

НАУКА и ТЕХНИКА

**Международный
научно-технический журнал**



**Science
and Technique** V. 17, No 6
(2018)

**International
Scientific and Technical Journal**

**Серия 2. Строительство
Серия 5. Естественные науки**

**Series 2. Civil and Industrial Engineering
Series 5. Natural Sciences**

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

Published from January 2002
Publication frequency – bimonthly

Учредитель
Белорусский национальный
технический университет

Founder
Belarusian National
Technical University

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Строительство

- Веренько В. А., Ладышев А. В., Гатальский Р. К.**
Исследование усталостной долговечности
асфальтобетонных, модифицированных
полимерными добавками различных типов 451
- Босаков С. В.**
Две контактные задачи о вдавлении кольцевого
штампа в упругое полупространство 458
- Зиневич С. И.**
Конструкция плиты для сборных
дорожных покрытий 465
- Попов О. В., Попова Ю. Б., Яцынович С. В.**
Определение предельного сопротивления
дилатирующего грунта сдвигу
при помощи искусственных нейронных сетей ... 471
- Левкевич В. Е.**
Берегозащитные сооружения откосного типа
на водохранилищах Беларуси и причины
их деформаций. 478
- Лу Гопин**
Особенности планировки и застройки
научно-технологических парков
в условиях провинций Шаньси и Ганьсу
в Китайской Народной Республике 489

CONTENTS

Civil and Industrial Engineering

- Veranko V. A., Ladyshau A. V., Hatalski R. K.**
Investigation of Fatigue Life
for Asphalt Concrete Modified
by Polymer Additives of Various Types 451
- Bosakov S. V.**
Two Contact Problems for Circular
Die Pressing-In in Elastic Half Space 458
- Zinevich S. I.**
Plate Design
for Prefabricated Pavements 465
- Popov O. V., Popova Yu. B., Yatsynovich S. V.**
Determination of Limiting Resistance
for Dilatant Soil to Shearing
while Using Artificial Neural Networks 471
- Levkevich V. E.**
Slope Protection Structures at Water Reservoirs
in Belarus and Causes
of Their Deformations 478
- Lu Guoping**
Peculiarities of Planning and Building
of Scientific and Technological Parks
in Conditions of the Shanxi and Gansu Provinces
in the People's Republic of China 489

- Пшембаев М. К., Ковалев Я. Н.**
Теоретические предпосылки упрочнения
микроструктуры поверхностного слоя
дорожных бетонных покрытий
с помощью коллоидного вещества 497

- Leonovich S. N.**
Algorithm of Plastic Concrete Crack Resistance
is Calculation under Capillary Shrinkage
Using Generalizing Criteria
(Леонович С. Н.
Алгоритм расчета трещиностойкости бетона
в раннем возрасте при капиллярной усадке
по обобщенному критерию) 502

- Рутковский М. А., Шибко А. С., Галыня К. И.**
Гидравлический расчет
медных трубопроводов систем отопления
и внутреннего газоснабжения 508

Естественные науки

- Василевич Ю. В., Остриков О. М.**
Условие равновесия нетонкого винтового
клиновидного двойника, находящегося вдали
от поверхности недеформируемого кристалла 515

- Горбунова В. А., Слепнева Л. М.**
О фотокаталитической активности систем
типа диоксид титана/Fe(II, III)
в водных суспензиях 521

- Айрапетянц Г. М., Кожевников М. М.,
Ульянов Н. И.**
Моделирование динамики движения пленки
на агрегате по производству
полимерно-пленочных материалов 528

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «НАУКА И ТЕХНИКА» В 2018 г.

