46–57. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57> (in Russian)

Введение

На строительные конструкции зданий и сооружений наибольшее негативное влияние оказывают строительные работы в виде ударной забивки и вибропогружения свай и шпунта, уплотнения грунта тяжелыми трамбовками, а также рабочие процессы тяжелых промышленных установок (кузнечных молотов, штамповочных машин) и промышленные взрывы. Негативные последствия от воздействия указанных источников проявляются в течение относительно короткого промежутка времени, что позволяет их описать, провести качественный мониторинг и прогнозировать последствия. Иначе развиваются процессы при длительном действии вибраций меньшей интенсивности (железнодорожный и автомобильный транспорт, работа промышленных установок вращательного действия). В таких условиях они развиваются десятилетиями и проявляются в виде увеличения физического износа конструкций и виброползучести грунтов в основании фундаментов. К примеру, по данным многолетних геодезических наблюдений, осадки фундаментов несущих конструкций машинных залов ТЭС и АЭС, реакторных отделений АЭС, расположенных на осадочных четвертичных отложениях, никогда не затухают. Многочисленные случаи повреждения конструкций зданий и сооружений описаны и задокументированы в ряде работ [1–5].

В работе [3] отмечается: «повреждения зданий при забивке вблизи них свай связаны с развитием неравномерных дополнительных осадок, вызванных колебаниями грунта и зданий,

или с образованием выпора грунта»; «уменьшение влияния колебаний грунта на здания при забивке свай целиком зависит от уменьшения неравномерных дополнительных осадок зданий, вызываемых забивкой»; «результаты многофакторного анализа повреждений зданий, выполненного по натурным наблюдениям, подтверждаются данными расчета о преобладающем влиянии осадок здания на его повреждение при погружении свай или шпунта».

Достоверно можно утверждать, что основной причиной повреждения строительных конструкций при внешних вибродинамических воздействиях является дополнительная неравномерная осадка фундамента, приводящая к росту дополнительных напряжений в вышележащих конструкциях. Она развивается вследствие динамического уплотнения (изменения объема пор), выпора и (или) виброползучести (изменения физико-механических свойств) грунтов в основании фундаментов. Усиление наземных несущих конструкций при продолжающихся осадках основания в большинстве случаев не гарантирует их дальнейшую эксплуатационную надежность.

К основным факторам, определяющим влияние вибраций на повреждение конструкций и отраженным в нормативных документах ряда стран [6–9] и научных изданиях [3–5], относятся: инженерно-геологические условия, начальная степень повреждения здания, тип и конструкция здания или сооружения, величина скорости, ускорения и частоты колебаний, продолжительность действия вибрации, расстояние до источника колебаний, вид источника коле-

баний, материал сооружения и тип фундамента. Подробный анализ влияния указанных факторов приведен в работе [4].

Большинство прогнозных оценок [4, 8] повреждений строений основаны на опытных корреляционных зависимостях между пиковыми величинами скорости вертикальных колебаний фундамента или грунта перед ним. Так, при пиковых скоростях колебаний грунта до 2,5 мм/с динамические осадки отсутствуют, а при превышении 100 мм/с происходит разрушение строительных конструкций вследствие развития недопустимых осадок [5].

Влияние автомобильного и железнодорожного движения на амплитуду вибрации приведено в [2, 5, 10]. Пиковые скорости колебаний грунта, измеренные на расстоянии 3–6 м от автомобиля, зависят от массы (типа) автомобиля, его скорости и шероховатости дорожного покрытия (определяемой как отношение высоты выступов дороги к квадратному корню из расстояния между ними). Автобус (грузовой автомобиль) общей массой 10 т, движущийся со скоростью 65 км/ч по типичной городской дороге с шероховатостью 0,2, будет вызывать колебания поверхности 8 мм/с на расстоянии 3 м. Вибрация при движении поездов составит около 6,3 мм/с на расстоянии 15 м от пути. Метро генерировало амплитуду около 5 мм/с на расстоянии около 6 м по вертикали от туннеля (измерено на конструкции). То есть на указанных расстояниях действуют величины скоростей, при которых возможно проявление дополнительной динамической осадки.

Целью данной работы является разработка методики расчета дополнительной динамической осадки оснований плитных фундаментов зданий, сооружений и коммуникаций при действии вблизи них источника вибродинамического воздействия, генерирующего колебания в грунтовой среде, а также реализация технических решений по ее устранению или снижению.

К таким техническим решениям относятся устройство горизонтальной инерционной плиты и (или) вертикального волнового барьера, а также традиционное буроинъекционное упрочнение грунта в зоне развития дополнительной осадки под подошвой фундамента. Для дости-

жения указанной цели решены следующие задачи:

- изучены немногочисленные методы расчета динамических осадок фундаментов при внешних вибродинамических воздействиях, распространяющихся в грунтовой среде [5, 9, 11–15, 17], и сравнительный анализ [16] по методам [5, 11] с данными натурных измерений;

- при помощи метода конечных элементов на основе положений упругой инерционной среды смоделировано распределение параметров колебаний непосредственно под подошвой фундамента, которое значительно отличается от аналогичного при свободном их распространении;

- определена зона уплотнения путем сравнения параметров колебаний в активной толще грунта под подошвами существующих фундаментов с критическими значениями, при достижении которых развиваются объемные и сдвиговые деформации грунта;

- предложена методика расчета динамических осадок в виде их послойного суммирования по глубине в пределах зоны уплотнения;

- предложены эффективные способы исключения или уменьшения динамических осадок и интенсивности вибродинамического воздействия.

Среди рассмотренных автором методов выделим метод, предложенный G. Viring [17].

Метод основан на допущении о развитии динамических осадок фундамента в зоне превышения ускорениями колебаний грунта под его подошвой критических величин и уплотнении грунта в данной области до максимально возможной степени. Это предположение подтверждается данными лабораторных и полевых испытаний, выполненных проф. О. А. Савиновым [18] для оснований, находящихся в первой фазе деформирования (стадии уплотнения) за счет изменения объема пор. Следует отметить, что большинство оснований фундаментов зданий и сооружений, запроектированных по нормативным документам, находятся именно в условиях первой фазы деформирования. В 1960-е и 1970-е гг. метод использовался для расчета осадок фундаментов машин с динамическими нагрузками на песчаных основаниях.

Динамическую осадку фундамента вычисляем по формуле

$$S_{\max} = \sum_{i=1}^n h_i \frac{e_i - e_{\min,i}}{1 + e_i}, \quad (1)$$

где e_i – коэффициент пористости i -го слоя грунта под подошвой фундамента в естественных условиях; $e_{\min,i}$ – максимально достижимый коэффициент пористости i -го слоя грунта при максимальном уплотнении, может определяться для песков

$$e_{\min,i} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d,\max}} - 1,$$

γ_s – удельный вес частиц грунта; $\gamma_{d,\max}$ – то же сухого грунта в предельно плотном состоянии.

Зона развития осадок грунта («активная» толща), в пределах которой развивается дополнительная динамическая осадка, определяется превышением ускорения вибраций под подошвой фундамента под машины с динамической нагрузкой критического ускорения.

Глубина слоя «активной» толщи грунта H определяется по-разному. В [5] за величину H для песков принимается слой, в пределах которого возможно его виброуплотнение, ограниченный более прочной породой. В работах [1, 12, 15] нижняя граница H определяется также, как и для расчета статических осадок по методу послойного суммирования. В методе [11] рекомендуется ограничивать H глубиной, равной полутора длинам поверхностной (Релевской) волны. По мнению автора, ясный и обоснованный физический смысл имеет способ определения H , предложенный в [17].

Комплексная методика оценки эксплуатационной надежности зданий и сооружений

Предлагаемый автором метод расчета динамических осадок основан на изучении закономерностей процессов виброуплотнения песков. Результаты испытаний образцов песков на вибростенде представлены виброкомпрессионными кривыми, связывающими коэффициент пористости e с ускорением колебаний $a = A\omega^2$ (где A – амплитуда гармонических колебаний; ω – круговая (циклическая) частота колебаний) при

различных статических сжимающих напряжениях $\sigma_{ст}$. С ростом ускорения колебаний a коэффициент пористости e уменьшается. Каждой величине $\sigma_{ст}$ и начальному значению коэффициента пористости e_0 соответствует свое критическое ускорение колебаний $a_{кр}$ (горизонтальный участок зависимости $e = f(a)$), при превышении которого начинается уплотнение грунта до предельно плотного состояния с минимальной величиной коэффициента пористости $e_{\min}$. При этом, по данным [18], конечная величина $e_{\min}$ не зависит от величин $\sigma_{ст}$ и e_0 . Критическое ускорение $a_{кр}$ возрастает с увеличением $\sigma_{ст}$ и уменьшением e_0 . Так же существенное влияние на $a_{кр}$ для песков оказывает влажность. Наибольшее значение $a_{кр}$ при равных условиях наблюдается у влажных песков, наименьшее – у маловлажных. В более широкой трактовке под критическим ускорением колебания грунта $a_{кр}$ понимается величина, при достижении которой начинают развиваться объемные и сдвиговые деформации [2]. В работе [1] под предельным (критическим) ускорением колебаний понимается величина, превышение которой приводит к необратимым деформациям (осадкам) грунта. Значения $a_{кр}$ приведены в таблицах приложения Д [8], полученных проф. И. А. Кудрявцевым [2] для различных видов грунтов и их состояния при действии техногенных вибраций (железнодорожный транспорт, метро, трамвай, автотранспорт, технологическое оборудование). Их величины варьируются в диапазоне: 0,06–0,29 м/с² – для песков; 0,06–0,68 м/с² – для пылеватоглинистых грунтов.

Экспериментальная зависимость относительного критического ускорения колебаний $w_{кр}$ (в долях от ускорения силы тяжести $g = 9,82$ м/с²) от статического давления $\sigma_{ст}$, по данным [18], для среднего песка представлена на рис. 1.

На основании анализа литературных источников и собственных исследований автора, к основным факторам, определяющим развитие динамических осадок в первой фазе напряженно-деформированного состояния (стадии уплотнения), относятся:

- ускорение колебаний грунта a ;
- статическое давление $\sigma_{ст}$ на рассматриваемый элемент грунта, величина которого определяет критическое ускорение колебаний;

- начальная (природная) плотность грунта ρ и его влажность W ;
- плотность грунта в предельно уплотненном состоянии $\rho_{d,max}$;
- массы фундамента, грунтов оснований и вышележащих строительных конструкций.

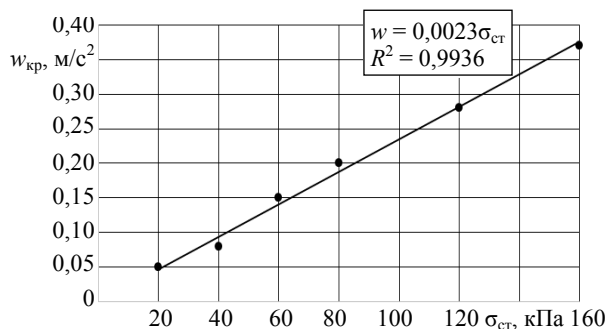


Рис. 1. Зависимость относительного критического ускорения колебаний $w_{кр}$ (в долях от ускорения силы тяжести $g = 9,82 \text{ м/с}^2$) от статического давления $\sigma_{ст}$, по данным [18], для среднего песка

Fig. 1. Dependence of relative critical acceleration of oscillations $w_{кр}$ (in fractions of the acceleration of gravity $g = 9.82 \text{ m/s}^2$) on static pressure $\sigma_{ст}$ according to data from [18] for medium sand

Эти факторы учитываются в предлагаемой комплексной методике оценки эксплуатационной надежности зданий и сооружений, которая включает следующие положения:

- 1) построение математической модели системы «источник колебаний – грунтовая среда – строение» на основании метода конечных элементов и положений теории упругого инерционного полупространства;
- 2) определение статических и динамических параметров элементов системы (смещений, скоростей, ускорений, напряжений, изгибающих моментов, продольных и поперечных сил);
- 3) определение на основании опытных или справочных данных зависимости $a_{кр} = f(\sigma_{ст})$ (рис. 1);
- 4) построение зависимостей вертикальных статических напряжений $\sigma_{ст}$ от глубины z под подошвой фундамента и $a_{кр} = f(z)$;
- 5) определение зоны динамического уплотнения грунта H под подошвой фундамента, нижняя граница которой определяется точкой пересечения кривых $a_{max} = f(z)$ и $a_{кр} = f(z)$;
- 6) расчет максимальных суммарных (статических и динамических) осадок фундаментов;

7) сравнение полученных данных с лимитируемыми параметрами:

а) максимальной осадки S_{max} и относительной разности осадок $\Delta S/\Delta L$ с предельными величинами по [7];

б) суммарного дополнительного давления (статического и динамического) σ_{Σ} под подошвой фундамента с расчетным сопротивлением грунта R по [6];

в) пиковых величин скоростей вертикальных колебаний фундаментов с предельными значениями, анализ которых для различных стран приведен в [4] и в нормативных документах Республики Беларусь [6, 7, 9];

г) суммарных (статических и дополнительных динамических) усилий, возникающих также от неравномерных осадок, в строительных конструкциях с их несущей способностью;

д) параметров колебаний наземных строительных конструкций с лимитируемыми величинами, например по немецкому стандарту DIN4150 или по шкале, предложенной специалистами США [19] на основании анализа литературных источников;

8) приблизительную прогнозную оценку степени физического износа зданий и сооружений, связанную с действием вибрации, по [2];

9) исключение или уменьшение (при необходимости) динамической осадки фундаментов за счет буроинъекционного упрочнения грунтов в их основании, или путем снижения вибраций за счет виброизоляции грунтовой среды с устройством горизонтального и (или) вертикального барьера, эффективность которых рассмотрена в работах [20, 21].

Основные положения данной методики, учитывающей инерционность строительных конструкций, грунтов оснований фундаментов и изменчивость критических ускорений колебаний грунта по глубине под подошвой фундамента, в части расчета дополнительной динамической осадки, рассмотрим на следующем примере.

Вблизи одноэтажного однопролетного промышленного здания (на расстоянии 10 м) устанавливается фундамент под машину (к примеру, виброштамповочный стенд для изготовления строительных конструкций) с вертикальными гармоническими колебаниями часто-

той 25 Гц и амплитудой динамической нагрузки $P_d = 500$ кН. Несущие конструкции – монолитные колонны 400×400 мм и железобетонная балка покрытия пролетом 12 м. Фундаменты под колонны – плитные столбчатые с размерами подошвы 2000×2000 мм и глубиной заложения 1500 мм. Высота до низа стропильной конструкции 6 м. Ограждающие конструкции – сэндвич-панели. Покрытие – профнастил по стальным прогонам.

Расчет выполнен в конечно-элементном расчетном комплексе Liga 10.8 с использованием элементов, моделирующих упругое инерционное полупространство. Общее количество конечных элементов составило 64470. Время интегрирования 0,6 с. Для исключения отражения волн от боковых и нижней границ массива применялся конечный элемент «неотражаемые границы». Конечно-элементная схема смоделированного грунтового пространственного массива размерами 32×40 м высотой 21 м представлена на рис. 2а, а взаимное расположение фундамента под машину и средней поперечной рамы промздания – на рис. 2б.

Грунт представляет собой маловлажный средний песок средней плотности со следующими физико-механическими свойствами: удельный вес грунта $\gamma = 16,74$ кН/м³; удельный вес сухого грунта $\gamma_d = 16,35$ кН/м³; удельный вес сухого грунта в предельно плотном состоянии $\gamma_{dmax} = 17,1$ кН/м³; удельный вес частиц грунта $\gamma_s = 26,8$ кН/м³; коэффициент пористости в природном сложении $e = 0,65$; коэффи-

циент пористости в предельно плотном состоянии $e_{min} = 0,567$; динамический модуль упругости $E_d = 150$ МПа; модуль общей деформации $E_o = 30$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; угол внутреннего трения $\varphi = 38^\circ$; удельное сцепление $c = 1$ кПа. Все характеристики назначались по справочным данным для песчаных грунтов четвертичных отложений.

На рис. 3 представлена расчетная зависимость распределения максимальных ускорений колебаний a_{max} по глубине z под подошвой фундамента (график 1) и без фундамента в грунтовой среде (график 2).

На рис. 4, 5 приводятся расчетные графики распределения ускорений колебаний от расстояния z от подошвы столбчатых фундаментов по глубине, расположенных соответственно на расстояниях 10 и 22 м от точки приложения динамической нагрузки (1 – максимальное ускорение колебаний $a_{max} = f(z)$; 2 – критическое ускорение колебаний $a_{кр} = f(z)$).

Из представленных данных следует, что при прохождении поверхностной волны под подошвой фундамента происходит ее искажение за счет влияния массы фундамента и выше лежащих наземных конструкций (кривая 1 на рис. 3–5). При этом пиковая величина максимальных вертикальных ускорений колебаний расположена на глубинах 3,5 и 0,5 м от подошвы фундамента соответственно для расстояний от источника колебаний до фундаментов 10 и 22 м.

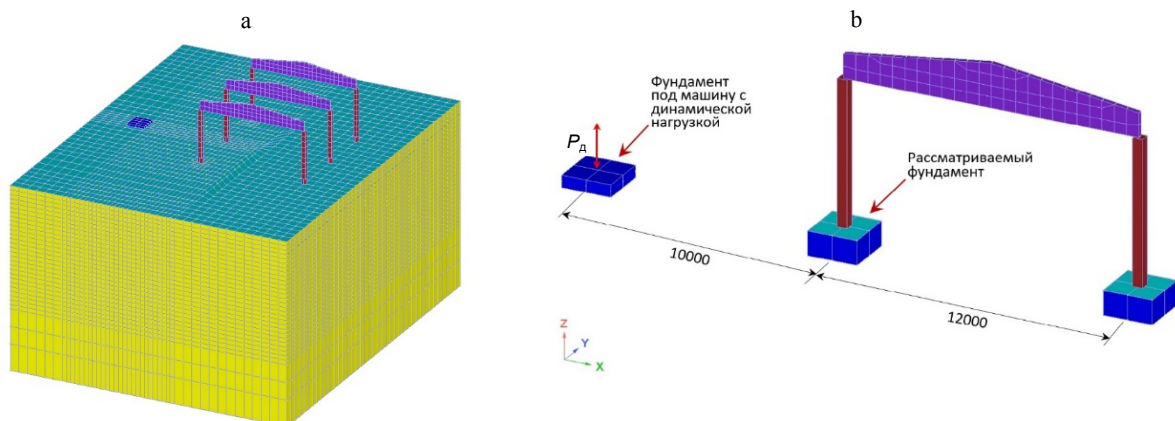


Рис. 2. Расчетная схема: а – конечно-элементная схема грунтового пространственного массива и конструкций промздания (выделены поперечные рамы каркаса); б – взаимное расположение поперечной рамы здания и источника вибраций

Fig. 2. Design diagram: a – finite element diagram of a soil spatial mass and industrial building structures (transverse frames of framework are highlighted); b – relative position of the transverse frame of the building and the source of vibration

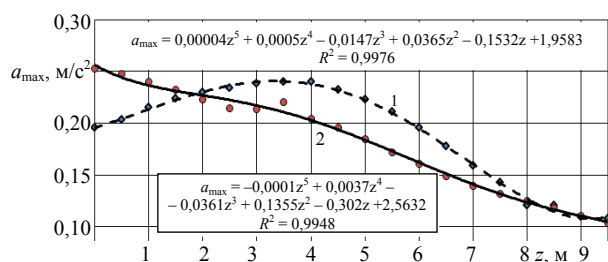


Рис. 3. Зависимость распределения максимальных ускорений колебаний $a_{\max}$ по глубине z под подошвой фундамента (график 1) и без фундамента в грунтовой среде (график 2)

Fig. 3. Dependence of the distribution of maximum oscillation accelerations $a_{\max}$ over depth z under the base of the foundation (graph 1) and without a foundation in the soil environment (graph 2)

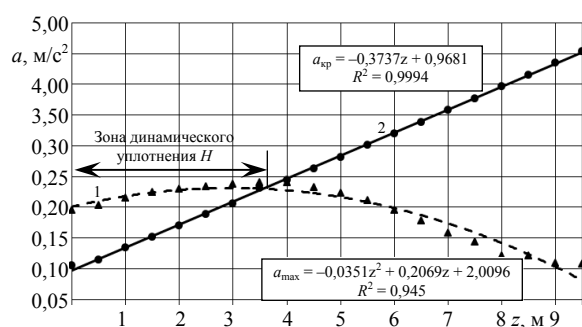


Рис. 4. Зависимости ускорений колебаний a от расстояния z от подошвы столбчатого фундамента по глубине грунта, расположенного на расстоянии 10 м от точки приложения динамической нагрузки:

- 1 – максимальное ускорение колебаний $a_{\max} = f(z)$;
2 – критическое ускорение колебаний $a_{\text{кр}} = f(z)$

Fig. 4. Dependences of vibration accelerations a on the distance z from the base of a columnar foundation along the depth of the soil, located at a distance of 10 m from the point of application of the dynamic load:

- 1 – maximum vibration acceleration $a_{\max} = f(z)$;
2 – critical vibration acceleration $a_{\text{кр}} = f(z)$

Наиболее известна следующая экспоненциальная зависимость, предложенная R. Woods [22], которую применяют при оценке колебаний фундаментов от вибраций, передаваемых через грунт:

$$w = w_0 e^{-\beta h}, \quad (2)$$

где w – ускорение колебаний на глубине h от поверхности грунта; w_0 – то же основания на поверхности грунта; β – коэффициент, величина которого для песков составляет 0,07–0,10 м^{-1} .

Данная формула не учитывает массы строительных конструкций. Многие исследователи [1, 5, 11, 12, 18, 23–27] исходят из предположения равенства параметров колебаний фундамента и грунта на поверхности при его свободном распространении (без наличия фундамента).

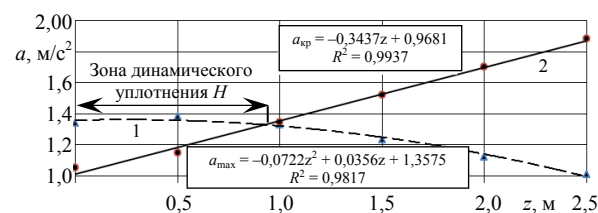


Рис. 5. Зависимости ускорений колебаний от расстояния z от подошвы столбчатого фундамента по глубине грунта, расположенного на расстоянии 22 м от точки приложения динамической нагрузки: 1 – максимальное ускорение колебаний $a_{\max} = f(z)$; 2 – критическое ускорение колебаний $a_{\text{кр}} = f(z)$

Fig. 5. Dependences of vibration accelerations a on the distance z from the base of a columnar foundation along the depth of the soil, located at a distance of 22 m from the point of application of the dynamic load:

- 1 – maximum vibration acceleration $a_{\max} = f(z)$;
2 – critical vibration acceleration $a_{\text{кр}} = f(z)$

Это допущение принято также в действующем нормативном документе РФ [28], что очевидно приводит к значительному увеличению расхода строительных материалов на повышение сейсмостойкости зданий и сооружений. Зависимость коэффициента передачи колебаний фундаменту от статического давления по его подошве более подробно рассмотрена в работе [20].

Зона динамического уплотнения грунта H составила 3,6 и 0,92 м для плитных столбчатых фундаментов, расположенных соответственно на расстояниях 10 и 22 м от источника колебаний. Дополнительные вертикальные динамические осадки, рассчитанные по формуле (1), составили соответственно 181 и 46,3 мм. Статическая осадка каждого из фундаментов, определенная методом конечных элементов, незначительна и составила 5,2 мм. Если рассматривать поперечную раму как здание с гибкой конструктивной схемой, то максимальная допустимая осадка фундаментов по [7] составляет 200 мм, а допустимая относительная разница осадок двух фундаментов поперечной рамы 0,006. В нашем случае суммарная максимальная осадка 186,2 мм, что несколько меньше максимально допустимой, а относительная разница осадок 0,01123, что гораздо больше допустимой (предельной) величины.

На рис. 6 показан фрагмент изополей распределения вертикальных нормальных динамических напряжений $\sigma_{\text{дин}}$ (т/м^2) через 0,34 с после приложения динамической нагрузки под подошвой столбчатого фундамента размерами в плане 2×2 м с глубиной заложения 1,5 м.

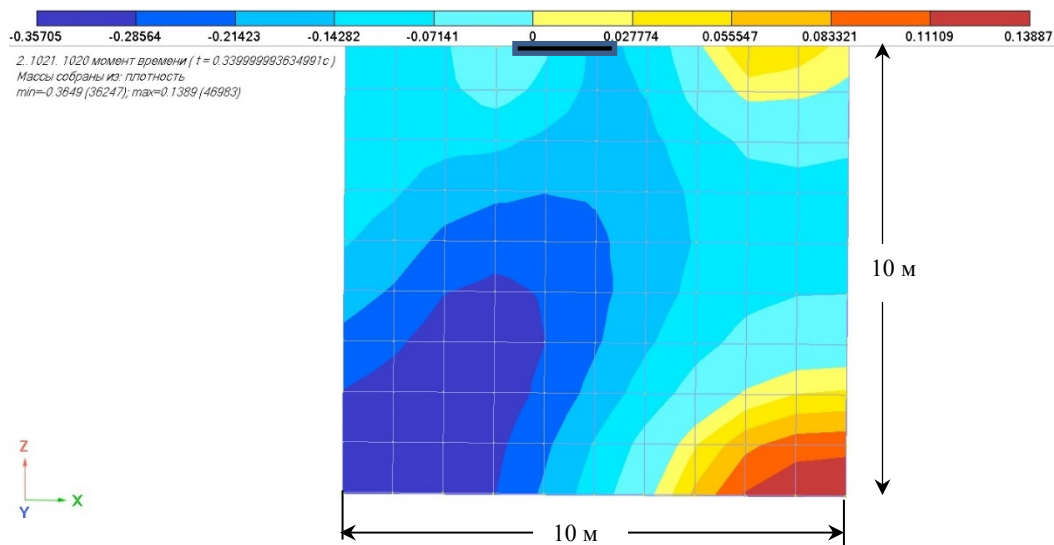


Рис. 6. Изополя вертикальных динамических напряжений $\sigma_{\text{дин}}$ (т/м^2) через 0,34 с после приложения динамической нагрузки под подошвой столбчатого фундамента размерами в плане 2×2 м с глубиной заложения 1,5 м

Fig. 6. Isofields of vertical dynamic stresses σ_{dyn} (t/m^2) after 0.34 sec. after applying a dynamic load under the base of a columnar foundation with in plan dimensions of 2×2 m and a depth of 1.5 m

Этот момент времени соответствует максимальному динамическому давлению по подошве фундамента. Среднее динамическое давление по подошве фундамента при этом составляет 4,1 % от действующих суммарных (статических и динамических) давлений, максимальное – 11,36 %. Давление под подошвой фундамента гораздо ниже расчетного сопротивления грунта R , определенного по формуле [6]. Взаимодействие основания и фундамента соответствует первой фазе напряженно-деформированного состояния (стадии уплотнения), по Н. М. Герсеванову.

Для уменьшения влияния динамических воздействий целесообразно использовать виброотсечные конструкции в виде вертикального волнового и (или) горизонтального инерционного барьеров. Их эффективность рассматривается в работах [20, 21].

В рассмотренном примере разница осадок фундаментов превышает предельную, а суммарная максимальная осадка фундамента, расположенного на расстоянии 10 м от источника, близка к допустимой величине.

Для устранения недопустимых динамических осадок существующих фундаментов также рекомендуется использовать буроинъекционное упрочнение грунтов в их основании за счет инъекции цементного раствора под давлением

через трубы в затампированных цементным раствором или сухим песком скважинах. При этом необходимо учитывать особенности этого процесса в различных грунтах, обнаруженные автором на основании вскрытий корней буроинъекционных анкеров на объектах строительства Минского метрополитена. Двухэтапная инъекция цементного раствора с водоцементным отношением В/Ц = 0,5–0,6 выполнялась в корневую зону грунтового анкера под давлением до 2,5 МПа после набора прочности цементным камнем обоймы. Дальнейшие испытания и освидетельствования корней пробных анкеров, выполненные автором, выявили недостатки данной конструкции. Ни в песках, ни в пылевато-глинистых грунтах не происходит пропитка цементным раствором прилегающего грунта. Эффект инъекции обусловлен только опрессовкой прилегающего грунта. Характерные поперечные сечения корня, сформированные в различных грунтах, приведены на рис. 7. При устройстве наклонных скважин в песчаных грунтах основные инъекционные уширения формируются над обоймой (рис. 7а, б). Тяга корня зачастую контактирует с грунтом. В твердых, полутвердых и тугопластичных суглинках и твердых супесях удастся сформировать цементную обойму, но последующая инъекция раствора в основном объеме идет на со-

здание «радиальных шипов» (рис. 7с), которые обламываются при нагружении анкера. В мягко- и текучепластичных суглинках и пластичных супесях происходит оплывание скважины (рис. 7d). Для формирования требуемой геометрии корня анкера использована конструкция буроинъекционного анкера по а. с. № 1392203 [29], с инъекцией в геотек-

стильную оболочку. Независимо от вида грунта, при наличии геотекстильной оболочки, весь объем инъекционного раствора идет на формирование корня (рис. 1е).

На рис. 8 приведены фотографии вскрытых поперечных сечений корней анкеров, сформированных в песках средней плотности от первоначального диаметра скважины, равного 114 мм.

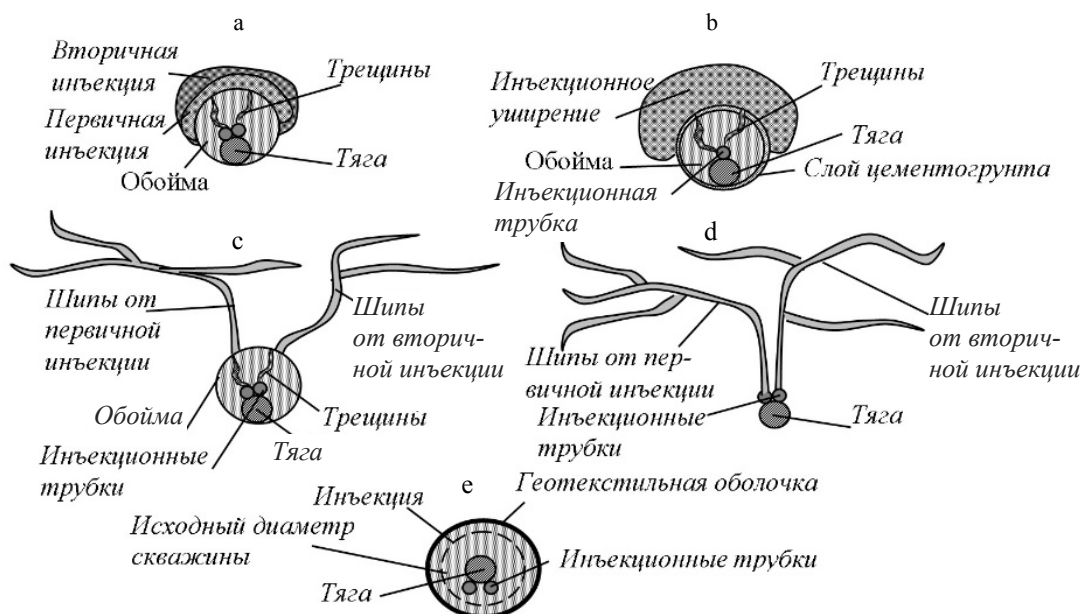


Рис. 7. Характерные поперечные сечения корней анкеров с одним стержнем и инъекцией посредством двух трубок с перфорацией: а – в песках плотных и средней плотности при инъекции по всей длине корня через отверстия в трубках, перекрытых резиновыми манжетами; б – так же, при выходе раствора через одно отверстие в инъекционной трубке и формировании местного уширения; с – в твердых, полутвердых и тугопластичных суглинках и твердых супесях; д – в мягко- и текучепластичных суглинках и пластичных супесях; е – независимо от вида грунта при наличии геотекстильной оболочки

Fig. 7. Typical cross-sections of the roots of anchors with one rod and injection through two perforated tubes: а – in dense and medium-density sands with injection along the entire length of the root through holes in tubes covered with rubber cuffs; б – also, when the solution exits through one hole in the injection tube and local broadening is formed; с – in hard, semi-solid and highly plastic loams and hard sandy loams; д – in soft-plastic and fluid-plastic loams and plastic sandy loams; е – regardless of the type of soil in the pre-sence of a geotextile shell



Рис. 8. Фотографии вскрытых поперечных сечений корней анкеров, сформированных в песках средней плотности в геотекстильной оболочке

Fig. 8. Photographs of exposed cross-sections of anchor roots formed in medium-density sands in a geotextile shell

Анкеры этой конструкции были впервые применены в г. Минске на станции метро «Спортивная» и используются по настоящее время. За счет применения геотекстильной оболочки удалось добиться снижения расхода цементного раствора приблизительно в два раза и значительного (в 1,4–10 раз) увеличения несущей способности анкеров в различных грунтах. Соответствующий эффект достигается и при использовании технологии буроинъекционного упрочнения для усиления оснований фундаментов. Необходимо учитывать, что следствием упрочнения является повышение жесткости основания, которое может увеличить параметры колебаний строительных конструкций. В этой связи следует оценивать физиологический аспект воздействия вибраций, который в данной статье не рассматривается. По данным автора, расстояния от источника вибраций, на которых выполняются санитарные нормы колебаний конструкций, приблизительно в три раза выше, чем соответствующие расстояния, при которых возникает риск повреждений строительных конструкций. Этот факт подтверждается данными исследований вибрации элементов зданий, расположенных вблизи линий Минского метрополитена неглубокого заложения. Параметры колебаний конструкций зданий, при которых происходят их повреждение, значительно превышают предельные величины по санитарным нормам и правилам [30].

Остальные положения приведенной методики в рамках данной статьи не рассматривались.

ВЫВОДЫ

1. Предложена комплексная методика оценки эксплуатационной надежности зданий и сооружений при вибродинамических воздействиях, распространяющихся в грунтовой среде.

2. Выявлены основные факторы, определяющие условия повреждения зданий или сооружений при вибродинамических воздействиях, передаваемых через грунтовую среду. Предложена методика расчета динамических осадок фундаментов зданий и сооружений, которая учитывает влияние массы строительных конструкций и изменчивость критических ускорений колебаний грунта под подошвой фундамента.

3. Для устранения или снижения недопустимых дополнительных динамических осадок при внешних вибродинамических воздействиях, передаваемых через грунт, рекомендуется использовать вертикальный, горизонтальный инерционный барьеры, буроинъекционное упрочнение грунтов оснований или их комбинацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлинов, М. В. Основы комплексной оценки динамической работы строительных конструкций при вибрационных воздействиях промышленного оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / М. В. Берлинов. М., 2005. 302 л.
2. Кудрявцев, И. А. Влияние вибрации на нижнее строение рельсового пути, здания и сооружения: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.06 / И. А. Кудрявцев; БелГУТ. М., 1995. 43 л.
3. Калюжнюк, М. М. Сваебойные работы при реконструкции (Влияние колебаний на здания и сооружения) / М. М. Калюжнюк, В. К. Рудь. Л.: Стройиздат, 1989. 160 с.
4. Повколос, К. Э. Влияние вибродинамических воздействий на здания и сооружения // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1 (20). С. 111–115. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_1_111.
5. Drabkin, S. Estimation Settlement of Sand Caused by Construction Vibration / S. Drabkin, H. Lacy, D. S. Kim // Journal of Geotechnical Engineering. 1996. Vol. 122, No 11. P. 920–928. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:11\(920\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:11(920)).
6. Фундаменты плитные. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-67–2007. Введ. 2.04.07. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2007. 136 с.
7. Строительные нормы. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений: СП 5.01.01–2023. Введ. 27.02.23. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2023. 150 с.
8. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и ее воздействие на конструкцию: ГОСТ Р 52892–2007. Введ. 27.12.07. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: ОАЛ «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем», 2007. 16 с.
9. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Фундаменты при вибродинамических воздействиях. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-264–2012. Введ. 28.05.12. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012. 114 с.
10. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации / Е. К. Борисов [и др.]; Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. 128 с.
11. Massarsch, K. R. Settlements and Damage Caused by Construction Induced Vibrations / K. R. Massarsch // Proc. International Workshop Wave 2000, Bochum, Germany 13–15 December 2000. P. 299–315.
12. Ter-Martirosyan, A. Z. Settlement of a Foundation on an Unsaturated Sandy Base Taking Vibrocreep Into Account /

- A. Z. Ter-Martirosyan, A. N. Shebunayev, E. S. Sobolev // *Axioms*. 2023. Vol. 12, No 6. P. 594. <https://doi.org/10.3390/axioms12060594>.
13. Исмагилова, З. Ф. Исследование осадки фундаментов в глинистых грунтах при динамической нагрузке: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / З. Ф. Исмагилова; УГНТУ. Уфа, 2006. 21 с.
 14. Кравцов, В. Н. Осадки оснований плитных фундаментов при длительном воздействии на них динамических нагрузок малой интенсивности / В. Н. Кравцов, П. В. Лапатын // *Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–25 октября 2013 г.* / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. М. И. Никитенко [и др.]. Минск, 2013. С. 150–157.
 15. Соболев, Е. С. Ползучесть и виброползучесть песчаных грунтов оснований зданий и сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Е. С. Соболев. М., 2014. 150 с.
 16. Abate, G. Settlement of Sand Caused By Vertical Vibrations: Experimental Versus Numerical Results [Electronic Resource] / G. Abate, M. R. Massimino, M. Maugeri // 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, January 2011, 10–13 Santiago, Chile. Mode of access: <https://www.issmge.org/uploads/publications/59/67/7.6.SOSAB.pdf>.
 17. Vering, G. The Vibrational Behavior of Soil in Relation to its Properties [Electronic Resource] // *Comp. rend. 5. Congr. Internat. Mechanic Sole et Trav. Fondat. Paris, 1961*. Mode of access: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/40/1961_01_0092.pdf.
 18. Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1979. 200 с.
 19. Чернов, Ю.Т. Вибрации строительных конструкций / Ю.Т. Чернов. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. 288 с.
 20. Повколас, К. Э. Оценка эффективности применения горизонтальных инерционных барьеров для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 286–293. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293>.
 21. Повколас, К. Э. Оценка эффективности применения вертикальных барьеров из газонаполненных цилиндрических баллонов под давлением для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // *Мелиорация*. 2022. № 4 (102). С. 31–37.
 22. Woods, R. D. Energy-Attenuation relationships from construction vibrations / R. D. Woods, L. P. Jedelee // *ASCE Symp. on Vibration Problems in Geotech. Eng. New York: ASCE, 1985*. P. 229–246.
 23. Баркан, Д. Д. Динамика оснований и фундаментов / Д. Д. Баркан. Л.: Стройвоенмориздат, 1948. 459 с.
 24. Сеймов, В. М. Колебания круглого штампа при сейсмических воздействиях / В. М. Сеймов, В. Д. Шевченко // *Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: материалы 4-й Всесоюз. конф. по динамике грунтов*. Ташкент: Фан, 1977. С. 38–42.
 25. Свинкин, М. П. Прогнозирование колебаний грунта при вибрациях фундаментов машин / М. П. Свинкин // *Динамика сооружений*. Киев: Будівельник, 1973. С. 34–37.
 26. Таранов, В. Г. Методики экспериментального определения динамических характеристик основания фундаментов приемников колебаний / В. Г. Таранов // *Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: материалы 4-й Всесоюз. конф. по динамике грунтов*. Ташкент: Фан, 1977. С. 125–128.
 27. Томсон, О. И. Колебания каркасов промышленных зданий / О. И. Томсон // *Колебания зданий и сооружений: сб. статей*. М.: Госстройиздат, 1963. С. 56–71.
 28. *Строительство в сейсмических районах*: СП 14.13330.2018. Введ. 25.12.18. М.: Стандартинформ, 2018. 114 с.
 29. Никитенко, М. И. Буроинъекционные анкеры и сваи при строительстве и реконструкции зданий и сооружений / М. И. Никитенко. Минск: БНТУ, 2007. 580 с.
 30. Виброизоляция зданий, расположенных в технической зоне метрополитена неглубокого заложения / Ю. В. Василевич [и др.] // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2016. № 1. С. 295–297.