- Тематический указатель 534

- Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N.**
Theoretical Prerequisites
for Strengthening Micro-Structure
of Surface Layer in Road Concrete Pavement
by Colloid Material 497

- Leonovich S. N.**
Algorithm of Plastic Concrete Crack Resistance
is Calculation under Capillary Shrinkage
Using Generalizing Criteria 502

- Rutkowski M. A., Shybeka A. S., Halynia K. I.**
Hydraulic Calculation
of Copper Pipelines for Heating
and Internal Gas Supply Systems 508

Natural Sciences

- Vasilevich Yu. V., Ostrikov O. M.**
The Equilibrium Condition of a Non-Thin Screw
Wedge-Shaped Twin Located in the Distance
from the Surface of an Undeformed Crystal 515

- Gorbunova V. A., Sliapniova L. M.**
On Photocatalytic Activity
of Titanium Dioxide/Fe (II, III)-Type Systems
in Aqueous Suspensions 521

- Irapetians G. M., Kozhevnikov M. M.,
Ulianov N. I.**
Dynamics Modelling
of Film Motion at Unit for
of Polymeric Film Material Production 528

LIST OF PAPERS PUBLISHED IN "SCIENCE AND TECHNIQUE" JOURNAL IN 2018

- Thematic Index 534

**Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv**

Редакционная коллегия

- В. В. БАБИЦКИЙ** (Белорусский национальный
технический университет, Минск, Республика
Беларусь),
В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный тех-
нический университет, Минск, Республика Бе-
ларусь),
А. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт На-
циональной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь),
В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный техни-
ческий университет, Минск, Республика Бела-
русь),
С. В. БОСАКОВ (Республиканское унитарное
предприятие по строительству «Институт
БелНИИС», Минск, Республика Беларусь),
Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный
технический университет, Минск, Республика
Беларусь),

**Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev**

Editorial Board

- V. V. BABITSKY** (Belarusian National Technical Uni-
versity, Minsk, Republic of Belarus),
V. G. BASHTOVOI (Belarusian National Technical
University, Minsk, Republic of Belarus),
A. V. BYELI (Physical-Technical Institute of National
Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus),
V. P. BOYKOV (Belarusian National Technical Univer-
sity, Minsk, Republic of Belarus),
S. V. BOSAKOV (Republican Unitary Scientific-
Research Enterprise for Construction "Institute
BelNIIS", Minsk, Republic of Belarus),
Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical
University, Minsk, Republic of Belarus),

- О. Г. ДЕВОЙНО* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- К. В. ДОБРЕГО* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- П. И. ДЯЧЕК* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- М. З. ЗГУРОВСКИЙ* (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
- Р. Б. ИВУТЬ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- А. С. КАЛИНИЧЕНКО* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
- М. Г. КИСЕЛЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Я. Н. КОВАЛЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- В. В. КОЗЛОВСКИЙ* (Минский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь),
- В. М. КОНСТАНТИНОВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Н. В. КУЛЕШОВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. Н. ЛЕОНОВИЧ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. А. МАСКЕВИЧ* (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
- Э. И. МИХНЕВИЧ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- НГУЕН ТХУ НГА* (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- М. ОПЕЛЯК* (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
- O. G. DEVOINO* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- K. V. DOBREGO* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- P. I. DYACHEK* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- M. Z. ZGUROVSKY* (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),
- R. B. IVUT* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- A. S. KALINICHENKO* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
- M. G. KISELEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Ya. N. KOVALEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- V. V. KOZLOVSKIY* (Minsk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Minsk, Republic of Belarus),
- V. M. KONSTANTINOV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- N. V. KULESHOV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. N. LEONOVICH* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. A. MASKEVICH* (International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus),
- E. I. MIHNEVICH* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- NGUYEN THU NGA* (Institute of Energy Science of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Republic of Vietnam),
- M. OPELYAK* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),

О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Г. А. ПОТАЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
О. П. РЕУТ (Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики», Минск, Республика Беларусь),
Ф. А. РОМАНИУК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Л. СОЛОМАХО (Республиканский институт инновационных технологий Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь),
С. А. ЧИЖИК (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
А. Н. ЧИЧКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. К. ШЕЛЕГ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Й. ЭБЕРХАРДШТАЙНЕР (Венский технический университет, Вена, Австрия),
Б. А. ЯКИМОВИЧ (Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация)