Поступила 12.09.2023

Подписана к печати 14.11.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Berlinov M. V. (2005) *Fundamentals of a Comprehensive Assessment of the Dynamic Operation of Building Structures under Vibration Effects of Industrial Equipment*. Minsk. 302 (in Russian).
2. Kudryavtsev I. A. (1995) Influence of Vibration on Lower Structure of Rail Track, Buildings and Structures. Minsk. 43 (in Russian).
3. Kalyuzhnyuk M. M., Rud V. K. (1989) *Piling Works during Reconstruction (Effect of Vibrations on Buildings and Structures)*. Leningrad, Stroyizdat Publ. 160 (in Russian).
4. Povkolas K. E. (2023) Influence of Vibration-Dynamic Impact on Buildings and Structures. *Ekspert: Teoriya i Praktika = Expert: Theory and Practice*, (1), 111–115. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_1_111.
5. Drabkin S., Lacy H., Kim D. S. (1996) Estimation Settlement of Sand Caused by Construction Vibration. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (11), 920–928. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:11\(920\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:11(920)).
6. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-5.01-67–2007. *Slab Foundations. Design Rules*. Minsk, Republican Unitary Enterprise “Stroytekhnorm”, 2007. 136 (in Russian).
7. СП [Construction Rules] 5.01.01–2023. *Building Codes. General Provisions for the Design of Foundations and Foundations of Buildings and Structures*. Minsk, Republican Unitary Enterprise “Stroytekhnorm”, 2023. 150 (in Russian).
8. State Standard P 52892–2007. *Vibration and Shock. Building Vibration. Vibration Measurement and Its Impact on the Structure*. Moscow, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology: Research Center for Control and Diagnostics of Technical Systems, 2007. 16 (in Russian).
9. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-5.01-264–2012. *Bases and Foundations of Buildings and Structures. Foundations under Vibration-Dynamic Influences. Design*

- Rules. Minsk, Republican Unitary Enterprise "Stroytekhnorm", 2012. 114 (in Russian).
10. Borisov E. K., Alimov S. G., Usov A. G., Lysak L. G., Krylova T. V., Stepanova E. A. (2007) *Experimental Dynamics of Structures. Transport Vibration Monitoring*. Petropavlovsk-Kamchatsky, Publishing House of Kamchatka State Technical University. 128 (in Russian).
 11. Massarsch K. R. (2000). Settlements and Damage Caused by Construction Induced Vibrations. *Proc. International Workshop Wave 2000, Bochum, Germany 13–15 December 2000*, pp. 299–315.
 12. Ter-Martirosyan A. Z., Shebunyaev A. N., Sobolev E. S. (2023) Settlement of a Foundation on an Unsaturated Sandy Base Taking Vibrocreep Into Account. *Axioms*, 12 (6), 594. <https://doi.org/10.3390/axioms12060594>.
 13. Ismagilova Z. F. (2006) *Study of Foundation Settlement in Clayey Soils under Dynamic Load*. Ufa. 21 (in Russian).
 14. Kravtsov V. N., Lapatin P. V. (2013) Settlement of the Bases of Slab Foundations under Long-Term Exposure to Low Intensity Dynamic Loads. *Geotekhnika Belarusi: Nauka i Praktika: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. konf., Minsk, 23–25 Oktyabrya 2013 g.* [Geotechnics of Belarus: Science and Practice: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Minsk, October 23–25, 2013]. Minsk, Belarusian National Technical University, 150–157 (in Russian).
 15. Sobolev E. S. (2014) *Creep and Vibration Creep of Sandy Soils at the Bases of Buildings and Structures*. Minsk. 150 (in Russian).
 16. Abate G., Massimino M. R., Maugeri M. (2011) Settlement of Sand Caused by Vertical Vibrations: Experimental versus Numerical Results. *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, January 2011, 10–13 Santiago, Chile*. Available at: <https://www.issmge.org/uploads/publications/59/67/7.6.SOSAB.pdf>.
 17. Vering G. (1961) The Vibrational Behavior of Soil in Relation to its Properties. *Comp. Rend. 5. Congr. Internat. Mechanic Sole et Trav. Fondat.* Paris, 1961. Available at: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/40/1961_01_0092.pdf.
 18. Savinov O. A. (1979) *Modern Designs of Foundations for Machines and Their Calculation*. 2nd ed. Leningrad, Stroyizdat Publ., Leningrad Branch. 200 (in Russian).
 19. Chernov Yu. T. (2006) *Vibrations of Building Structures*. Moscow, Publishing House of Association of Construction Universities. 288 (in Russian).
 20. Povkolas K. E. (2023) Evaluation of Effectiveness of Application of Horizontal Inertial Barriers to Reduce Vibrations Propagating in Ground Environment. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 22 (4), 286–293. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293> (in Russian).
 21. Povkolas K. E. (2022) Evaluation of the Effectiveness of Using Vertical Barriers Made of Gas-Filled Cylindrical Cylinders under Pressure to Reduce Vibrations Propagating in the Soil Environment. *Melioratsiya* [Melioration], (4), 31–37 (in Russian).
 22. Woods R. D., Jedele L. P. (1985) Energy-Attenuation Relationships From Construction Vibrations. *ASCE Symp. on Vibration Problems in Geotech. Eng.* New York, ASCE, 229–246.
 23. Barkan D. D. (1948) *Dynamics of Bases and Foundations*. Leningrad, Stroyvoenmorizdat Publ. 459 (in Russian).
 24. Seymov V. M., Shevchenko V. D. (1977) Vibrations of Round Die under Seismic Influences. *Dinamika Osnovaniy, Fundamentov i Podzemnykh Sooruzheniy: Materialy 4-i Vsesoyuzn. Konf. Po Dinamike Gruntov* [Dynamics of Bases, Foundations and Underground Structures: Proceedings of the 4th All-Union Conference on Soil Dynamics]. Tashkent, Fan Publ., 38–42 (in Russian).
 25. Svinkin M. P. (1973) Prediction of Ground Vibrations during Machine Foundation Vibrations. *Dinamika Sooruzheniy* [Dynamics of structures]. Kiev, Budivelnik Publ., 34–37 (in Russian).
 26. Taranov V. G. (1977) Methods for Experimental Determination of the Dynamic Characteristics of the Foundations of Vibration Receivers. *Dinamika Osnovaniy, Fundamentov i Podzemnykh Sooruzheniy: Materialy 4-i Vsesoyuzn. Konf. po Dinamike Gruntov* [Dynamics of Bases, Foundations and Underground Structures: Proceedings of the 4th All-Union Conference on Soil Dynamics]. Tashkent, Fan Publ., 125–128 (in Russian).
 27. Tomson O. I. (1963) Vibrations of Frames of Industrial Buildings. *Kolebaniya Zdanii i Sooruzheniy: Sb. Statei* [Vibrations of Buildings and Structures: Collected Papers]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 56–71 (in Russian).
 28. SP [Construction Rules] 14.13330.2018. *Construction in Seismic Areas*. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 114 (in Russian).
 29. Nikitenko M. I. (2007) *Drilled Injection Anchors and Piles in the Construction and Reconstruction of Buildings and Structures*. Minsk, Belarusian National Technical University. 580 (in Russian).
 30. Vasilevich Yu. V., Kirilenko A. T., Neumerzhitskii V. V., Neumerzhitskaya E. Yu. (2016) Vibration Insulation of Buildings Located in the Shallow Technical Zone of the Metro. *Vestnik Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Transporta: Nauka i Transport = Bulletin of BSUT: Science and Transport*, (1), 295–297 (in Russian).

Received: 12.09.2023

Accepted: 14.11.2023

Published online: 31.01.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66>

УДК 66.042.945: 004.67

Некоторые вопросы обеспечения полноты и достоверности эксплуатационных данных, получаемых в ходе приборного обследования стальных подземных газопроводов

Н. В. Струцкий¹⁾, докт. техн. наук, проф. В. Н. Романюк²⁾

¹⁾ГПО «Белтопгаз» (Минск, Республика Беларусь),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В долгосрочной перспективе, наряду с ростом атомной энергетики и связанными с этим изменениями в топливно-энергетическом балансе страны, природный газ сохранит важное место в народном хозяйстве, в том числе и в производстве тепловой и электрической энергии. Соответственно надолго сохранится значимость газораспределительных сетей, по которым непосредственно обеспечиваются топливом потребители республики. В соответствии с Концепцией Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г. основная задача в газовой сфере – поддержание производственных фондов на уровне, обеспечивающем безопасное энергообеспечение. Практика показывает, что наибольшим потенциалом влияния на техническое состояние стальных подземных распределительных газопроводов обладает коррозионный фактор. Для компенсации коррозионных процессов стальные подземные трубопроводы оснащаются специальными защитными средствами, в частности изоляционными покрытиями. Одной из ключевых эксплуатационных характеристик изоляции является ее целостность, которая контролируется путем проведения периодического (комплексного) приборного технического обследования. По результатам контроля формируется статистика выявленных дефектов защитных покрытий. В работе рассмотрены вопросы обеспечения достоверности эксплуатационных данных, освещен опыт внедрения в газоснабжающих организациях ГПО «Белтопгаз» специализированных программных комплексов для учета и обработки результатов приборного обследования распределительных газопроводов. Также рассмотрен вопрос влияния организационно-производственного аспекта (особенностей технологии, сложившейся на местах практики планирования и производства конкретных видов работ по технической эксплуатации) на структуру эксплуатационной информации, что требует отдельного изучения и учета при дальнейшей статистической обработке и использовании данных.

Ключевые слова: подземный стальной газопровод, защита от коррозии, изоляционное покрытие, приборное обследование, программные комплексы, эксплуатационные данные, достоверность

Для цитирования: Струцкий, Н. В. Некоторые вопросы обеспечения полноты и достоверности эксплуатационных данных, получаемых в ходе приборного обследования стальных подземных газопроводов / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66>

Some Issues of Ensuring Completeness and Reliability of Operational Data Obtained in the Course of Instrument Inspection of Steel Underground Gas Pipelines

N. V. Strutsky¹⁾, V. N. Romaniuk²⁾

¹⁾Beltopgaz SPA (Minsk, Republic of Belarus),

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

Abstract. In the long term, along with the growth of nuclear power and related changes in the fuel and energy balance of the country, natural gas will retain an important place in the national economy, including in the production of heat and electricity.

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Accordingly, the importance of gas distribution networks, which directly supply fuel to the Republic's consumers, will remain for a long time. According with the Concept of the National Strategy for Sustainable Development of the Republic of Belarus for the period until 2035, the main task in the gas sector is to maintain production assets at a level ensuring safe energy supply. Practice shows that corrosion factor has the greatest potential to influence the technical condition of steel underground distribution gas pipelines. To compensate for corrosion processes, steel underground pipelines are equipped with special protective means, in particular, insulation coatings. One of the key operational characteristics of insulation is its integrity, which is controlled through periodic (comprehensive) instrumental technical inspection. Based on the inspection results, statistics of identified defects of protective coatings is formed. The work examines the issues of ensuring the reliability of operational data, and highlights the experience of implementing specialized software packages in gas supply organizations of the Beltopgaz State Production Association for recording and processing the results of instrument surveys of gas distribution pipelines. The issue of the influence of organizational and production aspect (features of technology, local practice of planning and performing specific types of work on technical operation) on the structure of operational data, which requires separate study and accounting for their further statistical processing and use, has been considered in the paper.

Keywords: underground steel gas pipeline, corrosion protection, insulating coating, instrumental inspection, software packages, operational data, validity

For citation: Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Some Issues of Ensuring Completeness and Reliability of Operational Data Obtained in the Course of Instrument Inspection of Steel Underground Gas Pipelines. *Science and Technique*. 23 (1), 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66> (in Russian)

Введение

Антикоррозийное изоляционное покрытие (ИП) – важный элемент стального подземного распределительного газопровода, оказывающий непосредственное влияние на его надежность и долговечность. Ценным источником информации о техническом состоянии изоляции на объектах газораспределительной сети Республики Беларусь в ходе эксплуатации является массив многолетних данных о дефектах покрытия, выявляемых в ходе периодического приборного обследования. Накопленная информация имеет ценность с точки зрения дальнейших практико-направленных исследований эксплуатационной надежности стальных подземных газопроводов, прогнозирования их долговечности методами теории вероятностей и математической статистики.

Ключевыми предпосылками достижения необходимой точности прогнозной модели надежности являются полнота и достоверность самих эксплуатационных данных, которые должны обеспечиваться на всех уровнях и этапах их сбора и обработки. Для обеспечения требуемого качества исходной информации разработана и внедрена в структуре Государственного производственного объединения по топливу и газификации (ГПО) «Белтопгаз» единая система учета эксплуатационных данных по результатам технического обслуживания распределительных газопроводов (в частности, их приборного обследования), а также соответствующие программные инструменты и электронные формы документации.

Основная часть

В соответствии с нормативными требованиями, вне зависимости от коррозионных условий, пассивная защита является обязательной для стальных подземных распределительных газопроводов на всем протяжении, и обеспечивается применением ИП усиленного типа (весьма усиленного типа, по ранее принятой терминологии) [1, 2].

Наружные покрытия обеспечивают первичную защиту стальных трубопроводов от коррозии, выполняя функцию «диффузионного барьера», отгораживающего металл от коррозионно-активных агентов грунта [3].

При этом, следуя своей защитной функции и месту в общей конструкции, изоляция в первую очередь подвергается различным деградиационным воздействиям внешней среды, под влиянием которых в процессе эксплуатации происходит ее износ, выражающийся, в частности, в образовании дефектов. В результате в поврежденных местах происходит потеря барьерных свойств ИП (образуется физический контакт «труба–земля»).

Выявление дефектов изоляции производится приборными методами, без вскрытия трубопровода путем проведения периодического (комплексного) приборного обследования (данный вид эксплуатационного контроля включает в себя также поиск утечек газа).

Защитные покрытия обследуют такими приборами, как искатель повреждений изоляции

трубопроводов (ИПИТ) различных модификаций, комплекс поисково-диагностический «Прогресс» ФК-01 (рис. 1) и другие. Их принцип работы основан на обнаружении изменения электромагнитного поля, создаваемого вокруг исследуемого металлического трубопровода протекающим по нему током. При этом достигается высокая чувствительность контроля: заявляемая минимальная площадь определяемого повреждения изоляции газопровода для современных приборов составляет до 10 мм^2 , точность определения места дефекта – 0,5 м.



Рис. 1. Приборы для поиска повреждений изоляции трубопроводов:

а – ИПИТ-3М, б – «Прогресс» ФК-1

Fig. 1. Instruments for detecting insulation faults of pipelines:
а – IPIT-3M, б – PROGRESS FK-1

Приборному обследованию подвергаются все без исключения подземные газопроводы, его периодичность, как правило, составляет 5 лет. Отдельные характерные участки (например, переходы через естественные и искусственные преграды) обследуются чаще – 1 раз в 3 года или ежегодно.

Все выявленные дефекты изоляции подлежат обязательному устранению не позднее 1 месяца после обнаружения в застроенной части и зонах опасного влияния блуждающих токов

и не позднее 3 месяцев в остальных случаях [4]. При шурфовании выявленных мест контакта «труба–земля» для проведения ремонтных работ осуществляются непосредственное наблюдение, изучение и документирование дефектов изоляции.

Таким образом, по результатам приборного обследования накапливается значительный объем данных по каждому распределительному газопроводу.

Результаты эксплуатационного контроля являются основным источником информации для определения текущего состояния технических объектов и прогнозирования его изменений в дальнейшем. Ценность эксплуатационной информации особенно возрастает для протяженных трубопроводных систем подземного исполнения в силу природной вариативности параметров почвенной (грунтовой) среды и дополнительных техногенных влияний, характеризующихся высокой степенью неоднородности условий эксплуатации, трудновоспроизводимых методом стендовых (полигонных) испытаний. Это в полной мере относится к стальным подземным распределительным газопроводам и их защитным покрытиям, понимание динамики и причин износа которых является одной из актуальных проблем в обеспечении надежности газораспределительной сети.

Вместе с тем получение достоверных данных о техническом состоянии протяженных и территориально разнесенных трубопроводных систем – весьма сложная задача, требующая особого внимания к обеспечению количества и качества исходной информации. Для серьезного инженерного анализа надежности требуется значительный объем данных, достаточность которого определяет уровень доверия к результатам анализа и степень обоснованности принимаемых на основе проведенного анализа конкретных технических и управленческих решений [5].

Существует целый ряд объективных и субъективных причин, снижающих достоверность эксплуатационных данных. С точки зрения человеческого фактора, это могут быть, напри-

мер, недобросовестность или неаккуратность в заполнении первичной технической документации, отсутствие необходимых навыков в работе с программным обеспечением. Организационные огрехи могут выражаться в недостаточности контроля исполнительской дисциплины на предприятии, плохом взаиминформировании между различными подразделениями, задействованными в сложной технологической цепочке (как правило, непосредственно поиск дефектов и утечек газа осуществляет служба электрохимической защиты, ремонтные работы – служба наружных газопроводов, сводные и аналитические формы готовит производственно-технический отдел). Наконец, существуют технические моменты – сбой в работе задействованных аппаратных и программных средств и т.д.

Для устранения негативного влияния перечисленных выше факторов на качество эксплуатационных данных в ГПО «Белтопгаз» использован комплексный подход, включающий в себя:

- создание единой системы сбора и обработки эксплуатационных данных;
- максимальную цифровизацию процесса сбора и обработки информации;
- нормативно-методическое обеспечение и обучение работников.

Единая система сбора и обработки эксплуатационной информации регламентирована от-

раслевыми документами и непосредственно интегрирована в производственную деятельность аппарата управления и газоснабжающих организаций объединения, осуществляющих эксплуатацию объектов газораспределительной системы. Установлен объем данных, подлежащих сбору и учету, предусмотрены первичные и накопительные формы учетной документации и порядок их заполнения [6, 7].

Также установлены требования по проведению ежегодного анализа эксплуатационных данных в сравнении с предыдущим периодом эксплуатации, разработаны соответствующие аналитические формы. Признаки, по которым производится анализ состояния ИП по результатам приборного обследования подземных газопроводов, приведены в табл. 1.

Под цифровизацией понимаем использование для изменения и преобразования технологических процессов (в частности, процессов технического обслуживания и эксплуатационного контроля объектов газораспределительной системы) современных цифровых технологий и оцифрованной информации. Оцифровка в данном случае – это кодирование информации в форму, удобную для использования, хранения, передачи и обработки с помощью компьютеров [8].

Таблица 1

Признаки, выделяемые при анализе состояния ИП по результатам приборного обследования

Signs identified when analyzing the condition of the insulating coating based on the results of instrumental examination

Характеристика объекта		Характеристика дефекта ИП	
Вид ИП	Срок службы газопровода	Вид дефекта	Место расположения дефекта
1. Битумно-мастичная 2. Экструдированный полиэтилен 3. Термоусаживающаяся лента 4. Липкая лента холодного нанесения	1. До 20 лет 2. От 20 до 40 лет 3. Свыше 40 лет	1. Отслоение 2. Повреждение корнями деревьев и кустарника 3. Продавливание грунтом, твердыми включениями и предметами 4. Микротрещины 5. Некачественное выполнение изоляционных работ 6. Повреждение при раскопках 7. Проседание футляра	1. Место установки сооружения или арматуры 2. Ввод в здание 3. Линейная часть газопровода, в том числе: 3.1. место врезки 3.2. в футляре 3.3. пересечение с другими коммуникациями

Стратегия цифровизации в газораспределительной отрасли Беларуси базируется на переходе от «лоскутной» автоматизации отдельных процессов и территориальных организаций к единой автоматизированной системе (ЕАС) ГПО «Белтопгаз», основу которой составляют три взаимодополняющих мультипрограммных комплекса (МПК):

– МПК «Мириада» (цифровое сопровождение непосредственных производителей работ с помощью мобильных устройств и приложений, здесь осуществляется движение заданий и отчетов между мастерским составом и исполнителями);

– МПК «Панорама» (главный интегратор всего массива (Big Data) накопленной информации, включающий ряд программных модулей для отдельных видов эксплуатационной деятельности и обеспечивающий визуализацию газораспределительной системы во всей ее совокупности в виде электронной карты);

– МПК «Вершина» (итоговая аналитика на уровне технического руководства).

Все перечисленное выше программное обеспечение представляет собой внутриотраслевые разработки и обеспечивает цифровое сопровождение производственно-технической деятельности эксплуатирующих организаций и аппарата управления ГПО «Белтопгаз».

Локальная цифровизация технологического процесса периодического приборного обследования стальных подземных распределительных газопроводов, сбора и обработки полученных результатов реализована в общей информационной среде.

Полностью автоматизированы этап планирования работ и формирование соответствующих графиков. При этом учитываются условия эксплуатации газопроводов: выделяются участки, имеющие сокращенные сроки проведения обследования (переходы через водные преграды, железные и высококатегорийные автомобильные дороги, сближения с объектами метрополитена и т.д.), а также труднодоступные участки, требующие применения специальных средств (проложенные методом горизонтально-и наклонно-направленного бурения, заболоченных участков и т.д.).

По мере выполнения работ в электронном виде производится формирование и подтверждение заключений, актов коррозионного обследования подземного сооружения, информация автоматически регистрируется в соответствующем электронном журнале (рис. 2) программного модуля «Наружные сети» МПК «Панорама».

Газопроводы

Сооружения на г/тр

Журналы

Земляные работы

Обследования г/тр

Справочники

Что нового?

Выход

Подраздел

Меню

График 2-ЭГ

Данные КПО

Проверка после ЗР

Наряд-задания

Карта КПО

Контакты ТЗ

Анализ состояния ИВ

Диагностика 40-летн

Состав комиссии

Настройка печати

Год для анализа2023

Печать

Отмена

Найти

					Дата ввода в эксплуатацию	Номер заключения	Адрес обнаружения	Срок устранения	Дата устранения	Дата повторного КПО	Подтверждение устранения	
			08.07.2023	24/113.1	г. Новка, ул. Северная	04.10.1995	910	Новка Северная улица,6	08.08.2023	27.07.2023	11.08.2023	да
			06.07.2023	23/9	г. Руба ул. Гралевокая д.2/12	14.05.1979	874	Витебск, Гралевокая улица 2	06.08.2023	25.07.2023	04.08.2023	да
			05.07.2023	24/44	д. Луки, санаторий "Луки" (ГЕУ)	06.10.1973	837	Луки, Сосновая улица 30	05.08.2023	11.07.2023	25.07.2023	да
			05.07.2023	22/501	д.Малые Летцы, перевод на природный газ	30.06.2003	827		05.10.2023	21.07.2023	04.08.2023	да
			12.06.2023	18/2	г. Витебск ул. Репина д.8 корп.1. д.8 корп.2. д.6. д.10	19.03.1974	743	Витебск, переулок Репина 21	12.07.2023	06.07.2023	24.08.2023	да
			12.06.2023	15/18	г. Витебск ул. Максима Горького д.41/1. д.35	28.10.1963	719	Витебск, улица Максима Горького 37	12.07.2023	27.06.2023	04.08.2023	да
			12.06.2023	15/18	г. Витебск ул. Максима Горького д.41/1. д.35	28.10.1963	719	Витебск, улица Максима Горького 37	12.07.2023	27.06.2023	04.08.2023	да
			12.06.2023	15/18	г. Витебск ул. Максима Горького д.41/1. д.35	28.10.1963	719	Витебск, улица Максима Горького 35	12.07.2023	27.06.2023	04.08.2023	да
			09.06.2023	15/4	г. Витебск ул. Герцена д.24	22.12.1977	562	Витебск, улица Герцена 24	09.07.2023	05.07.2023	04.08.2023	да
			07.06.2023	14/3	г. Витебск ул. Локомотивная д.7 корп.2	23.01.1972	407	Витебск, Локомотивная улица 7	07.07.2023	16.06.2023	04.08.2023	да

Найдено : 227

Внести повторное КПО

Печать списка контактов ТЗ

Рис. 2. Электронный журнал учета дефектов изоляции в программном модуле «Наружные сети» МПК «Панорама»

Fig. 2. Electronic logbook for recording insulation defects in the "External Networks" software module of the "Panorama" multi-program complex

С помощью фотофиксации поэтапно отражаются месторасположение, непосредственно сам дефект, результаты его устранения, благоустройство места раскопок после засыпки, файлы прикрепляются к записи в журнале и пространственному объекту на электронной карте. После завершения полного цикла работ результаты приборного обследования, шурфования и осмотра дефектов, их устранения и повторной проверки качества выполненных работ заносятся в электронный паспорт газопровода [9].

В информационно-аналитическом модуле МПК «Вершина» в автоматическом режиме реализован качественный анализ состояния ИП по результатам приборного обследования подземных газопроводов с учетом характеристик и показателей газопроводов и их покрытий, указанных в табл. 1, и количественный анализ плотности дефектов изоляции. Места выявленных повреждений ИП отображаются на электронной карте, при укрупнении масштаба происходит территориальная группировка таких мест. На рис. 3 показаны текущие (на определенный момент времени) результаты обследо-

вания изоляции газопроводов по г. Минску и Минскому району.

Программное обеспечение реализовано как набор клиент-серверных приложений (веб-приложений), в котором клиентом выступает браузер, а сервером – веб-сервер. Логика веб-приложения распределена между сервером и клиентом, хранение данных осуществляется на сервере, установленном в каждой газоснабжающей организации, обмен информацией происходит по сети. Одно из преимуществ такого подхода – то, что клиенты не зависят от конкретной операционной системы пользователя, поэтому веб-приложение является кросс-платформенным сервисом [10].

Данное программное обеспечение можно использовать на любых устройствах, имеющих интернет-браузер (персональный компьютер, планшет, телефон) и имеющих выход в корпоративную сеть предприятия, как в локальных корпоративных сетях, так и вне офиса, посредством шифрованных VPN-соединений, что, в свою очередь, дает возможность эксплуатировать его в полевых условиях.



Рис. 3. Электронная карта с группировкой выявленных дефектов изоляции в МПК «Вершина»

Fig. 3. Electronic card with a grouping of identified insulation defects in the "Vershina" multi-program complex

Предусмотрены встроенные инструменты для контроля и проверки корректности и полноты вносимых данных. Доступ к информации является авторизованным. Резервное копирование информации производится ежедневно.

В течение нескольких лет данное программное обеспечение поэтапно внедрено в практику во всех территориальных подразделениях эксплуатирующих организаций, технология выполнения работ по приборному обследованию газопроводов модифицирована с учетом его применения, что отражено в отраслевых нормативных документах. Соответственно обучение персонала включает обучение как работе с приборными средствами, так и владению специализированным программным обеспечением. В этих целях разработаны инструкции пользователя, обучающие видеоролики и демонстрационные версии программ.

Таким образом, созданная система сбора и обработки эксплуатационных данных обеспечивает получение объективной информации по результатам приборного обследования стальных подземных распределительных газопроводов, что позволило сформировать полный массив данных о проведенных работах и дефектах ИП на республиканской газораспределительной сети с 2009 г. Общая протяженность обследования за указанный период составила 98,36 тыс. км, всего зафиксировано 55,66 тыс. дефектов ИП всех видов.

Это позволило провести общую оценку степени износа и актуального технического состояния изоляции стальных подземных распределительных газопроводов в Республике Беларусь, результаты которой приведены ранее в [11].

Для объективной оценки статистических данных ИП использованы удельные показатели плотности дефектов D_d (defect density) и повреждаемости (дефектности) покрытия A_d (ability of defects), определяемой как среднее число повреждений изоляции на 1 км газораспределительной сети, выявленных в течение календарного года.

Анализом выявлено, что дефектообразование в изоляционных покрытиях стальных подземных газопроводов до настоящего времени

представляет собой, как правило, малоинтенсивный процесс, что подтверждено в том числе для длительно эксплуатируемых газопроводов. Полученные результаты демонстрируют приемлемый уровень износа ИП стальных подземных распределительных газопроводов в масштабах республики, исходя из такой ключевой характеристики, как целостность (сплошность) покрытия.

Значения удельной повреждаемости определены для всех видов применяемых покрытий. Выявлено, что наилучшие показатели демонстрируют покрытия на основе термоусаживающихся лент. Определена характерная разновидность повреждений защитного покрытия на основе битумных мастик – микротрещины, повышенная доля которых может быть использована в качестве индикатора процессов внутренней деградации для данного вида изоляции.

Представленные в [11] результаты вошли в обоснование отмены ранее установленного 40-летнего нормативного срока службы стальных газопроводов в новой редакции Правил по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. Данная мера позволила сэкономить значительные государственные средства за счет оптимизации объемов работ по техническому диагностированию стальных подземных газопроводов.

Вместе с тем, хотя повреждаемость является показателем, удобным для общей оценки эксплуатационных характеристик ИП, их сравнительного анализа, организации и планирования технического обслуживания в ходе производственной деятельности эксплуатационных организаций, для дальнейшего продуктивного использования накопленных данных (например, при надежности расчетах) необходимо перейти к общепринятым показателям надежности.

При этом следует учитывать, что приборное обследование – эксплуатационное мероприятие, первоочередной целью которого является поддержание технического состояния газопроводов на надлежащем уровне. Соответственно его планирование и проведение подчинены, в первую очередь, производственной логике, что в определенной мере может проти-

воречить логике правильно организованного эксперимента.

Так, отталкиваясь от преобладающей пятилетней периодичности проведения плановых работ и протяженности стальных подземных газопроводов, общие объемы обследования за указанный период должны были бы составить около 84 тыс. км, однако фактическая протяженность обследования в 1,17 раза выше. При этом данная величина превышения за весь период времени практически оставалась неизменной.

Характерные участки (такие как переходы через естественные и искусственные преграды), подвергающиеся обследованию чаще обычного, совокупно составляют десятки доли процента протяженности газораспределительной сети и не оказывают существенного влияния на общие объемы обследования. Здесь следует дополнительно принять во внимание еще несколько моментов.

Во-первых, небольшая часть газопроводов подвергается повторному обследованию в течение одного календарного года (сезона обследования), что может быть в случае появления сомнений в результатах планового обследования, при проведении выборочного контроля или других оговоренных в нормативных документах случаях [4, 6].

Основная же причина состоит в том, что на практике часть объектов включаются в планы на обследование досрочно, исходя из соображений равномерного распределения объема выполняемых работ во времени и территориального принципа. Согласно [6], при планировании рекомендуется предусматривать укрупненное (по кварталам, микрорайонам) обследование всех подземных газопроводов независимо от срока врезки или предыдущего обследования, а также участка, объединяющего одну или несколько зон электрозащиты. Такая локальная оптимизация графиков обследования технически и экономически обоснована и носит постоянный характер, из-за чего реальная периодичность выполнения работ всегда несколько выше регламентируемой.

Очевидно, что такое превышение фактических объемов работ имеет системный характер, определяется естественной избыточностью планирования и внеплановой составляющей

и может быть выражено в виде поправочного коэффициента $K_{\text{орг}}$

$$Q_{\text{факт}} = K_{\text{орг}} Q_{\text{регл}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{факт}}$ и $Q_{\text{регл}}$ – фактический и регламентируемый объемы работ (наблюдений) соответственно.

При этом $K_{\text{орг}}$ в значительной мере будет зависеть от установившейся практики производственной деятельности в той или иной эксплуатирующей организации, которая может иметь существенные особенности и отличия.

Таким образом, состав объектов наблюдения (эксплуатационного контроля) будет подвержен случайным вариациям от наблюдения к наблюдению, как и интервал между наблюдениями. Некоторая неупорядоченность внутренней структуры в той или иной мере будет присуща любым эксплуатационным данным по результатам плановых работ по техническому обслуживанию, отличая их от данных, полученных при наблюдениях ограниченного количества тщательно контролируемых опытных объектов, что должно быть учтено при дальнейшей статистической обработке.

ВЫВОДЫ

1. Показан положительный опыт создания и внедрения в структуре Государственного производственного объединения по топливу и газификации «Белтопгаз» единой системы учета эксплуатационной информации, цифровизации процесса сбора и обработки данных, что позволило обеспечить высокий уровень их полноты и достоверности, а также сформировать полный массив данных по результатам проводимых на республиканской газораспределительной сети работ по приборному обследованию за период с 2009 г.

2. На основании общего анализа накопленной информации дана оценка степени износа и актуального технического состояния изоляции стальных подземных распределительных газопроводов в Республике Беларусь. Выявлено, что дефектообразование в изоляционных покрытиях стальных подземных газопроводов до настоящего времени представляет собой, как правило, малоинтенсивный процесс, что

подтверждено в том числе и для длительно эксплуатируемых газопроводов. Результаты исследований вошли в обоснование отмены ранее установленного 40-летнего нормативного срока службы стальных газопроводов в новой редакции Правил по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. Данная мера позволила сэкономить значительные государственные средства.

3. На основании анализа многолетней эксплуатационной практики газоснабжающих организаций выявлены характерные особенности проведения плановых работ на газопроводах, влияющие на структуру массива данных, получаемых по их результатам. Учет данного влияния позволит повысить точность дальнейших ретроспективных статистических оценок и прогнозирования надежности объектов газораспределительной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: ГОСТ 9.602–1989. М.: Госстандарт СССР, 1989. 59 с.
2. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: ГОСТ 9.602–2016. М.: Стандартинформ, 2016. 87 с.
3. Калачев, И. Ф. Снижение износа трубопровода использованием защитных покрытий / И. Ф. Калачев // Экспозиция. Нефть. Газ. 2011. № 6. С. 8–9.
4. Правила обеспечения промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. Минск: ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», 2023. 185 с.
5. Кирюхин, С. Н. Оценка данных о технологических нарушениях в тепловых сетях / С. Н. Кирюхин, Е. В. Сеннова, А. О. Шиманская // Энергосбережение. 2018. № 6. С. 38–45.
6. Система технического обслуживания и ремонта систем газоснабжения. Периодическое приборное техническое обследование стальных подземных газопроводов: СТП 03.05–2014. Минск: УП «НОТ», 2014. 17 с.
7. Альбом форм документов по технической эксплуатации объектов газораспределительной системы и газопотребления. Минск: УП «НОТ», 2019. 365 с.
8. Кудрявцева, Т. Ю. Основные понятия цифровизации / Т. Ю. Кудрявцева, К. С. Кожина // Вестник Академии знаний. 2021. № 3 (44). С. 149–151.
9. Струцкий, Н. В. Анализ сохранения целостности битумно-мастичной изоляции распределительных газопроводов в процессе эксплуатации / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Инновации в образовательном процессе: сб. трудов XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 160-летию со дня рождения академика А. Н. Крылова. Чебоксары: Политех, 2023. С. 140–144.

10. Рябов, В. А. Современные веб-технологии / В. А. Рябов, А. И. Несвижский. М.: ИНТУИТ, 2010. 475 с.
11. Романюк, В. Н. Применяемые изоляционные покрытия распределительных газопроводов в Республике Беларусь и их характеристика / В. Н. Романюк, Н. В. Струцкий // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 4. С. 308–316. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-308-316>.

Поступила 03.10.2023

Подписана к печати 14.12.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. State Standard 9.602–1989. *Unified System of Protection Against Corrosion and Aging. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Publishing House “Gosstandart SSSR”, 1989. 59 (in Russian).
2. State Standard 9.602–2016. *Unified System of Protection Against Corrosion and Aging. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 87 (in Russian).
3. Kalachev I. F. (2011) Reducing Pipeline Wear using Protective Coatings. *Ekspozitsiya. Neft. Gaz = Exposition. Oil. Gas*, (6), 8–9 (in Russian).
4. *Rules for Ensuring Industrial Safety in the Field of Gas Supply of the Republic of Belarus*. Minsk, Publishing House “GIPK GAZ-INSTITUT”, 2023. 185 (in Russian).
5. Kiryukhin S. N., Sennova E. V., Shimanskaya A. O. (2018) Assessment of Data on Technological Violations in Heating Networks. *Energoberezhnie [Energy Saving]*, 38–45 (in Russian).
6. STP [Process Flow Scheme] 03.05–2014. *System for Maintenance and Repair of Gas Supply Systems. Periodic Instrumental Technical Inspection of Steel Underground Gas Pipelines*. Minsk, Unitary Enterprise “NOT”, 2014. 17 (in Russian).
7. *Album of Document Forms for Technical Operation of Gas Distribution System and Gas Consumption Facilities*. Minsk, Unitary Enterprise “NOT”, 2019. 365 (in Russian).
8. Kudryavtseva T. Yu., Kozhina K. S. (2021) Basic Concepts of Digitalization. *Vestnik Akademii Znanii = Bulletin of Academy of Knowledge*, (3), 149–151 (in Russian).
9. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2023) Analysis of Maintaining the Integrity of Bitumen-Mastic Insulation of Gas Distribution Pipelines During Operation. *Innovatsii v Obrazovatel'nom Protssesse: Sbornik Trudov KhKhI Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii, Posvyashchennoi 160-letiyu so Dnya Rozhdeniya Akademika A. N. Krylova [Innovations in the Educational Process: Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 160th Anniversary of the birth of Academician A. N. Krylov]*. Cheboksary, Polytekh Publ., 140–144 (in Russian).
10. Ryabov V. A., Nesvizhskii A. I. (2010) *Modern web Technologies*. Moscow, INTERNET-University of Information Technologies. 475 (in Russian).
11. Romaniuk V. N., Strutsky N. V. (2023) Applied Insulating Coatings for Gas Distribution Pipelines in the Republic of Belarus and Their Characteristics. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 22 (4), 308–316 (in Russian).

Received: 03.10.2023

Accepted: 14.12.2023

Published online: 31.01.2024

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-67-79>

УДК 338.28; 338.45.01

Университет как драйвер новой промышленной политики России: оценка эффективности (на примере Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники»)

Канд. полит. наук, доц. М. В. Добрынина¹⁾, докт. полит. наук, доц. Т. В. Растимешина¹⁾

¹⁾Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»
(Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Развитие образовательных учреждений высшего образования в рамках парадигмы «Университет 3.0» активно анализируется в научном сообществе России, Беларуси и других стран ЕвразЭС, однако комплексную оценку роли российских университетов в достижении целей новой промышленной политики пытаются дать незначительное количество ученых. В статье приведены результаты исследования, предпринятого с целью восполнить этот пробел. Цель исследования заключалась в оценке эффективности деятельности учреждений высшего образования с точки зрения их вклада в достижение целей новой промышленной политики (на примере ключевых показателей развития Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники»). В ходе исследования решены следующие задачи: выполнен краткий обзор основных научных работ по теме исследования; проанализированы содержание и основные направления новой промышленной политики; выявлена роль университетов как ключевых элементов институционального механизма новой промышленной политики и функций, через реализацию которых университеты ее выполняют. Выдвинута гипотеза о несбалансированности двух ключевых направлений развития ведущих российских научно-исследовательских университетов с точки зрения их участия в приращении экономической мощи России. На основе анализа основных показателей развития Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» показано, что расширению присутствия данного вуза в национальной науке и промышленности уделяется существенно больше времени и средств, нежели повышению качества учебных программ и внедрению результатов инновационной активности в работу со студентами и аспирантами. Сделаны выводы о недостаточной проработанности теоретической модели, практических путей и средств транспорта ресурсов, инновационных решений и энергетики инноваций в образовательное пространство. Сформулированы практические рекомендации для образовательных учреждений: предложено более широко привлекать промышленные предприятия не только к аккредитации, но и к реализации образовательных программ (включая такие элементы, как практики и стажировки на промышленных предприятиях). Такой подход поможет усилить эффекты тройной спирали инноваций в подготовке инженерных кадров для реального сектора экономики.