O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
G. A. POTAEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
O. P. REUT (Branch of the BNTU "Institute of Advanced Training and Retraining for New Areas of Engineering, Technology and Economy", Minsk, Republic of Belarus),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. L. SOLOMAKHO (Republic Institute of Innovative Technologies of the Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. A. CHIZHIK (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
A. N. CHICHKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. K. SHELEG (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
J. EBERHARDSTEINER (Vienna University of Technology, Vienna, Austria),
B. A. YAKIMOVICH (M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation)

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

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

Тел. +375 17 292-65-14

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

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanchyk

Address

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

Tel. +375 17 292-65-14

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

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 27.11.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-451-457>

УДК 691.168

Исследование усталостной долговечности асфальтобетонов, модифицированных полимерными добавками различных типов

Докт. техн. наук, проф. В. А. Веренько¹⁾, инж. А. В. Ладышев¹⁾, асп. Р. К. Гатальский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье проанализировано влияние на усталостную долговечность асфальтобетонов добавок группы термоэластопласты и комплексных модификаторов на основе термопластов. Установлены закономерности поведения материалов во времени, для которых получены близкие значения физико-механических свойств при применении различных типов вяжущих и модификаторов. На основании статистических и лабораторных исследований получены теоретические параметры усталостной долговечности для материалов покрытия дорожной одежды. При проведении анализа обратились к статистическим показателям обычных и модифицированных асфальтобетонов, которые получили в процессе испытаний асфальтобетонных смесей типов С и А за период с 2010 по 2016 г. На основании статистического анализа сопоставлен индекс сопротивления пластическим деформациям $I_{пл}$ с количеством упругих связей n_y и предельной структурной прочностью R_c . Для реализации задач второго исследования выполнены 12 расчетов (№ 1–12). Вычислены расчетные характеристики асфальтобетона, необходимые для определения параметров надежности. Объектом исследования выбран нижний слой двух- или трехслойного покрытия как наиболее подверженный воздействию циклических растягивающих напряжений от транспортной нагрузки. Необходимое для вычисления значения растягивающих напряжений σ при расчетной температуре 0 °С принято на основании проведенных расчетов методом конечных элементов, где выявлено распределение напряжений по толщине конструкции 20 см от нагрузки A_2 . По полученным результатам сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: асфальтобетоны, усталостная долговечность, полимерные добавки, модификатор, термопласты, дорожная одежда

Для цитирования: Веренько, В. А. Исследование усталостной долговечности асфальтобетонов, модифицированных полимерными добавками различных типов / В. А. Веренько, А. В. Ладышев, Р. К. Гатальский // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 451–457. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-451-457>

Investigation of Fatigue Life for Asphalt Concrete Modified by Polymer Additives of Various Types

V. A. Veranko¹⁾, A. V. Ladyshau¹⁾, R. K. Hatalski¹⁾

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

Abstract. The paper has analyzed influence of additives representing a group of thermoplastic elastomers and complex thermoplast-based modifiers on fatigue life of asphalt concrete. Regularities in behavior of materials in time have been determined

Адрес для переписки

Веренько Владимир Адольфович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-93-63
pd_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Veranko Vladimir A.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-93-63
pd_ftk@bntu.by

in the paper and close values of their physical and mechanical properties have been obtained while using various types of binders and modifiers. Statistic and laboratory investigations have made it possible to obtain theoretical parameters of the fatigue life for materials used for road dressing. The analysis has been based on statistical values of ordinary and modified asphalt concrete and asphalt concrete mixes of C- and A-type obtained during the experiments for the period from 2010 till 2016. A statistic analysis has permitted to compare a parameter $I_{\text{пл}}$ (resistance index to plastic deformations) with such parameters as n_y (number of elastic constraints) and R_c (threshold structural strength). 12 calculations (Nos. 1–12) have been carried out in order to realize targets of the second investigation. Calculative characteristics of asphalt concrete required for determination of reliability parameters have been estimated in the paper. A bottom layer of two- or three-coat pavement has been selected as an object of the investigation due to the fact that it is more often subjected to an impact of cyclic tensile stresses caused by a transport load. The required value for calculation of tensile stresses σ at calculated temperature θ has been accepted on the basis of executed estimations while using finite elements method and distribution of stresses has been determined along structure with 20 cm thickness due to load A_2 . Corresponding conclusions have been made in accordance with the obtained results.