Ключевые слова: новая промышленная политика, реиндустриализация, промышленный ренессанс, пятая промышленная революция, Индустрия 5.0, Университет 3.0, импортозамещение, экономические санкции, научно-технический суверенитет, национальная безопасность, наука, техника, инженерное образование, инженерный вуз, драйвер, электроника, нанoeлектроника, инновации, инновационное развитие, патернализм, протекционизм

Для цитирования: Добрынина, М. В. Университет как драйвер новой промышленной политики России: оценка эффективности (на примере Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники») / М. В. Добрынина, Т. В. Растимешина // *Наука и техника*. 2023. Т. 23, № 1. С. 67–79. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-67-79>

Адрес для переписки

Растимешина Татьяна Владимировна
Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»
пл. Шокина, 1,
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация
Тел.: +7 901 792-47-30
rast-v2012@yandex.ru

Address for correspondence

Rastimeshina Tatiana V.
National Research University
of Electronic Technology
Shokin Square, 1,
124498, Moscow, Zelenograd, Russian Federation
Тел.: +7 901 792-47-30
rast-v2012@yandex.ru

University as a Driver of New Industrial Policy of Russia: Efficiency Evaluation (Using the Case of National Research University of Electronic Technology)

M. V. Dobrynina¹⁾, T. V. Rastimeshina¹⁾

¹⁾National Research University of Electronic Technology (Moscow, Russian Federation)

Abstract. Development of higher education institutions within the framework of the “University 3.0” paradigm is actively analyzed in the research community of Russia, Belarus and Euroasian Economic Community countries. However, a small number of scientists are trying to give a comprehensive assessment of the role of Russian universities in achieving the goals of new industrial policy. The paper presents the results of a study aimed at filling this gap. The purpose of the study was to evaluate the efficiency of higher education institutions in the context of their contribution to achieving the goals of the new industrial policy (using the example of key development indicators of the National Research University of Electronic Technology (MIET)). During the study, the following tasks have been solved: a brief overview of the main scientific publications covering the research issue was completed; the content and main directions of the new industrial policy were analyzed; the role of universities as key elements of the institutional mechanism of the new industrial policy has been revealed, through the implementation of which universities carry out it. A hypothesis has been put forward about imbalance of two key areas of development of leading Russian research universities in terms of their participation in increasing the economic power of Russia. Based on the analysis of the main indicators of the development of the National Research University of Electronic Technology (MIET) it has been demonstrated that significantly more time and resources is devoted to expanding the presence of this university in national science and industry than to improving the quality of educational programs and introducing the results of innovative activity into work with students and graduate students. Conclusions have been made that theoretical model and practical ways and means for transporting resources, innovative solutions and innovation energy in the educational space are not sufficiently explored. Practical recommendations for educational institutions are formulated: it is proposed to involve industrial enterprises more widely not only in accreditation, but also in the implementation of educational programs (including such elements as internships and internships at industrial enterprises). This approach will help to strengthen the effects of the triple spiral of innovation in the training of engineering personnel for the real sector of the economy

Keywords: new industrial policy, reindustrialization, industrial renaissance, fifth industrial revolution, Industry 5.0, University 3.0, import substitution, economic sanctions, scientific and technical sovereignty, national security, science, technology, engineering education, engineering university, driver, electronics, nanoelectronics, innovation, innovative development, paternalism, protectionism

For citation: Dobrynina M. V., Rastimeshina T. V. (2024) University as a Driver of New Industrial Policy of Russia: Efficiency Evaluation (Using the Case of National Research University of Electronic Technology). *Science and Technique*. 23 (1), 67–79. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-67-79> (in Russian)

Введение

Новая промышленная политика, нацеленная на достижение экономического уклада, соответствующего уровню Индустрии 5.0, реализуется и соответственно обсуждается политическим и экономическим истеблишментом и научным сообществом во многих странах мира. Экономические, политические и социальные процессы, в частности реиндустриализация, промышленный ренессанс и пятая промышленная революция, являются вызовами для развития современной глобальной экономики и императивами реформ систем инженерного образования и находятся в центре научных дискуссий почти 20 лет [1–7]. Так, значительное число исследований уже в первые десятилетия XXI в. были посвящены обнаружению, описанию и анализу взаимосвязей между политиками

реиндустриализации и другими направлениями внутренних политик развитых и развивающихся стран [1–3, 7].

Импортозамещение как важнейший приоритет политики реиндустриализации, а также эффективность предпринимаемых государством усилий по его достижению также более 10 лет остаются предметом анализа российских экономистов и представителей других направлений общественных наук [7–12]. В то же время роль науки, техники и инженерного образования в обеспечении всех видов безопасности личности, общества и государства, как и, собственно, новые концепты обеспечения безопасности, постепенно входят в число приоритетных проблем научного дискурса [7, 11–14], специалисты ищут и обсуждают новые подходы к анализу систем национальной безопасности [15]. В частности, И. А. Ладынин предло-

жил новую систему оценки эффективности системы обеспечения научно-технологической безопасности России на основе пяти индикаторов [16].

Следует отметить, что ученые из России, Беларуси и из других стран ЕвразЭС активно анализируют и нередко в критическом ключе оценивают развитие образовательных учреждений высшего образования в рамках парадигмы «Университет 3.0» [17–21]. Вместе с тем при обсуждении путей и проблем развития инженерного образования внимание отечественных ученых, как правило, сосредоточено на содержательных, педагогических, кадровых, методологических, правовых, административных и экономических аспектах. Тогда как попытки комплексной оценки роли российских университетов в достижении целей новой промышленной политики предпринимаются относительно редко, что обуславливает актуальность и новизну нашего исследования.

Главная цель исследования, результаты которого изложены в статье, – оценить эффективность развития учреждений высшего образования с точки зрения их вклада в достижение целей новой промышленной политики. В качестве объекта исследования выбрано развитие Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники».

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (далее – МИЭТ) является единственным в числе ведущих вузов РФ университетом, специализирующимся на подготовке и выпуске высококвалифицированных специалистов, а также осуществлении научных исследований и разработок в области электроники и наноэлектроники. МИЭТ был основан как центр первой и долгое время единственной не только в Советском Союзе, но и во всей Центральной и Восточной Европе «Кремневой долины» – площадки научных исследований, конструкторских разработок и подготовки кадров для электронной промышленности. В определенной степени приказами Минвуза СССР «Об организации Московского института электронной техники» от 9 декабря 1965 г. № 363 и РСФСР «Об организации Московского института электронной техники» от 9 декабря 1965 г. № 633 в Советском Союзе была фундирована первая инновационная отрасль промышленности – электроника и первая инновационная площадка.

Нацеленность МИЭТ на развитие науки отражает тот факт, что уже в 1968 г. (через два года после первого набора студентов) выпускник аспирантуры МИЭТ защитил кандидатскую диссертацию. На протяжении 55 лет своего развития МИЭТ фактически был и остается «машиной инноваций» [21], т. е. тем, чем он только должен был стать в первом десятилетии XXI в., при смене парадигмы развития с 2.0 на 3.0. На сегодня стратегической целью МИЭТ является трансформация ведущего технического университета в ядро открытого научно-образовательного кластера опережающей подготовки научно-исследовательской и инженерной элиты для генерации знаний и инноваций в сфере электроники и информационных технологий.

В связи с этим мы полагаем, что показатели развития МИЭТ релевантно отражают движение лучших инженерных вузов в русле парадигмы «Университет 3.0». При этом наше основное внимание сфокусировано на направлениях, приоритетах и перспективах развития университета как одного из драйверов и инструментов институционального механизма осуществления новой промышленной политики России.

Новая промышленная политика РФ как ответ на экономические и политические вызовы

На заседании Совета при Президенте РФ по науке и образованию В. В. Путин отметил: «Сегодня лидерами глобального развития становятся те страны, которые способны создавать прорывные технологии и на их основе формировать собственную мощную производственную базу. Качество инженерных кадров становится одним из ключевых факторов конкурентоспособности государства». Это, как и многие высказывания российского национального лидера и других руководителей государства, выражает идею острейшей необходимости форсированной модернизации российской экономики для сохранения конкурентоспособности страны, обеспечения национальной безопасности и национального научно-технического суверенитета, возвращения России и ее союзникам лидирующих позиций на геополитических и геоэкономических «шахматных досках» (З. Бжезинский).

Основным политическим инструментом модернизационного рывка служит новая промышленная политика. Она представляет собой уси-

лия государств (нередко носящие протекционистский характер) по регулированию экономических отношений и поддержке отдельных предприятий, направлений развития или отраслей в целях достижения таких показателей, которые без применения протекционистских мер почти или совершенно недостижимы. Одно из важных направлений промышленной политики – создание финансовых и иных экономических и внеэкономических стимулов для повышения инвестиционной привлекательности реального сектора экономики, в первую очередь промышленности. Новая промышленная политика (реиндустриализация, политика промышленного ренессанса) рассматривается многими экономистами всего мира как наиболее эффективный механизм поддержки и активизации экономического роста в условиях становления 6-го экономического уклада, поэтому соответствующие национальные стратегии разработаны и реализуются в наиболее экономически развитых странах мира (Великобритания, Китай, США, Франция, Япония), развивающихся странах (Аргентина, Бразилия, Индия). На уровне межстрановых союзов (Евросоюз, Таможенный союз, Ассоциация стран Юго-Восточной Азии и др.) также широко применяются политические и экономические меры, нацеленные на поддержку экономического развития в заданном ограниченными ресурсами коридоре возможностей.

Основным толчком, побудившим политические институты к мобилизации ресурсов для поддержки экономики, стал глобальный экономический кризис 2008 г. Восстановление мировой экономики и экономики макрорегионов после кризиса, даже по самым скептическим оценкам, ожидалось к 2011–2012 гг. Однако после того как ожидаемого восстановления не произошло – более того, имело место разрастание системного кризиса, – элиты всего мира осознали, что политика «ночного сторожа» во многом изжила себя и что вызовы инновационной экономики могут быть отражены только при применении системных патерналистских мер [23]. Идеология новой промышленной политики весьма емко выражена Р. Д. Аткинсоном [24], который отметил, что реиндустриализация является делом национальной важности и должна быть нацелена на системную трансформацию роли промышленности в системе обеспечения национального благо-

состояния для достижения двух эффектов: во-первых, долгосрочного спилловер-эффекта [25–27], во-вторых, эффекта расширения применения инноваций во всех секторах, в том числе в сфере услуг (включая медицину и образование) [28]. Эта идея так же верна для других стран, как и для США, не исключая Россию и ее союзников.

Для России одним из приоритетов новой промышленной политики является импортозамещение. К началу XXI в. российская экономика успела глубоко интегрироваться в глобальные логистические сети и глобальную систему разделения труда, поэтому имела высокую степень импортозависимости: почти 90 % импорта России приходилось не на товары народного потребления, а на машины, оборудование, технологии, материалы и комплектующие [7, с. 90]. Политическая компонента приоритета избавления от импортозависимости усиливается тем, что пакеты санкций, введенные против России в 2014–2015 и 2022–2023 гг., являются ответом западных стран на политические действия России и нацелены в первую очередь на оказание экономического давления в политических целях.

Необходимость новой промышленной политики усиливается тем, что экономический кризис 2008–2012 гг. сопровождался разрастанием дисбаланса в социально-экономической сфере: национальные системы подготовки кадров не удовлетворяли спрос на профессионалов, готовых работать и развиваться в условиях Индустрии 5.0, в частности владеющих квалификациями STEM (наука, технология, инженерия и математика). Импортозависимость российской экономики имела и кадровую компоненту: до 2012 г. инженерные профессии составляли более 50 % перечня специальностей, которые могли быть замещены иностранными специалистами, в 2014 г. этих профессий там стало больше. В те же годы экспертная оценка качества подготовки технических специалистов (3,7 балла по 5-балльной шкале) показала отставание России от мировых лидеров на одно-два десятилетия (эксперты отмечали, что более 40 % соискателей должностей, требующих инженерной подготовки, не могут приступить к выполнению профессиональных обязанностей без дообучения и длительной стажировки). Анализируя статистические данные, специалисты отмечают: «Очередной этап реформы инженерного образования стартовал в 2012 г.,

однако к 2014 г. количественные и качественные показатели развития инженерного образования указывали на то, что кризис еще не преодолен» [29, с. 131]; «В 2016 г. Министерство образования и науки России провело мониторинг состояния целевой подготовки в вузах... <...> В отчете о мониторинге авторы фактически признают действующую модель целевого приема неэффективной, поскольку она не удовлетворяет кадровый голод в российской экономике. <...> Работодатели отмечают, что целевой прием – низкоэффективная мера решения кадровой проблемы, поскольку абитуриенты с низким качеством знаний, зачисленные на обучение, редко становятся ответственными студентами и либо отчисляются по неуспеваемости, либо заканчивают вузы, имея относительно невысокий уровень общих и профессиональных компетенций» [28, с. 133]. Позиции российских технических вузов в мировых рейтингах также не были высокими. Соответственно, одним из ключевых направлений новой промышленной политики должна была стать переориентация национальных институциональных механизмов подготовки кадров на их воспроизводство в новой парадигме Индустрии 5.0.

Таким образом, перед российской нацией и государством встала задача создать условия для новой технологической революции. Одним из приоритетов этой политики стало изменение подходов к развитию системы инженерного образования.

Университет 3.0 как элемент институционального механизма новой промышленной политики

С 2012 г., как отмечалось нами ранее, «политика нашего государства в отношении инженерного образования исключительно отчетливо отражает политические процессы, основные этапы и направления политической и экономической модернизации, она нацелена на удовлетворение запроса государства на кадры нового типа» [29, с. 131].

Концепция «Университет 3.0» активно разрабатывается и в фундаментальном, и в прикладном ключе. Среди первых научных работ, детально описывающих и идеологические, и финансовые, и иные составляющие концепта, следует отметить коллективную монографию американских ученых «Системы высшего образования 3.0: использование системности, обеспечение производительности» [30], а также не-

которые работы российских и белорусских авторов. В то же время ученые из ЕвразЭС, активно обсуждающие концепцию «Университет 3.0», концентрируют свое внимание преимущественно на прикладных аспектах, в первую очередь преимуществ и недостатках концепции в связи с необходимостью ее инсталляции и адаптации к развитию национальных систем образования, рассматривают факторы и условия, способствующие ее внедрению, а также анализируют первые эффекты ее внедрения.

Российские ученые и их коллеги из Беларуси, Казахстана и Узбекистана относительно редко полемизируют по поводу определения, сущности и содержания концепта «Университет 3.0», в общеметодологическом плане ориентируясь на следующие императивы: «Университет 3.0» – это инновационная, однако преемственная по отношению к «Университету 2.0» парадигма организации университетского пространства, в котором собственно образовательное учреждение при определенных условиях становится или должно стать «машиной инноваций» [21], т. е. его деятельность должна быть переориентирована с трансляции основного содержания образовательных программ на производство, инкубирование и распространение технологических, производственных и образовательных новшеств. На основании этого концепта перестраивается инфраструктура научно-образовательных площадок: в их основном ядре оказываются научные блоки университетов (как правило, включающие в себя научные комплексы, лаборатории, центры научных испытаний и т. д.), которые функционально связаны и с элементами внутренней среды (в частности, элементами учебного блока), и с внешней средой: научными, исследовательскими, производственными, социальными комплексами.

Ядро научно-инновационного комплекса МИЭТ составляют научно-исследовательский блок (он объединяет кадровые, материально-технические и организационные ресурсы, обеспечивающие деятельность по проведению научных изысканий, исследований и разработок, экспертных и аналитических работ, подготовке кандидатских и докторских диссертаций, распространению научных знаний и опыта, интеграции науки в международное научное пространство), а также инновационно-производственный блок (его основная миссия заключается в развитии научно-технического сотрудничества с промышленными предприя-

тиями в целях коммерциализации и внешнего трансфера технологий университета и создания на этой основе конкурентоспособной продукции, в том числе посредством участия МИЭТ в инновационных проектах). Инновационный комплекс МИЭТ занимает более 2,5 га и представляет собой открытую технологическую площадку, обеспечивающую создание изделий электроники, от электронной компонентной базы до аппаратуры. На территории инновационного комплекса размещены: более 40 малых компаний (более 1500 рабочих мест); передовое технологическое, аналитическое, измерительное и испытательное оборудование; единственная в России сеть ЦКП (включающая в себя более 100 малых инновационных предприятий), реализующая сквозной цикл создания наукоемкой продукции в области электроники, микроэлектроники и информационно-телекоммуникационных технологий. Инновационно-производственная инфраструктура МИЭТ объединила большой комплекс малых и крупных научно-производственных предприятий в рамках проекта «Технополис “Москва”. Площадка “МИЭТ”».

На реализацию модели «Университет 3.0» в МИЭТ нацелены ряд институциональных преобразований, в частности: учреждение междисциплинарного Центра научного превосходства (ЦНТП) и сетевых лабораторий, способных решать научно-технические задачи и реализовывать комплексные проекты по прорывным направлениям электроники и IT; создание научно-координационного и экспертного совета ЦНТП, а также прогнозно-аналитического центра, осуществляющего научно-методическое руководство, оценку эффективности, принятие стратегических решений при появлении новых глобальных научно-технологических вызовов; модернизация системы управления комплексными научно-техническими проектами, инфраструктурой и сопровождением деятельности малых инновационных предприятий, в том числе для работы с молодыми технологическими предпринимателями, от школьников до аспирантов и сотрудников; гармонизация программ развития МИЭТ, предприятий его инновационного комплекса и крупных компаний отрасли, а также научных организаций.

Важным аспектом развития университета в рамках парадигмы «Университет 3.0» является широкое привлечение внебюджетных источников финансирования. МИЭТ, финансирование которого базируется на модели 40/30/30, пока

не в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к университету инновационного типа. Согласно данным, предоставленным МИЭТ в рамках проведения мониторинга Минобрнауки по основным направлениям деятельности образовательной организации высшего образования (форма N 1-Мониторинг) в 2020–2021 гг., бюджетное финансирование составляет 63,81 % бюджета университета, тогда как внебюджетные доходы, связанные с выполнением научно-исследовательских работ (НИР) и опытно-конструкторских разработок (ОКР), – 27,87 %, а внебюджетные доходы от образовательной деятельности – 8,32 %, т. е. бюджетное финансирование за счет НИОКР почти соответствует модельным значениям. Следует отметить, что в период 2016–2020 гг. удельный вес финансового обеспечения университета от НИОКР в общих доходах университета составлял 40,3 %. Иными словами, модельные значения финансовой модели 40/30/30 были не только достигнуты, но и превышены.

Согласно концепции «Университет 3.0», образовательные учреждения высшего образования, в первую очередь инженерного и естественно-научного профилей, должны быть важным элементом институционального механизма новой промышленной политики и частью инкубационной экосистемы, вовлекающей в инновационную деятельность новых агентов. Эта новая роль университетов реализуется через выполнение ими таких функций, как:

- генерация и трансляция новых знаний и технологий, подготовка на этой основе ученых и специалистов для работы в условиях индустрии 4.0 и 5.0;
- генерация и распространение инновационных продуктов всех видов;
- коммерциализация инноваций;
- пропаганда инновационной деятельности, просвещение, распространение знаний среди всех групп населения;
- вовлечение и содействие инновационному развитию новых агентов;
- создание новых элементов инфраструктуры инновационной среды и содействие им;
- содействие становлению и развитию культуры инноваций;
- создание благоприятной среды для возникновения и разрастания спилловер-эффекта и эффекта расширения применения инноваций во всех секторах и др.

Сегодня объем государственных затрат на финансирование НИР и ОКР стабильно растет (табл. 1).