Keywords: asphalt concrete, fatigue life, polymer additives, modifier, thermoplastics, road dressing

For citation: Veranko V. A., Ladyshau A. V., Hatalski R. K. (2018) Investigation of Fatigue Life for Asphalt Concrete Modified by Polymer Additives of Various Types. *Science and Technique*. 17 (6), 451–457. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-451-457> (in Russian)

Введение

В условиях постоянного повышения интенсивности воздействий и колесной нагрузки транспортного потока при проектировании дорожных одежд все сложнее обеспечить требуемые значения надежности и долговечности материалов конструктивных слоев. В частности, асфальтобетон, приготовленный традиционным способом, в ряде случаев не может обеспечить требуемую прочность и деформативность по какому-либо критерию прочности. Для решения указанной проблемы в настоящее время в мировой и отечественной практике в асфальтобетонных смесях применяются модификаторы, которые различаются по способу введения в смесь, по своему составу и функциональному назначению.

В статье проанализировано влияние на усталостную долговечность асфальтобетонов добавок группы термоэластопластов и комплексных модификаторов на основе термопластов.

Термоэластопласты – модификаторы, улучшающие эластичность асфальтобетонов при низких температурах и вязкопластические свойства при высоких температурах [1, 2]. К данной группе относятся сополимеры стирола: СБ – стирол-бутадиеновый сополимер, СБС – стирол-бутадиен-стирольный сополимер и т. д.

Термопласты – полимерные материалы, способные обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние. К данной группе относятся: ЭВА – этиленвинилацетат, ЭМА – этиленметилакрилат, АПП – атактический полипропилен, ПЭ – полиэтилен, ПО – полиолефины [3, 4].

На основании статистических и лабораторных исследований получены теоретические параметры усталостной долговечности для материалов покрытия дорожной одежды. Особенностью данного исследования является то, что изучены параметры долговечности для асфальтобетонов, приготовленных на различных добавках, которые имеют близкие физико-механические параметры по СТБ 1033–2016 [5].

Под усталостной долговечностью асфальтобетона понимается его устойчивость на протяжении расчетного срока службы к воздействию повторных нагрузок в широком температурно-временном поле, когда материал проявляет весь комплекс реологических свойств [6–8]. Если по данному параметру долговечность не обеспечена, то на покрытии возникают усталостные деформации в виде отдельных трещин и сетки трещин, обусловленных накоплением в структуре материала повреждаемости (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид усталостных разрушений

Fig. 1. General view of fatigue failure

Основные положения теории

Для того чтобы показать зависимость усталостной долговечности асфальтобетона и оце-

нить его устойчивость к усталостным трещинам согласно гипотезе [1, 9], надо знать величину напряжения, приходящуюся на упругие связи σ_y и максимальную структурную прочность R_c . Значение σ_y определяется по формуле

$$\sigma_y = \sigma n_y, \quad (1)$$

где σ – уровень напряжения от транспортной нагрузки, зависящий от конструкции дорожной одежды и модуля упругости материала при расчетной температуре; n_y – число вовлеченных в процесс деформирования упругих связей при расчетной температуре.

В результате выполненных авторами статьи исследований установлено, что циклическая (усталостная) долговечность материала в дорожной одежде с допустимой степенью точности будет определяться эмпирической формулой вида

$$N = A \left(\frac{R_c}{\sigma n_y} \right)^m, \quad (2)$$

где A , m – эмпирические параметры, определенные экспериментально; R_c – предельная структурная прочность материала; σ – максимальное растягивающее напряжение в конструктивном слое, возникающее от действия транспортной нагрузки; n_y – параметр, характеризующий количество упругих связей, вовлеченных в процесс деформирования, определяемый по формуле:

$$n_y = \frac{E_t}{E_c} = \left(\frac{R_t}{R_c} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3)$$

E_t , R_t – модуль упругости и прочность асфальтобетона при конкретных условиях действия нагрузки и температуры, МПа; E_c , R_c – максимальное значение модуля релаксации и прочности во всем диапазоне температуры и скорости (времени) действия нагрузки, МПа; n – параметр, зависящий от свойств (типов) материала (для асфальтобетонов, применяемых в Республике Беларусь, принимается равным 0,80).

При необходимости сравнения различных материалов можно определять коэффициент запаса прочности по формуле

$$K_3 = \frac{\left(\frac{R_c^{\text{II}}}{\sigma n_y^{\text{II}}} \right)^{m^{\text{II}}}}{\left(\frac{R_c^{\text{I}}}{\sigma n_y^{\text{I}}} \right)^{m^{\text{I}}}}, \quad (4)$$

где индекс I – базовые характеристики для материалов различных слоев; индекс II – параметры исследуемого материала.

В качестве базовых характеристик для расчетов принимали среднестатистические значения параметров для немодифицированных асфальтобетонов: $n_y^{\text{I}} = 0,50$; $R_c = 4,80$ МПа.

При необходимости определения надежности и долговечности материалов конструктивных слоев в практике проектирования дорожных одежд, используя коэффициенты запаса прочности по методике ТКП 45-3.03-3–2004 [10], можно вычислить уровни надежности и расчетные сроки службы материала до разрушения.

Ход исследования

На основании предложенной методологии оценки надежности и долговечности асфальтобетонных смесей рассмотрим эффективность модификации асфальтобетонных смесей различными способами.

Исследовано, как изменяются надежность и долговечность асфальтобетонного слоя, если его устраивать из асфальтобетона одного типа и марки по СТБ 1033–2016 [5], для которого достигнут один и тот же показатель сдвигоустойчивости путем применения обычного битума, модифицирующей добавки на основе термопластов и модифицированного термоэластопластами битума. То есть необходимо установить зависимость, как может отличаться работа асфальтобетона, для которого достигнуты одинаковые физико-механические свойства согласно действующим нормативным документам, при использовании вяжущих различного типа.

Согласно изложенной в [10] методологии, можно выделить физико-механические свойства асфальтобетона, определяющие его расчетные сроки службы и уровни надежности:

φ° – угол внутреннего трения (используется в расчете по критерию сдвигоустойчивости);

C – внутреннее сцепление материала, МПа (используется в расчете по критерию сдвигоустойчивости);

R_c – предельная структурная прочность, МПа, характеризует максимальный уровень прочности материала во всем диапазоне температур и скоростей нагружения и циклическую долговечность в упругой стадии (используется в расчете по критерию устойчивости к усталостным и температурным разрушениям);

R_0 – прочность на растяжение при температуре 0 °С, МПа (используется в расчете по критерию устойчивости к температурным разрушениям);

n_y – параметр, характеризующий количество упругих связей, вовлеченных в процесс деформирования, определяемый по формуле (3) (используется в расчете по критерию устойчивости к усталостным разрушениям);

$K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, характеризует устойчивость материала к попеременному замораживанию-оттаиванию (используется в расчете по критерию устойчивости к коррозионным разрушениям).

При проведении анализа обратимся к статистическим показателям обычных и модифицированных асфальтобетонов, которые были получены при испытаниях асфальтобетонных смесей типов С и А за период с 2010 по 2016 г. На основании статистического анализа сопоставлен индекс сопротивления пластическим деформациям $I_{пл}$ с количеством упругих связей n_y и предельной структурной прочностью R_c . Полученные статистические зависимости представлены на рис. 2, 3.