Таблица 1

Внутренние затраты на научные исследования и разработки (по социально-экономическим целям)

Internal R&D costs (by socio-economic objectives)

Внутренние затраты	2010 г.	2014 г.	2016 г.	2020 г.	2022 г.
Всего	523 377,2	847 527,0	943 815,2	1 174 534,3	1 435 914,3
В том числе:					
на развитие экономики	183 113,8	319 943,4	356 656,9	447 604,6	584 197,5
на промышленное производство	126 029,4	225 973,8	267 198,7	329 248,2	427 270,1

Источник: составлено авторами по данным, опубликованным на официальном сайте Федеральной службы государственной статистики в разделе «Наука, инновации и технологии» (<https://rosstat.gov.ru/folder/154849?print=1>).

Как видно из данных, представленных в табл. 1, развитие экономики является приоритетной целью государственного финансирования: за 12 лет (с 2010 г.) при росте внутренних государственных затрат на научные исследования в 2,7 раза затраты на развитие промышленного производства выросли в 3,4 раза. В то же время более 50 % НИОКР в России выполняются образовательными организациями высшего образования (табл. 2) в партнерстве с промышленными предприятиями инновационного комплекса РФ. Так, с 2000 по 2022 г. при относительно незначительном росте (на 96 ед.) числа всех организаций, выполняющих исследования, число организаций высшего образования, выполняющих исследования и разработки, выросло более чем в два раза.

Таблица 2

Организации, выполняющие НИОКР

Organizations performing R&D

Число организаций	2000 г.	2010 г.	2014 г.	2016 г.	2020 г.	2022 г.
Всего	4099	3492	3604	4032	4175	4195
<i>В том числе по секторам деятельности:</i>						
государственный	1247	1400	1491	1546	1501	1522
предпринимательский	2278	1405	1265	1326	1426	1394
высшего образования	526	617	777	1064	1080	1088
некоммерческих организаций	48	70	71	96	168	191

Источник: составлено авторами по данным, опубликованным на официальном сайте Федеральной службы государственной статистики в разделе «Наука, инновации и технологии» (<https://rosstat.gov.ru/folder/154849?print=1>).

Финансирование научно-исследовательской деятельности университетов – важнейшее направление, с одной стороны, реализации новой промышленной политики РФ, с другой – мо-

дернизации системы инженерного образования, трансформации образовательных организаций в соответствии с моделью «Университет 3.0» и их превращения в драйверы инновационного развития и мощные инструменты обеспечения национального научно-технического суверенитета. Вместе с тем увеличение объема работ (НИОКР и др.), выполняемых образовательными организациями высшего образования, указывает на увеличение объема социальной ответственности образовательного сектора в достижении целевых показателей экономической и политической модернизации, его роли и значения в государственной политике модернизации.

Проанализируем общий объем НИОКР, выполненных МИЭТ, и изменения этого показателя с 2015 до 2021 г. В 2021 г. общий объем выполненных университетом НИОКР составил 745 871,70 тыс. руб. Этот объем вырос по сравнению с 2015 г. (1 289 322,20 тыс. руб.) в 5,76 раз. В 2022 г. общий объем НИОКР в университете составил 1745,3 млн руб., в том числе объем средств государственного задания в сфере научной деятельности – 181,7 млн руб.

Количество грантов, полученных МИЭТ за период с 2015 до 2021 г., также выросло более чем в три раза: с 5,67 ед. до 17,72. В 2022 г. ученые МИЭТ стали обладателями семи грантов Президента РФ для поддержки исследований молодых ученых – кандидатов наук. Выполнялись исследования по 17 грантам Российского научного фонда и 28 грантам Российского фонда фундаментальных исследований. Общий объем средств по грантам составил 83,8 млн руб.

Наличие задела, реализованные институциональные преобразования и финансирование инноваций должны привести к ряду эффек-

тов на уровне влияния на развитие отрасли и системы инженерного образования, а также на достижение национальных целей развития Российской Федерации, в частности:

- увеличение вклада университета в обеспечение присутствия Российской Федерации в числе десяти ведущих стран мира по объему научных исследований и разработок, в том числе за счет создания новых центров и сетевых лабораторий, осуществляющих научно-исследовательскую и инновационную деятельность через реализацию прорывных комплексных проектов и ускорение внедрения результатов интеллектуальной деятельности в высокотехнологичную промышленность для развития российской экономики;

- повышение качества подготовки кадров для сферы научных исследований и разработок через формирование качественно новых условий осуществления образовательной, научной и инновационной деятельности, создание благоприятной среды для развития предпринимательской и научной деятельности детей и молодежи.

Вклад МИЭТ в инновационное развитие и обеспечение присутствия РФ в числе стран, лидирующих по объему НИОКР, действительно ощутим. Так, в 2021 г. объем НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника составлял 1 887,9, что более чем в 10 раз превышало медианные значения по РФ (122,6) и медианные значения по ведомственной принадлежности (127,2). В качественном отношении по результатам деятельности в 2022 г. объем приносящей доход деятельности в рамках хозяйственных договоров на услуги и НИОКР составил 731,28 млн руб., было подано 92 заявки на РИД, заключено 49 лицензионных договоров, зарегистрировано авторское право на 55 произведений науки, литературы, искусства и дизайна, программ ЭВМ, топологии ИМС, подано 119 заявок на инновационные конкурсы для обучающихся и 6 заявок на конкурсы фондов развития.

В 2022 г. ученые МИЭТ активно участвовали в проектах и грантах: Комплексном проекте по созданию высокотехнологического производства (постановление № 218); Государственном задании в сфере научной деятельности; Федеральной научно-технической программе «Развитие синхротронных и нейтронных ис-

следований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг.»; Программе развития научного приборостроения; Государственной программе РФ «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 гг.»; Российского научного фонда; Российского фонда фундаментальных исследований; грантах Президента РФ. В рамках реализации научных исследований и разработок в 2022 г. по ряду направлений были получены перспективные результаты, составившие основу дальнейшего развития научно-исследовательской деятельности университета (точки роста).

Вместе с тем концепция «Университет 3.0» предусматривает, что научно-исследовательская деятельность университета и ее результаты должны создавать благоприятную среду для научной деятельности преподавателей и возможности для качественно новой подготовки кадров для Индустрии 5.0. Согласно выводам исследования, проведенного узбекскими специалистами Ш. А. Рахматовым и А. Б. Низамовым, эксперты в области инновационного развития образовательных институтов полагают, что активность в сфере научно-исследовательской деятельности должна напрямую влиять на качественные свойства образовательных сред университетов. В частности, в числе основных механизмов взаимовлияния научного и образовательного кластеров университета эксперты называют следующие: влияние стремления сотрудников получить ученую степень (выполнение докторской работы) на инновационную деятельность; поддержка инновационных инициатив руководством; присутствие в сообществе людей, продвигающих инновации и предпринимательство; расширенные возможности для использования творческого потенциала; наличие четкого обоснованного плана инноваций и предпринимательства и его открытое обсуждение; корреляцию достижений преподавателей в инновационно-предпринимательской деятельности с их позицией в образовательной деятельности (повышение позиции учителя-новатора по отношению к коллегам, не использующим инновационный подход) [31].

Наша гипотеза заключается в том, что развитие университета как элемента институционального механизма новой государственной промышленной политики осуществляется в

двух основных направлениях: как «машины инноваций» (это направление реализуется через увеличение вклада университета в инновационные исследования и разработки и их внедрение в инновационную экономику) и как кузницы кадров для новой экономики; при этом существуют значимые диспропорции между двумя этими направлениями, состоящие в существенном «перекосе» в пользу научно-исследовательской деятельности и ее коммерциализации.

Для доказательства нашей гипотезы мы проанализировали динамику изменений показателей МИЭТ по основным направлениям деятель-

ности (табл. 3) и обнаружили весьма устойчивый рост части показателей научной и инновационной деятельности (количество выполненных НИОКР, полученных грантов, патентов и других зарегистрированных объектов авторских прав) при отсутствии устойчивого роста другой части показателей научной деятельности (количество научных публикаций, их цитируемости, количество защищенных диссертаций), а также показателей образовательной деятельности. Более того, по ряду направлений наблюдается устойчивое снижение анализируемых показателей.

Таблица 3

Основные показатели развития образовательной организации высшего образования НИУ МИЭТ
Key indicators of higher education organization National Research University of Electronic Technology [MIET]

Показатель	2015 г.	2018 г.	2020 г.	2021 г.	Изменения	
					за период	в среднем за год
Образовательная деятельность						
Средний балл ЕГЭ студентов, принятых по результатам ЕГЭ на обучение по очной форме по программам бакалавриата и специалитета за счет средств соответствующих бюджетов бюджетной системы РФ и с оплатой стоимости затрат на обучение физическими и юридическими лицами	72,3	77,12	80,79	78,10	+5,8	+0,83
Усредненный по реализуемым направлениям (специальностям) минимальный балл ЕГЭ студентов, принятых по результатам ЕГЭ на обучение по очной форме на программы бакалавриата и специалитета	44,76	49,61	51,68	51,72	+6,96	+0,99
Средний балл ЕГЭ студентов, принятых по результатам ЕГЭ на обучение по очной форме по программам бакалавриата и специалитета с оплатой стоимости затрат на обучение физическими и юридическими лицами	61,86	62,55	64,93	65,76	+3,9	+0,55
Численность аспирантов (адъюнктов), ординаторов, ассистентов-стажеров образовательной организации в расчете на 100 студентов (приведенного контингента)	5,91	4,63	4,09	3,86	−2,05	-0,29
Дополнительный показатель: численность сотрудников, из числа профессорско-преподавательского состава (приведенных к доле ставки), имеющих ученые степени кандидата или доктора наук, в расчете на 100 студентов	5,7	5,5	5,36	4,86	−0,84	−0,12
Научно-исследовательская деятельность						
Общий объем НИОКР	1 289 322,20	1 250 313,20	760 493,80	745 831,70	+543 491	+77 641,5
Объем НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника, за исключением ППС из числа работников предприятий и организаций (кроме образовательных), привлеченных к образовательной деятельности	2706,10	3493,18	2574,75	1 887,94	−818,06	+116,85

Показатель	2015 г.	2018 г.	2020 г.	2021 г.	Изменения	
					за период	в среднем за год
Удельный вес НИОКР, выполненных собственными силами (без привлечения соисполнителей), в общих доходах образовательной организации от НИОКР, %	74,62	72,95	80,53	90,78	+16,16	+2,3
Количество лицензионных соглашений, ед.	3	11	33	28	+25	+3,57
Число публикаций организации, индексируемых в информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science Core Collection, в расчете на 100 НПП	17,21	72,59	27,54	н/д	–	–
Количество цитирований публикаций, изданных за последние 5 лет, индексируемых в информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science в расчете на 100 НПП	64,85	242,11	396,38	н/д	–	–
Количество цитирований публикаций, изданных за последние 5 лет, индексируемых в Российском индексе научного цитирования в расчете на 100 НПП	76,82	622,53	804,28	1 086,44	+1 009,6	+144,23
Удельный вес научно-педагогических работников, защитивших кандидатские и докторские диссертации за отчетный период, в общей численности НПП	0,8	1,94	0,23	0,91	+0,11	+0,0157
Источник: составлено авторами по данным сайта ГИВЦ Минобрнауки (https://monitoring.miccedu.ru/iam).						

Дескриптивный анализ данных, представленных в табл. 3, позволяет обнаружить следующие тренды:

- имеет место тенденция устойчивого роста общего объема НИОКР;
- приняв, что общий объем НИОКР является влияющим показателем, обнаруживаем, что наиболее высокий уровень положительной корреляции наблюдается с такими зависимыми показателями, как количество лицензионных соглашений, удельный вес НИОКР, выполненных собственными силами, а также количество цитирований публикаций в различных базах данных;
- поскольку рост количества цитирований не коррелирует с динамикой публикационной активности (согласно данным отчета о самообследовании, размещенного на официальном сайте МИЭТ, публикационная активность научно-педагогических работников МИЭТ не растет), есть основания полагать, что рост этого показателя объясняется не только и не столько ростом авторитета ученых МИЭТ, сколько кумулятивным эффектом, который является основным фактором влияния на рост цитируемости;
- не обнаруживается влияния роста объема НИОКР на исследовательскую активность профессорско-преподавательского состава и университета в целом. В частности, такие показатели, как численность аспирантов, количество публикаций и количество защищенных канди-

датских и докторских диссертаций, не только не растут, но устойчиво снижаются.

Таким образом, анализ основных показателей позволяет подтвердить нашу гипотезу о том, что на сегодня два направления развития МИЭТ в парадигме «Университет 3.0»: научные исследования и разработки для промышленности 5.0 и научно-образовательное направление – не сбалансированы. МИЭТ успешно использует имеющийся институциональный задел, исследовательский потенциал и восполняемые ресурсы (финансирование НИОКР) для создания инновационных решений для экономики и индустрии, расширения своего присутствия в национальной науке и промышленности для их комплексного роста. В то же время относительно низкая публикационная активность преподавателей и низкая защищаемость диссертаций указывают на отсутствие у научных работников и профессорско-преподавательского состава мотивации для того, чтобы инкубировать инновационную активность в процессе работы со студентами и аспирантами. Этот вывод подтверждается и данными самообследования (анкетирования слушателей по вопросам содержания и качества учебных программ), согласно которым качеством получаемых знаний в основном или полностью удовлетворены только примерно 50 % опрошенных слушателей образовательных программ.

ВЫВОДЫ

1. Наше исследование показало, что Национальный исследовательский университет «МИЭТ» интенсивно развивается в парадигме «Университет 3.0» и действительно является элементом институционального механизма реализации основных приоритетов новой промышленной политики РФ.

2. Вместе с тем между двумя основными направлениями развития – увеличением вклада университета в инновационные исследования и разработки и их внедрением в инновационную экономику и подготовкой кадров для новой экономики – наблюдается существенный дисбаланс. Создавая инновационные решения для экономики и расширяя свое присутствие в национальной науке и промышленности, научно-исследовательский блок МИЭТ не транспортирует ресурсы, инновационные решения и энергетику инноваций в образовательное пространство. Несмотря на прилагаемые государством и научным сообществом усилия, университеты не удовлетворяют кадрового голода растущих (в первую очередь, наукоемких) – таких как электроника – отраслей промышленности.

3. На основе результатов наших исследований образовательным учреждениям может быть рекомендовано более активное привлечение промышленных партнеров к аттестации научных кадров, а также к аккредитации и реализации образовательных программ подготовки инженеров. В текущих формах и объемах (они отражены в отчетах о самообследовании университетов) это сотрудничество не приносит желаемого эффекта: промышленные предприятия микроэлектронной отрасли не выражают удовлетворенности ни количеством, ни качеством подготовки инженерных кадров (о чем свидетельствуют данные мониторингов и экспертные интервью). Крайне важно усиление практикоориентированных направлений взаимодействия университетов и промышленных предприятий (организация практик и стажировок для студентов, повышение квалификации преподавателей, проведение совместных прикладных исследований для решения текущих производственных задач, привлечение работников предприятий к работе базовых кафедр, совместная аттестация и переаттестация кадров). Усиление партнерства государства, бизнеса и университетов предполагается концепцией тройной спирали инноваций. Со стороны университетов также должны быть предприняты необходимые шаги по перераспределению ресурсов; причем функция и задача подготовки

кадров для новой индустриализации должна снова стать приоритетными.

Финансирование работы: работа выполнена в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2023-0015).

ЛИТЕРАТУРА

1. Chiaroni, D. The open innovation journey: How firms dynamically implement the emerging innovation management paradigm / D. Chiaroni, V. Chiesa, F. Frattini // *Technovation*. 2011. Vol. 31, No 1. P. 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.08.007>.
2. Dahlander, L. How open is innovation? / L. Dahlander, D. M. Gann // *Research Policy*. 2010. Vol. 39, No 6. P. 699–709. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.013>.
3. Ferrary, M. Specialized organizations and ambidextrous clusters in the open innovation paradigm / M. Ferrary // *European Management Journal*. 2011. Vol. 29, Iss. 3. P. 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2010.10.007>.
4. Lichtenthaler, U. Technology Exploitation in the Context of open innovation: Finding the Right ‘Job’ for Your Technology / U. Lichtenthaler // *Technovation*. 2010. Vol. 30, Iss. 7–8. P. 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2010.04.001>.
5. Сахапов, Р. Л. Новые приоритеты промышленной политики и смена парадигмы инженерного образования / Р. Л. Сахапов, С. Г. Абсалямова // *Известия КГАСУ*. 2015. № 3 (33). С. 221–229.
6. Идрисов, Г. И. Промышленная политика России в современных условиях / Г. И. Идрисов. М.: Ин-т имени Е. Т. Гайдара, 2016. 160 с. (Научные труды / Фонд «Институт экономической политики имени Е. Т. Гайдара»; № 169Р).
7. Новая промышленная политика России в контексте обеспечения технологической независимости / отв. ред. Е. Б. Ленчук. СПб.: Алетей, 2016. 334 с.
8. Анимца, Е. Г. Импортзамещение в промышленном производстве региона: концептуально-теоретические и прикладные аспекты / Е. Г. Анимца, П. Е. Анимца, А. А. Глумов // *Экономика региона*. 2015. № 3 (43). С. 160–172. <https://doi.org/10.17059/2015-3-14>.
9. Иноземцев, В. Л. Пределы «догоняющего» развития / В. Л. Иноземцев. М.: Экономика, 2000. 295 с.
10. Косенко, С. Г. Проблемы импортзамещения: региональный аспект / С. Г. Косенко, Е. Н. Поличкина // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2–8. С. 1744–1750.
11. Куклин, А. А. Экономическая безопасность регионов: теоретико-методологические подходы и сравнительный анализ / А. А. Куклин // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 6–1. С. 142–145.
12. Суворова, А. П. Формирование инновационной среды как условие обеспечения научно-технологической безопасности России / А. П. Суворова // *Россия: тенденции и перспективы развития: ежегодник: материалы XXI Нац. науч. конф. с междунар. участием* / отв. ред. В. И. Герасимов. М.: ИНИОН РАН, 2022. Вып. 17. Ч. 1. С. 731–736.
13. Ленчук, Е. Б. Национальная технологическая инициатива как фактор противостояния стратегическим угрозам и вызовам технологической безопасности России / Е. Б. Ленчук // *Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Нижний Новгород: НГТУ имени Р. Е. Алексеева*, 2015. С. 47–54.