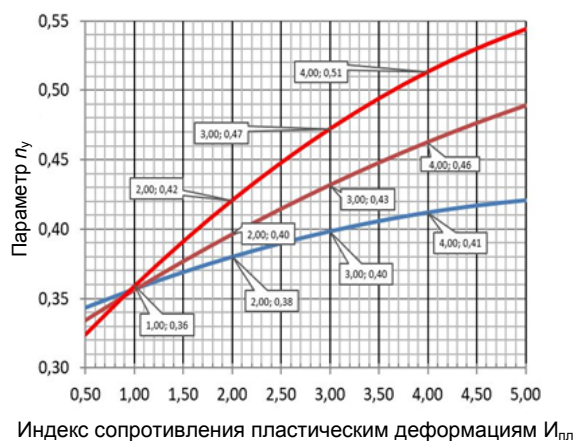


Рис. 2. Статистическая обработка сходимости параметров n_y и $I_{пл}$: — модифицированный битум; — модифицирующая добавка; — обычный битум

Fig. 2. Statistical processing of parameter convergence n_y and $I_{пл}$: — normal bitumen; — modifying additive; — modified bitumen

При исследовании приняты следующие значения индекса сопротивления пластическим деформациям: $I_{пл}^1 = 1,0$; $I_{пл}^2 = 2,0$; $I_{пл}^3 = 3,0$; $I_{пл}^4 = 4,0$. Для приведенных значений $I_{пл}$ по статистическим зависимостям были определены характерные параметры R_c и n_y для различных типов вяжущих.

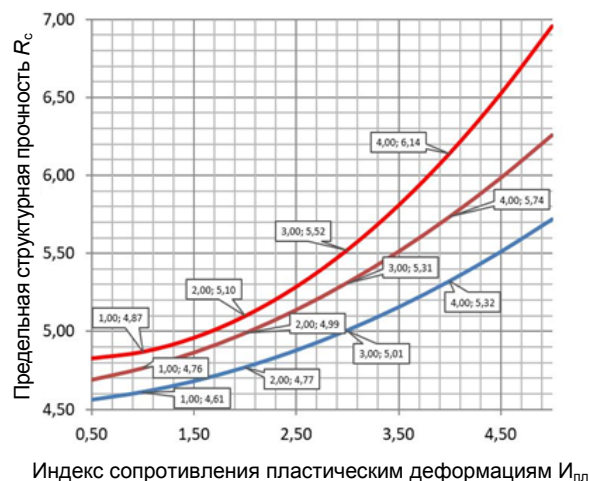


Рис. 3. Статистическая обработка сходимости параметров R_c и $I_{пл}$ (обозначения те же, что на рис. 2)

Fig. 3. Statistical processing of parameter convergence R_c and $I_{пл}$ (designations are the same as in fig. 2)

Для реализации задач второго исследования выполнены 12 расчетов (№ 1–12). Расчетные характеристики асфальтобетона, необходимые для определения параметров надежности и долговечности по методике ТКП 45-3.03-3-2004 [4], определены исходя из выбранных значений $I_{пл}$, R_c и n_y . Параметры ϕ и C находили на основании значений $I_{пл}$ согласно СТБ 1115-2013 [2]. Величина R_0 определена пересчетом по формуле (3) на основании заданных значений R_c и n_y . Коэффициент морозостойкости $K_{мрз}$ вычисляли по эмпирической зависимости, представленной в [7, 8], на основании заданных значений R_c и R_0 при одинаковом водонасыщении. Расчетные характеристики сведены в табл. 1.

Объектом исследования выбран нижний слой двух- или трехслойного покрытия (рис. 4) как наиболее подверженный воздействию циклических растягивающих напряжений от транспортной нагрузки.