14. Уразаева, Л. Ю. Математическое моделирование импортозамещения [Электронный ресурс] / Л. Ю. Уразаева, И. А. Галимов // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 3. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/07ECVN322.pdf>. Дата доступа: 19.10.2023.
15. Суворова, А. П. Формирование мониторинга научно-технологического развития как фактора угроз социально-экономической безопасности Российской Федерации / А. П. Суворова, Н. Ю. Судакова // Инновационное развитие экономики. 2020. № 6 (60). С. 358–370.
16. Ладынин, А. И. Система индикаторов научно-технологической безопасности России / А. И. Ладынин // Мир экономики и управления. 2022. Т. 22, № 2. С. 23–35. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2022-22-2-23-35>.
17. Перспективы реализации концепции «Университет 3.0» в белорусской высшей школе / О. В. Авдейчик [и др.] // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2023. № 207. С. 107–119. <https://doi.org/10.33910/1992-6464-2023-207-107-119>.
18. Нариманова, О. В. Концепция Университет 3.0: перспективы реализации в России в условиях новой технологической революции [Электронный ресурс] / О. В. Нариманова // Личность в меняющемся мире: здоровье, адаптация, развитие. 2019. Т. 7, № 2 (25). Режим доступа: <http://humjournal.rzgm.ru/art&id=377>. <https://doi.org/10.23888/humJ20192350-363>.
19. Самарцев, С. Б. Рефлексия парадигмы непрерывного образования в университете 3.0 / С. Б. Самарцев // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. № 2 (67). С. 113–122. https://doi.org/10.53078/20778481_2020_2_113.
20. University 3.0: A Portfolio Approach to Technology R&D Management / D. Katalevsky [et al.] // Foresight and STI Governance. 2022. Vol. 16, № 2. С. 15–30. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2022.2.15.30>.
21. Exploring Innovation Ecosystems Across Science, Technology, and Business: A case of 3D printing in China / G. Xu [et al.] // Technological Forecasting and Social Change. 2018. Vol. 136. P. 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.030>.
22. Заседание Совета по науке и образованию, 23 июня 2014 г. [Электронный ресурс] // Президент России: официальный сайт. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/news/45962>. Дата доступа: 16.09.2023.
23. Lin, J. Y. Shifting Patterns of Economic growth and Rethinking Development / J. Y. Lin, D. Rosenblatt // Journal of Economic Policy Reform. 2012. Vol. 15, Iss. 3. P. 171–194. <https://doi.org/10.1080/17487870.2012.700565>.
24. Atkinson, R. The case for a National Industrial Strategy to Counter China's Technological Rise [Electronic Resource] / R. D. Atkinson // Information Technology & Innovation Foundation. 2020, 13 April. Mode of access: <https://itif.org/publications/2020/04/13/case-national-industrial-strategy-counter-chinas-technological-rise/>. Date of access: 19.10.2023.
25. Coe, D. T. International R&D Spillovers and Institutions / D. T. Coe, E. Helpman, A. W. Hoffmaister // European Economic Review. 2009. Vol. 53, Iss. 7. P. 723–741. <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2009.02.005>.
26. Döring, Th. What do we Know About Geographical knowledge Spillovers And Regional Growth?: A Survey of the Literature / Th. Döring, J. Schnellenbach // Regional Studies. 2006. Vol. 40, Iss. 3. P. 375–395. <https://doi.org/10.1080/00343400600632739>.
27. Franco, C. On Indirect Trade-Related R&D Spillovers: The “Average Propagation Length” of Foreign R&D / C. Franco, S. Montresor, G. V. Marzetti // Structural Change and Economic Dynamics. 2011. Vol. 22, Iss. 3. P. 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2011.04.003>.
28. Dahlander, L. How open is innovation? / L. Dahlander, D. M. Gann // Research Policy. 2010. Vol. 39, Iss. 6. P. 699–709. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.013>.
29. Добрынина, М. В. Инженерное образование как инструмент новой индустриализации: целевой прием в инженерные вузы РФ / М. В. Добрынина // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2020. № 1 (25). С. 130–135. <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2020-1-130-135>.
30. Higher Education Systems 3.0: Harnessing Systemness, Delivering Performance / eds: J. E. Lane, D. B. Johnstone. New York: SUNY Press, 2013. 335 p.
31. Rakhmatov, Sh. A. Principal Components of Implementation of “University-3.0” Transformation in the Development of Innovative-Entrepreneurial Activities of Modern Higher Educational Institutions / Sh. A. Rakhmatov, A. B. Nizamov // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1691. Art. ID: 012231. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012231>.
32. Отчеты о результатах опросов обучающихся, преподавателей и работодателей об уровне удовлетворенности условиям, организацией, содержанием и качеством образовательной деятельности в рамках реализации образовательных программ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.miet.ru/upload/content/DROP/samoobsledovanie_final_20_23.pdf.

Поступила 26.10.2023

Подписана к печати 27.12.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Chiaroni D., Chiesa V., Frattini F. (2011) The Open Innovation Journey: How Firms Dynamically Implement the Emerging Innovation Management Paradigm. *Technovation*, 31 (1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.08.007>.
2. Dahlander L., Gann D. M. (2010) How open is innovation? *Research Policy*, 39 (6), 699–709. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.013>.
3. Ferrary M. (2011) Specialized Organizations and Ambidextrous Clusters in the Open Innovation Paradigm. *European Management Journal*, 29 (3), 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2010.10.007>.
4. Lichtenthaler U. (2010) Technology Exploitation in the Context of Open Innovation: Finding the Right ‘Job’ for Your Technology. *Technovation*, 30 (7–8), 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2010.04.001>.
5. Sakhapov R. L., Absalyamova S. G. (2015) New Priorities of Industrial Policy and Paradigm Shift in Engineering Education. *Izvestiya KGASU = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, (3), 221–229. (in Russian).
6. Idrisov G. I. (2016) *Industrial policy of Russia in Modern Conditions*. Moscow, Publishing House of Institute of Economic Policy named after E. T. Gaidar. 160 (in Russian).
7. Lenchuk E. B. (ed.) (2016) *New Industrial Policy of Russia in the Context of Ensuring Technological Independence*. Saint Petersburg, Aleteya Publ. 334 (in Russian).
8. Animitsa E. G., Animitsa P. E., Glumov A. A. (2015) Import Substitution in Industrial Production of the Region: Conceptual, Theoretical and Applied Aspects. *Ekonomika Regiona = Economy of Regions*, (3), 160–172. <https://doi.org/10.17059/2015-3-14> (in Russian).

9. Inozemtsev V. L. (2000) *Limits of "Catch-Up" Development*. Moscow, Ekonomika Publ. 295 (in Russian).
10. Kosenko S. G., Polichkina E. N. (2015) Problems of Import Substitution: Regional Aspect. *Fundamentalnye Issledovaniya = Fundamental Research*, (2–8), 1744–1750 (in Russian).
11. Kuklin A. A. (2014) Economic Security of Regions: Theoretical and Methodological Approaches and Comparative Analysis. *Fundamentalnye Issledovaniya = Fundamental Research*, (6–1), 142–145 (in Russian).
12. Suvorova A. P. (2022) Formation of Innovative Environment as Condition for Ensuring Scientific and Technological Security of Russia. *Rossiia: Tendentsii i Perspektivy Razvitiya: Ezhegodnik: Materialy XXI Nats. Nauch. Konf. s Mezhdunar. Uchastiem* [Russia: Trends and Development Prospects: Yearbook: Proceedings of the 21st National Scientific Conference with International Participation]. Moscow, Publishing House of Institute of Scientific Information for Social Sciences of the Russian Academy of Sciences, Is. 17, Part 1, 731–736 (in Russian).
13. Lenchuk E. B. (2015) National Technology Initiative as Factor in Countering Strategic Threats and Challenges to Russia's Technological Security. *Ekonomicheskaya Bezopasnost' Rossii: Problemy i Perspektivy: Materialy III Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Economic Security of Russia: Problems and Prospects: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference]. Nizhny Novgorod, Publishing House of Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, 47–54 (in Russian).
14. Urazzaeva L. Yu., Galimov I. A. (2022) Mathematical Modeling of Import Substitution. *Vestnik Evraziiskoi Nauki = The Eurasian Scientific Journal*, 14 (3). Available at: <https://esj.today/PDF/07ECVN322.pdf> (accessed 19 October 2023) (in Russian).
15. Suvorova A. P., Sudakova N. Yu. (2020) Formation of Monitoring of Scientific and Technological Development as a Factor of Threats to the Socio-Economic Security of the Russian Federation. *Innovatsionnoe Razvitie Ekonomiki = Innovative Development of Economy*, (6), 358–370 (in Russian).
16. Ladynin A. I. (2022) Russia's Scientific and Technological Security Indicators System. *Mir Ekonomiki i Upravleniya = World of Economics and Management*, 22 (2), 23–35. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2022-22-2-23-35> (in Russian).
17. Avdeychik O. V., Struk V. A., Antonov A. S., Goldade V. A. (2023) The Prospects of the Implementation of the University 3.0 Concept in Belarusian Higher Education. *Izvestiya RGPU im. A. I. Gertsena. Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*, (207), 107–119. <https://doi.org/10.33910/1992-6464-2023-207-107-119> (in Russian).
18. Narimanova O. V. (2019) University 3.0 Concept: Prospects for Implementation in Russia under the Conditions of a New Technological Revolution. *Personality in a Changing World: Health, Adaptation, Development: a Network Journ*, 7 (2). Available at: <http://humjournal.rzgm.ru/art&id=377>. <https://doi.org/10.23888/humJ20192350-363> (in Russian).
19. Samartsev S. B. (2020) Reflections on the Paradigm of Continuing Education at University 3.0. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (2), 113–122. https://doi.org/10.53078/20778481_2020_2_113 (in Russian).
20. Katalevsky D., Kosmodemyanskaya N., Arutyunyan A., Fortin K. (2022) University 3.0: A Portfolio Approach to Technology R&D Management. *Foresight and STI Governance*, 16 (2), 15–30. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2022.2.15.30>.
21. Xu G., Wu Y., Minshall T., Zhou Y. (2018) Exploring Innovation Ecosystems Across Science, Technology, and Business: A Case of 3D printing in China. *Technological Forecasting and Social Change*, 136, 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.030>.
22. Meeting of the Council for Science and Education, June 23, 2014. *President of Russia: Official Website*. Available at: <http://www.kremlin.ru/news/45962> (accessed 16 September 2023) (in Russian).
23. Lin J. Y., Rosenblatt D. (2012) Shifting Patterns of Economic Growth and Rethinking Development. *Journal of Economic Policy Reform*, 15 (3), 171–194. <https://doi.org/10.1080/17487870.2012.700565>.
24. Atkinson R. (2020, 13 April) The case for a National Industrial Strategy to counter China's Technological Rise. *Information Technology & Innovation Foundation*. Available at: <https://itif.org/publications/2020/04/13/case-national-industrial-strategy-counter-chinas-technological-rise/> (accessed 19 October 2023).
25. Coe D. T., Helpman E., Hoffmaister A. W. (2009) International R&D Spillovers and Institutions. *European Economic Review*, 53 (7), 723–741. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2009.02.005>.
26. Döring Th., Schnellenbach J. (2006) What do we Know About Geographical Knowledge Spillovers and Regional Growth?: A Survey of the Literature. *Regional Studies*, 40 (3), 375–395. <https://doi.org/10.1080/003434006006032739>.
27. Franco C., Montresor S., Marzetti G. V. (2011) On Indirect Trade-Related R&D Spillovers: The "Average Propagation Length" of Foreign R&D. *Structural Change and Economic Dynamics*, 22 (3), 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2011.04.003>.
28. Dahlander L., Gann D. M. (2010) How Open is Innovation? *Research Policy*, 39 (6), 699–709. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.013>.
29. Dobrynina M. V. (2020) Engineering Education as a Tool for New Industrialization: Targeted Admission to Engineering Universities of the Russian Federation. *Ekonomicheskie i Sotsial'no-Gumanitarnye Issledovaniya = Economic and Social Research*, (1), 130–135. <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2020-1-130-135> (in Russian).
30. Lane J. E., Johnstone D. B. (eds.) (2013) *Higher Education Systems 3.0: Harnessing Systemness, Delivering Performance*. New York, SUNY Press. 335.
31. Rakhmatov Sh. A., Nizamov A. B. (2020) Principal Components of Implementation of "University-3.0" Transformation in the Development of Innovative-Entrepreneurial activities of Modern Higher Educational Institutions. *Journal of Physics: Conference Series*, 1691, 012231. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012231>.
32. Reports on the Results of Surveys of Students, Teachers and Employers on the Level of Satisfaction with the Conditions, organization, Content and Quality of Educational Activities Within the Framework of Implementation of Educational Programs. Available at: https://www.miet.ru/upload/content/DROP/samoobsledovanie_final_20_23.pdf (in Russian).

Received: 26.10.2023

Accepted: 27.12.2023

Published online: 31.01.2024

Forecasting the Risk of Bankruptcy in Poorly Formalized Processes

Z. T. Gaibnazarova¹⁾, B. T. Solieva²⁾, N. A. Iminova³⁾

¹⁾University of Science and Technologies (Tashkent, Republic of Uzbekistan),

²⁾Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute under the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan (Tashkent, Republic of Uzbekistan),

³⁾Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Abstract. There is a class of complex systems characterized by dynamism, multi-link structural elements, multi-stage, multi-linked chain of processes. Moreover, each of these processes occurs under conditions of stochastic and non-stochastic uncertainty in the initial information, internal and external environment, which predetermine the uncertainty of the nature of the development of the situation. Decision-making problems in such systems are divided into two types: 1) decision-making problems under risk conditions, when uncertainty conditions are only probabilistic, stochastic in nature; 2) decision-making problems under conditions of uncertainty, when the accompanying conditions are of a non-stochastic nature, and also when the necessary reliable statistical data is unknown. In tasks of the second type, risks are manifested to a greater extent than in the first. At the same time, risk should be considered – as an object, event, phenomenon – as a formal mathematical category in accordance with its following information interpretation: risk is information uncertainty, fuzziness of the “object – subject – environment” system and its individual elements. The measure of this uncertainty determines the measure of danger, possible damage, loss from the implementation of some decision or event. The existence of risk is associated with the inability to predict the future with 100 % accuracy. Based on this, the main property of risk should be singled out: risk occurs only in relation to the future and is inextricably linked with forecasting, and therefore with decision-making in general (the word “risk” literally means “making a decision”, the result of which is unknown). Following the above, it is also worth noting that the categories “risk” and “uncertainty” are closely related and are often used as synonyms. In conditions when the initial factors are given in the form of fuzzy characteristics, other approaches based on the intelligent technologies of Soft Computing are widely used for forecasting. When evaluating alternative decision-making options for risk assessment under uncertainty, the problem of developing fuzzy models based on fuzzy inference rules arises. But there is no universal method for constructing fuzzy evaluation models. The advantage of fuzzy logic lies in the possibility of using expert knowledge about a given object in the form of if “inputs”, then “outputs”. In the paper a bankruptcy risk model is developed in poorly formalized processes for the purpose of forecasting.

Keywords: risk level, risk classification, decision-maker, fuzzy Sugeno model, indicators, finance, risk level knowledge base, Soft Computing

For citation: Gaibnazarova Z. T., Solieva B. T., Iminova N. A. (2024) Forecasting the Risk of Bankruptcy in Poorly Formalized Processes. *Science and Technique*. 23 (1), 80–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-80-86>

Прогнозирование риска банкротства в слабо формализованных процессах

Докт. экон. наук, проф. З. Т. Гаибназарова¹⁾, канд. техн. наук Б. Т. Солиева²⁾,
канд. экон. наук, доц. Н. А. Иминова³⁾

¹⁾Университет науки и технологий (Ташкент, Республика Узбекистан),

²⁾Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта при Министерстве по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан (Ташкент, Республика Узбекистан),

³⁾Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми (Ташкент, Республика Узбекистан)

Реферат. Существует класс сложных систем, характеризующийся динамичностью, многозвенностью структурных элементов, многостадийностью многосвязной цепочки процессов. Причем каждый из этих процессов происходит

Адрес для переписки

Гаибназарова Зумрат Талатовна
Университет науки и технологий
ул. Дийдар, 71,
100208, г. Ташкент, Республика Узбекистан
Тел.: +998 99 444-11-77
zumrat59@rambler.ru

Address for correspondence

Gaibnazarova Zumrat T.
University of science and technologies
71, Diydar str.,
100208, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Тел.: +998 99 444-11-77
zumrat59@rambler.ru

в условиях стохастической и нестохастической неопределенности в исходной информации, внутренней и внешней среде, которые предопределяют неопределенность характера развития ситуации. Задачи принятия решений в таких системах разделяют на два типа: 1) задачи принятия решений в условиях риска, когда условия неопределенности носят только вероятностный, стохастический характер; 2) задачи принятия решений в условиях неопределенности, когда сопровождаемые условия имеют нестохастическую природу, а также когда необходимый доверительный статистический материал неизвестен. В задачах второго типа риски проявляются в более значительной степени, чем в первых. При этом следует рассматривать риск как объект, событие, явление – в качестве формальной математической категории в соответствии со следующей ее информационной интерпретацией: риск – это информационная неопределенность, нечеткость системы «объект – субъект – среда» и ее отдельных элементов. Мера этой неопределенности определяет меру опасности, возможного ущерба, проигрыша от реализации какого-то решения или события. Существование риска связано с невозможностью с точностью до 100 % прогнозировать будущее. Исходя из этого следует выделить основное свойство риска: риск имеет место только по отношению к будущему и неразрывно связан с прогнозированием, а значит, и с принятием решений вообще (слово «риск» в буквальном переводе означает «принятие решения», результат которого неизвестен). Следуя вышесказанному, стоит также отметить, что категории риск и неопределенность тесно связаны между собой и зачастую употребляются как синонимы. В условиях, когда исходные факторы задаются в виде нечетких характеристик, для прогнозирования широко используются другие подходы, основанные на интеллектуальных технологиях мягких вычислений. При оценке альтернативных вариантов принятия решений для оценки рисков в условиях неопределенности возникает проблема разработки нечетких моделей, основанных на правилах нечеткого вывода. Но универсального метода построения нечетких оценочных моделей не существует. Преимущество нечеткой логики заключается в возможности использования экспертных знаний о данном объекте в виде «если «входы», то «выходы»». В статье разработана модель риска банкротства в слабо формализованных процессах с целью прогнозирования.

Ключевые слова: уровень риска; классификация рисков; лицо, принимающее решение; нечеткая модель Сугено; индикаторы; финансы; база знаний риска; мягкие вычисления

Для цитирования: Гаибназарова З. Т. Прогнозирование риска банкротства в слабо формализованных процессах / З. Т. Гаибназарова, Б. Т. Солиева, Н. А. Иминова // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 80–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-80-86>

Introduction

For complex processes characterized by uncertainty (inaccuracy, non-stochasticity, incompleteness, fuzziness) in the initial information and situations of the external and internal environment, it is usually not possible to build simple adequate mathematical models. Information about the parameters of such processes is expressed by experts in the form of words and sentences, i.e. in linguistic form. In such cases, it is advisable to use modeling, decision-making and control systems that use the tools of soft computing technology (Soft Computing) [1, 2].

Risk is understood as the possible danger of losses arising from the specifics of certain natural phenomena and activities of human society. The risk can be managed, that is, various measures can be used to predict the occurrence of a risk event to a certain extent and take measures to reduce the degree of risk [3, 4].

Risks have a very big impact on people's behavior. Therefore, their analysis can help in explaining certain actions performed by certain subjects. It should be borne in mind that it is practically impossible to take into account all risk fac-

tors, so the assessment is based on certain assumptions, and the result is approximate to a certain extent. However, this does not diminish the importance of developing an appropriate risk strategy.

The development of a risk strategy goes through a number of successive stages, among which are:

1. Risk classification.
2. Identification of factors that increase and decrease a specific type of risk.
3. Analysis of the identified factors in terms of the strength of the impact on the risk.
4. Assessment of a specific type of risk.
5. Establishment of the optimal level of risk.
6. Analysis of individual operations in terms of compliance with an acceptable level of risk.
7. Development of risk reduction measures.

The effectiveness of the organization of risk management is largely determined by the classification of risk. Risk classification should be understood as the distribution of risk into specific groups according to certain characteristics in order to achieve the set goals [11, 12]. Scientifically based risk classification allows you to clearly determine the place of each risk in their overall system. It creates opportunities for the effective application

of appropriate methods, risk management techniques.

In conditions when the initial factors are given in the form of fuzzy characteristics, other approaches based on the intelligent technologies of Soft Computing are widely used for forecasting [5, 6, 16–21]. When evaluating alternative decision-making options for risk assessment under uncertainty, the problem arises of developing fuzzy models based on fuzzy inference rules. But there is no universal method for constructing fuzzy evaluation models. The advantage of fuzzy logic lies in the possibility of using expert knowledge about a given object in the form of “if “inputs”, then “outputs” [22–29].

Formulation of the problem

Successful analysis of the risk of bankruptcy of the enterprise can be carried out only on the basis of the following basic conditions [12–14]:

1. The analysis is based on the results of the longest possible monitoring of the enterprise.

2. The forms of accounting used in the analysis should accurately reflect the actual financial condition of the enterprise.

3. For the purposes of the analysis, only the indicators that are most important in terms of their relevance to the bankruptcy of the enterprise are used. This is possible only when the DM assesses not only the financial condition of the enterprise, but also its position in the industry.

4. The analyst must have appropriate bankruptcy statistics, which must be verified in terms of industry, country and period under review.

All of the above shows that a given expert-analyst needs to form an idea of what is “good” and “bad” within the scope of the industry to which the enterprise belongs.