Таблица 1

Расчетные характеристики материалов

Design characteristics of materials

№ п/п	Тип вяжущего	$I_{пл}$	R_c	n_y	φ	C	R_0	W	$K_{мрз}$
1	Обычный битум	1,00	4,61	0,36	41,00	0,18	2,04	2,00	0,63
2	Модифицирующая добавка (термопласт)	1,00	4,76	0,36	41,00	0,18	2,10	2,00	0,63
3	Модифицированный битум (термоэластопласт)	1,00	4,87	0,36	41,00	0,18	2,15	2,00	0,63
4	Обычный битум	2,00	4,77	0,42	41,00	0,36	2,38	2,00	0,61
5	Модифицирующая добавка (термопласт)	2,00	4,99	0,40	41,00	0,36	2,40	2,00	0,62
6	Модифицированный битум (термоэластопласт)	2,00	5,10	0,38	41,00	0,36	2,35	2,00	0,62
7	Обычный битум	3,00	5,01	0,47	41,00	0,54	2,74	2,00	0,60
8	Модифицирующая добавка (термопласт)	3,00	5,31	0,43	41,00	0,54	2,70	2,00	0,61
9	Модифицированный битум (термоэластопласт)	3,00	5,52	0,40	41,00	0,54	2,65	2,00	0,61
10	Обычный битум	4,00	5,32	0,51	41,00	0,72	3,10	2,00	0,58
11	Модифицирующая добавка (термопласт)	4,00	5,74	0,46	41,00	0,72	3,08	2,00	0,60
12	Модифицированный битум (термоэластопласт)	4,00	6,14	0,41	41,00	0,72	3,01	2,00	0,61

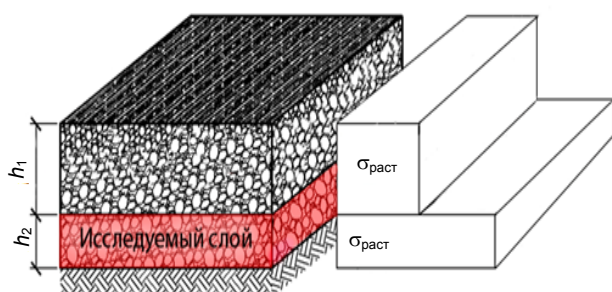


Рис. 4. Исследуемый конструктивный слой

Fig. 4. Investigated structure layer

Необходимое для расчетов значение растягивающих напряжений σ при расчетной температуре 0 °С, равное 0,99 МПа, принято на основании проведенных расчетов методом конечных элементов, где было выявлено распределение напряжений по толщине конструкции 20 см от нагрузки A_2 . Характер деформирования модели показан на рис. 5, эпюра распределения растягивающих напряжений – на рис. 6.

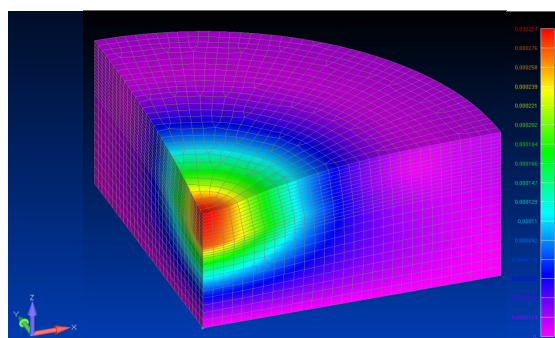


Рис. 5. Характер деформирования модели

Fig. 5. Nature of model deformation

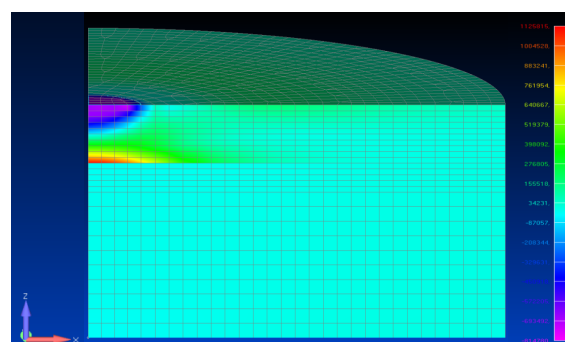


Рис. 6. Эпюра распределения растягивающих напряжений

Fig. 6. Diagram of tensile stresses distribution

Результаты расчетов

Результаты определения частных (P_1 – P_4) и общих ($P_{общ}$) уровней надежности, расчетных сроков службы ($T_{сл}$) исследуемого слоя для всех расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения коэффициентов запаса прочности и частных уровней надежности