Classical probability is a characteristic sign of a general set of events, not of an individual object or event. By looking at a separate entity, we describe its relationship to the whole group on a probabilistic basis. But the uniqueness of any type of enterprise is that it can be viable even when it has very weak capabilities, and vice versa. The uniqueness of the destiny of the enterprise encourages the researcher to look carefully at the enterprise, not to use the “same pattern”, but to find its specific side, not to look for similarities, but to look for and de-

scribe different aspects. There is no place for statistical probability in such an approach. The researcher feels this inwardly and shifts the main emphasis from predicting bankruptcy to recognizing a situation that separates the enterprise from the bankrupt.

It will be necessary for experts to distinguish a number of separate financial indicators. It can be said about the experts that it best describes the specific aspects of the enterprise’s activities and describes a number of completed sets that give a complete picture of the purpose of the enterprise. Conducting a selection of indicators using his long-standing experience for analysis is highly effective. There are no two companies that have the same good approach to the same indicators. Or more precisely: the importance of different indicators for this or that enterprise will vary. Therefore, the expert is faced with the difficult task of selecting and differentiating analytical factors. It is possible to analyze the hierarchy of indicators classified by groups (financial stagnation, liquidity, profitability, etc.), but in normal cases they form a chaotic set.

Therefore, in this and subsequent cases, the growth of each X_i indicator is associated with a decrease in the risk of bankruptcy and an improvement in the situation of the enterprise under consideration. If the opposite idea is used for a given indicator, the analysis will need to replace it with other indicators. For example, it is preferable to replace the ratio of cash in the assets of the enterprise with the ratio of the share of private funds in assets.

For each indicator X_i , we adjust the significance level r_i settings for its analysis. To assess this level, all indicators should be placed in descending order of significance, in the following order:

$$r_1 \geq r_2 \geq \dots r_N. \quad (1)$$

If the system of indicators is structured in descending order of their significance, then the significance r_i of the i -indicator can be determined according to Fishbern's rule [15]:

$$r_i = \frac{2(N-i+1)}{(N-1)N}. \quad (2)$$

Fishbern's rule reflects the fact that nothing is known about the significance of indicators other than (1). In that case, the estimate (2) corresponds to the maximum value of the entropy of the uncertainty of the information available about the object under study.

If all indicators are of equal significance (a system with equal advantage), then Table 1.

Table 1

Risk level knowledge base

Name of indicators	Risk level		
	low	average	high
X_1	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}
X_2	λ_{21}	λ_{22}	λ_{23}
...	...	...	...
X_N	λ_{N1}	λ_{N2}	λ_{N3}

Here is an approach that transforms an expert into quantitative assessments that allow him to best express own fuzzy assumptions with the help of words. If the expert knows the enterprise from the inside, it will not be difficult to identify the factors that affect the processes of insolvency (including management errors), to adjust the quantitative indicators to these factors and to normalize them. One of the existing approaches to solving this problem is to use fuzzy mathematical methods.

Development of Bankruptcy Risk Model

It is assumed that the following are known: 1) (X_r, y_r) selected experimental data, $r = \overline{1, M}$, where $X_r = (x_{r,1}, x_{r,2}, \dots, x_{r,n})$ – input n -dimensional vector, and y_r – the output vector corresponding to it; 2) Takagi-Sugeno rules of the fuzzy knowledge base [7, 9, 31]:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} - w_{jp} \text{ with weight } \right) \rightarrow \quad (3)$$

$$\rightarrow y = b_{j,0} + b_{j,1}x_1 + b_{j,2}x_2 + \dots + b_{j,n}x_n, \quad j = \overline{1, m},$$

$$B = (b_{1,0}, b_{2,0}, \dots, b_{m,0}, b_{1,1},$$

$$b_{2,1}, \dots, b_{m,1}, \dots, b_{1,n}, b_{2,n}, \dots, b_{m,n})^T$$

it is necessary to find such values of the coefficients of the rule conclusions that they provide a minimum of squared non-binding:

$$\sum_{r=1, M} (y_r - y_r^f)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

where $y_r^f - (X_r)$ is the output of the inputs in the r -row of the selection on the B parameter fuzzy knowledge base.

The following fuzzy output corresponds to the input vector $X_r = (x_{r,1}, x_{r,2}, \dots, x_{r,n})$:

$$y_r^f = \frac{\sum_{j=1, m} \mu_{d_j}(X_r) d_j}{\sum_{j=1, m} \mu_{d_j}(X_r)}, \quad (5)$$

where $d_j \equiv b_{j,0} + \sum_{i=1, n} b_{j,i} x_{r,i}$ – the output of the j -rule.

The degree of execution of the conclusion of the $\mu_{d_j}(X_r) = \bigvee_{p=1, k_j} w_{jp} \cdot \bigwedge_{i=1, n} [\mu_{jp}(x_{r,i})]$ – j rule.

The relative degree of execution of the j -rule conclusion is defined for the input vector

$$\beta_{j,r} = \frac{\mu_{d_j}(X_r)}{\sum_{k=1, m} \mu_{d_k}(X_r)} \text{ by } Z.$$

In this case, (5) can be rewritten as follows:

$$y_r^f = \sum_{j=1, m} \beta_{j,r} d_j = \sum_{j=1, m} \left(\beta_{j,r} b_{j,0} + \beta_{j,r} b_{j,1} x_{r,1} + \dots + \beta_{j,r} b_{j,n} x_{r,n} \right).$$

Here the following definitions are entered:

$$Y^f = (y_1^f, y_2^f, \dots, y_M^f)^T;$$

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} \beta_{1,1}, \dots, \beta_{1,m}, & x_{1,1}\beta_{1,1}, \dots, x_{1,1}\beta_{1,m}, \\ & \dots, x_{1,n}\beta_{1,1}, \dots, x_{1,n}\beta_{1,m}, \\ \vdots & \\ \beta_{M,1}, \dots, \beta_{M,m}, & x_{M,1}\beta_{1,1}, \dots, x_{M,1}\beta_{1,m}, \\ & \dots, x_{M,n}\beta_{M,1}, \dots, x_{M,n}\beta_{M,m}. \end{bmatrix}$$

In this case, the problem (4) is written in the form of a matrix in the following form: so that the vector B is found, the condition is satisfied.

$$E = (Y - Y^f)^T \cdot (Y - Y^f) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Here $Y^f = AB$.

The minimum value of quadratic E is obtained at $Y^f = Y$, which corresponds to the solution of the following equation:

$$Y = AB. \quad (7)$$

The number of parameters to be adjusted for real problems is smaller than the size of the data sample, so equation (7) does not have a definite solution. In this case, the solution of the problem can be found using the nickname inversion of the matrix A :

$$B = (A^T A)^{-1} A^T Y. \quad (8)$$

The problems of finding the solution of (8) are related to the probability singularity of the matrix.

Computing experiment

Following the results of the work of the enterprise "AB" in the III and IV quarters, it is required to build a fuzzy linear model of bankruptcy risk.

1. The financial condition of the enterprise "AB" is characterized by the following financial indicators (Table 2).

Table 2

X_i Indicator code	Name of X_i indicator	Value of X_i in the 1st period (xI, i)	Value of X_i in the 2 nd period (xII, i) _i
X_1	Autonomy coefficient (coefficient of private capital to the foreign exchange balance)	0.839	0.822
X_2	Coefficient of working capital to private equity (coefficient of net working capital to current assets)	0.001	-0.060
X_3	Intermediate liquidity coefficient (ratio of total cash and receivables to current liabilities)	0.348	0.208
X_4	Absolute liquidity coeffi- cient (coefficient of total cash to short-term liabili- ties)	0.001	0.0001
X_5	Annual turnover of all assets (coefficient of sales revenue to the average value of assets for the period)	0.162	0.221
X_6	Return on total capital (coefficient of net profit to the average value of assets for the period)	-0.04	-0.043

Also, the risk levels are $r_1 = 0,709$ and $r_2 = 0,713$.

2. Divide the current values of x into classes according to the criteria in Table 1. The results of the classification are presented in Table 3.

Table 3

X_i Indi- cator	Value of $\{\lambda\}$ in period I			Value of $\{\lambda\}$ in period II		
	$\lambda_1(x_{1,i})$	$\lambda_2(x_{1,i})$	$\lambda_3(x_{1,i})$	$\lambda_1(x_{1,i})$	$\lambda_2(x_{1,i})$	$\lambda_3(x_{1,i})$
X_1	0,200	0,500	1	0,2	0,500	1
X_2	0,920	0,548	0,483	1	0,500	0,200
X_3	0,562	0,098	0,444	0,73	0,866	0,340
X_4	0,920	0,995	0,469	0,982	0,536	0,223
X_5	0,826	0,772	0,296	0,711	0,759	0,423
X_6	1	0,500	0,500	0,985	0,510	0,337

Based on the above formulas, the following quantities were determined:

$$\beta_{11} = 0,512; \beta_{12} = 0,483; \beta_{21} = 0,487; \beta_{22} = 0,586.$$

General form of the linear model of the enterprise bankruptcy risk is as follows:

$$r_1 = b_{10} - b_{11} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_1^{1j}) x_1^{1j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_1^{1j})} - b_{12} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_2^{1j}) x_2^{1j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_2^{1j})} -$$

$$- b_{13} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_3^{1j}) x_3^{1j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_3^{1j})} - b_{14} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_4^{1j}) x_4^{1j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_4^{1j})} -$$

$$- b_{15} \frac{\sum_{j=1}^n \mu^j(x_5^1) x_5^1}{\sum_{j=1}^n \mu^j(x_5^1)} - b_{16} \frac{\sum_{j=1}^n \mu^j(x_6^1) x_6^1}{\sum_{j=1}^n \mu^j(x_6^1)};$$

$$r_2 = b_{20} - b_{21} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_1^{2j}) x_1^{2j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_1^{2j})} - b_{22} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_2^{2j}) x_2^{2j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_2^{2j})} -$$

$$- b_{23} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_3^{2j}) x_3^{2j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_3^{2j})} - b_{24} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_4^{2j}) x_4^{2j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_4^{2j})} -$$

$$- b_{25} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_5^{2j}) x_5^{2j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_5^{2j})} - b_{26} \frac{\sum_{j=1}^n \mu(x_6^{2j}) x_6^{2j}}{\sum_{j=1}^n \mu(x_6^{2j})}.$$

CONCLUSION

A bankruptcy event can include not only financial but also other parties in its list of causes, which can be expressed in both quantitative and qualitative terms. Systems of bankruptcy risk diagnosis have been established that are used simultaneously with speculative considerations of quantifiable factors that can be accurately measured.

We believe that the construction of such a system of risk assessment with modeling based on the combination of “Soft Computing” – technologies: fuzzy sets, neural networks and genetic algorithms, theory of bipolar nonlinear sets will be carried out in the near future.

REFERENCES

1. Zadeh L. A. (1976) *The Concept of linguistic Variable and its Application to the Adoption of Approximate Solutions*. Moscow, Mir Publ. 165 (in Russian).
2. Altunin A. E., Semukhin M. V. (2000) *Models and Algorithms for Making Decisions in Fuzzy Conditions*. Tyumen, Publishing House of the Tyumen State University. 352 (in Russian).
3. Knopov P. S., Maryanovich T. P. (2003) On Some Topical Problems of Assessing the Risk of Complex Systems Under Conditions of Insufficient Information. *Cybernetics and System Analysis*, (4), 125–137 (in Russian).
4. Solieva B. T. (2011) *Models and Algorithms of Risk Assessment Based on Fuzzy Data Processing*. Dissertation. Available at: <http://diss.natlib.uz/ru-RU/Search/Query?Query=%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D0%B0> (in Uzbek).
5. Mukhamedieva D. T., Solieva B. T. (2007) Creation of a Fuzzy Inference System Using a Fuzzy Knowledge Base. *Bulletin of Tashkent State Technical University*, (1), 25–29 (in Uzbek).
6. Nedosekin A. O. (2002) *Fuzzy-Multiple Risk Analysis of Stock Investments*. St. Petersburg. 181 (in Russian).
7. Solieva B. T. (2007) The Model of Predicting the Level of risk in Decision-Making in Conditions of Uncertainty. *Cyber Questions*, (176), 161–165 (in Uzbek).
8. Bekmuratov T. F. (2008) Poorly structured Decision-Making in Problems of Management of Risks. *WCIS-2008, Tashkent, Uzbekistan, November 25–27*, 96–106.
9. Kamilov M., Muxamedieva D., Solieva B. (2021) The Problem of Classifying and Managing Risk Situations in Poorly Formed Processes. *11th World Conference “Intelligent System for Industrial Automation”*. *WCIS 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1323. Springer, Cham., 280–286, https://doi.org/10.1007/978-3-030-68004-6_36.
10. Muhamediyeva D. T., Niyozmatova N. A. (2019) Problems of Constructing Models of Intellectual Analysis of States of Weakly Formalizable Processes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1210, 012102. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1210/1/012102>.
11. Bekmuratov T. F., Mukhamedieva D. T., Bobomuradov O. J. (2010) Models of Fuzzy Criteria and Algorithm for Making Weakly Structured Decisions. *Nauka i Obrazovanie: Nauchnoe Izdanie MGTU im. Bauman* [Science and Education: Scientific Publication of MSTU Bauman], (7). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-netchetkih-kriteriev-i-algoritm-prinyatiya-slabostrukturirovannyh-resheniy> (in Russian).
12. Bokova N. (2016) The Essence of Bank Risk Management. *Sovremennyye Nauchnyye Vestnik* [Modern Scientific Herald], 5 (1), 170–176.
13. Savina Yu. I. (2012) Risk Management System at the Enterprise. *Ekonomika i Upravlenie v XXI veke: Tendentsii Razvitiya* [Economy and Management in the Xxi Century: Development Trends], (4), 186–192 (in Russian).
14. Nedosekin A. O., Maksimov O. B. (1999) A New Complex Indicator for Assessing the Financial Condition of an Enterprise. *Voprosy Analiza Riska*, (2–3). Available at: <https://masters.donntu.ru/2005/kita/sroka/library/art3.htm> (in Russian).
15. Fishbern P. (1978) *Theory of Usefulness for Decision Making*. Moscow, Nauka Publ. 352 (in Russian).
16. Primova H., Sotvoldiev D., Safarova L. (2018) Approaches to Solving the Problem of Risk Assessment with Fuzzy Initial Information. *12th International Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics 2018)*, art. No 8601485. <https://doi.org/10.1109/dynamics.2018.8601485>.
17. Gaibnazarova Z. T. (2023) Prospects for Improving the Forecasting of the Gross Domestic Product of Regions Based on Mathematical Models *2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. Samara, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ITNT57377.2023.10139074>.
18. Mukhamedieva D. T., Solieva B. T. (2008) Model of Fuzzy Knowledge Base for the Problem of Forecasting of Agricultural Productivity. *Proceeding of Fifth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation (WCIS-2008)*, 178–181.
19. Bekmuratov T. F., Solieva B. T., Primova H. A. (2016) The adaptive algorithm of Fuzzy Synthesis. *Chemical Technology. Control and Management*, (5), 110–114.
20. Bekmuratov T. F., Solieva B. T., Primova H. A. (2016) The Adaptive Algorithm of Fuzzy Synthesis. *Proceedings of Ninth World Conference “Intelligent Systems for Industrial Automation”*, *WCIS-2016, 25-27 October 2016, Tashkent, Uzbekistan*, 289–293.
21. Mukhamedieva D. T., Solieva B. T. (2016) Solving the Problem of Fuzzy Multicriteria Optimization under Risk Conditions [Oral Report]. *Twelfth International Asian School-Seminar “Problems of Optimization of Complex Systems”* Novosibirsk, Akademgorodok, December 12–16, 2016. Available at: http://conf.nsc.ru/opcs2016/ru/opcs2016_docladu.
22. Bekmuratov T. F., Solieva B. T. (2018) Construction of Fuzzy Risk Assessment Models. *Chemical Technology*,

- Control and Management*, (4-5), 24–28. <https://doi.org/10.34920/2018.4-5.24-28>.
23. Solieva B. T., Sotvoldiev D. M., Kxudayberganov A. (2018) Evaluation of a cotton in the Conditions of Fuzzy Initial Information. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.19), 374–377.
 24. Solieva B. T., Juraev Z. Tasks of Fuzzy Parametric Programming. *Problemy Optimizatsii Slozhnykh Sistem: Materialy XIV Mezhdunarodnoi Aziatskoi Shkoly-Seminara, Almaty, 20–31 Iyulya 2018 goda* [Problems of Optimization of Complex Systems. Proceedings of the XIV International Asian School Seminar, Almaty, July 20–31, 2018]. Almaty, 218–225 (in Russian).
 25. Bekmuratov T. F., Solieva B. T. Construction of Fuzzy Risk Assessment Models. *Proceedings of the Tenth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation Proceedings of WCIS-2018, 25–26 October 2018, Tashkent, Uzbekistan*. Quadrat Verlag, 30–34.
 26. Solieva B. T., Niyozmatova N. A. (2018) Development of the Algorithm of Estimation and Prediction of Risks in Weakly Formalizable Systems. *Proceedings of the Tenth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation Proceedings of WCIS-2018, 25–26 October 2018, Tashkent, Uzbekistan*. Quadrat Verlag, 194–198.
 27. Mukhamediyeva D., Solieva B. (2020) Construction of the Model of Crop Production Forecasting with Fuzzy Information. Pawar P., Ronge B., Balasubramaniam R., Vibhute A., Apte S. (eds.). *Techno-Societal 2018*. Springer, Cham., 187–196. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16848-3_18.
 28. Solieva B. T., Sotvoldiev D. M. (2019) Dialogue Algorithm of Adoption of Multi-Criterial Decisions in the Fuzzy Environment. *2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan, 2019*, 1–7.
 29. Primova X. A. (2018) *Methods and Algorithms for Solving Incorrect Problems of Constructing Fuzzy Models of Weakly Formed Processes*. Dissertation. Available at: http://diss.natlib.uz/ru-RU/Search/Query?Query=%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0&RW.Author=&RW.Title=&RW.USTSpecialtyCodeTypeId=0&RW.KNSSpecialtyCodeTypeId=&RW.KNSSpecialtyCodeId=0&RW.UDC_BBKId=&RW.Year=&RW.USTSpecialtyCodeId=0 (in Uzbek.).
 30. Muhamediyeva D. T., Urokov Sh. R. Application of Technology for Data Mining and Integration in Applied Tasks. *Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration. Materials of the International Conference, April 10, 2020. Beijing, PRC, Part. 2*, 222–226.
 31. Gaibnazarov S. B., Gaibnazarova Z. T. (2020) Study of the Synthesis of the Stabilizer SG-1 by Phosphorylation of HIPAN. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8 (9), 5472–5476. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/91892020>.
 32. Gaibnazarova Z. T., Gaibnazarov S. B. (2020) Development of Education System in the Context of World Experience and National Specificity as an Investment in Human Capital. *Journal of Critical Reviews*, 7 (12), 302–308. <https://doi.org/10.31838/jcr.07.12.57>.
 33. Raupov A. A., Gaibnazarov S. B., Aminov A. M., Nazarbekova D. K. Drilling mud for Prevention of Dispersion and Swelling of Clay Rocks of Various Genesis. *Journal of Critical Reviews*, 7 (9), 511–513. <https://doi.org/10.31838/jcr.07.09.101>.
 34. Annakulov T., Gaibnazarov S., Askarov A., Mamadiyeva, L. Prospects for the Use of cyclic-Flow Technology for the Transportation of Rocks at the Yoshlik-1 Quarry of JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine. *E3S Web of Conferences*, 2023, 414, 06007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341706007>.
 35. Annakulov T. J., Gaibnazarov S. B., Kuvandikov O. A., Otajonov F. O., Otajonov B. O. Development of a Methodology for Determining the Economic Efficiency of Cyclic-Flow Technology Schemes for Rock Mining Using Mobile Crushing and Reloading-Conveyor Complexes. *AIP Conference Proceedings*, 2022, 2432, 030115. <https://doi.org/10.1063/5.0089668>.

Received: 30.01.2023

Accepted: 14.04.2023

Published online: 31.01.2024