Results of determination for safety factors and partial reliability levels

№ п/п	P_1	P_2	P_3	P_4	$P_{общ}$	$T_{сл}$
1	0,10	0,76	0,98	0,98	0,52	1
2	0,10	0,76	0,98	0,98	0,52	1
3	0,10	0,76	0,99	0,98	0,52	1
4	0,44	0,56	0,87	0,98	0,68	3
5	0,44	0,63	0,97	0,98	0,72	4
6	0,44	0,69	0,99	0,98	0,74	5
7	0,78	0,40	0,71	0,97	0,68	3
8	0,78	0,53	0,97	0,98	0,79	7
9	0,78	0,63	0,99	0,98	0,83	9
10	0,94	0,30	0,64	0,97	0,65	2
11	0,94	0,43	0,97	0,97	0,79	7
12	0,94	0,59	0,99	0,98	0,86	10

Расчетные значения сроков службы указывают на появление усталостных деформаций в рамках данного уровня надежности.

Проведенное исследование позволило выявить связь между физико-механическими свойствами асфальтобетона ($I_{пл}$, R_c , n_y) и его сроком службы до появления деформаций усталостного характера. Результаты, вычисленные на основании обработки данных расчетов № 1–12 (табл. 1, 2), сведены в табл. 3, а полученные зависимости отображены на рис. 7.

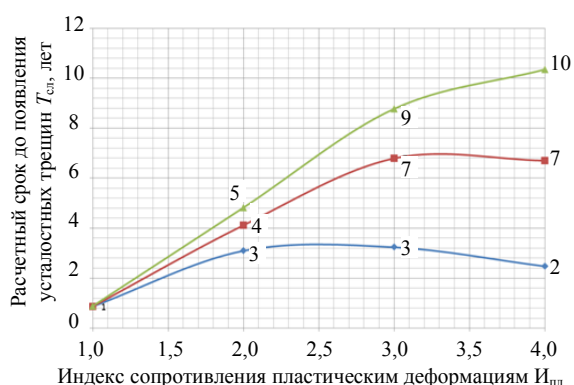


Рис. 7. Изменение сроков службы покрытия:
— асфальтобетон на обычном битуме;
— асфальтобетон на модифицирующей добавке (термопласт); — асфальтобетон на модифицированном битуме (термоэластопласт)

Fig. 7. Change in service life of pavement: — asphalt concrete on normal bitumen; — asphalt concrete with modifying additive (thermoplast); — asphalt concrete with modified bitumen (thermoplastic elastomer)

Интересным является наличие экстремума повышения срока службы от показателя устойчивости к пластическим деформациям (рис. 7),

что заметно как для традиционных асфальтобетонов, так и для модифицированных. Связано это с тем, что с ростом устойчивости к пластическим деформациям может снижаться температурная трещиностойкость и, как доказано нашими исследованиями, усталостная долговечность.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Повышение индекса сопротивления пластическим деформациям для асфальтобетонов на обычном битуме позволит улучшить характеристики покрытия только по устойчивости к сдвиговым деформациям, однако условия работы по остальным критериям ухудшатся, и после определенного значения параметра $I_{пл}$ (в исследовании равно 3,0) долговечность уменьшится.

2. Модификация асфальтобетона добавками различного типа целесообразна только при достижении высоких значений физико-механических свойств. С технической точки зрения, исходя из значений расчетных сроков службы, она рациональна модифицирующими добавками группы «термопласты», полимерными – при достижении следующих показателей физико-механических свойств: $I_{пл} \geq 2,7-3,0$; $R_c \geq 5,3$ МПа; $n_y \leq 0,46$. При применении модифицированных битумов с добавками группы «термоэластопласты» свойства должны соответствовать следующим требованиям: $I_{пл} \geq 2,7-3,0$; $R_c \geq 5,5$ МПа; $n_y \leq 0,41$.

Таблица 3

Сопоставление расчетных характеристик и сроков службы

Comparison of calculated characteristics and service life

Индекс сопротивления пластическим деформациям $I_{пл}$	Максимальная структурная прочность R_c , МПа, для материала №			Параметр n_y для материала №			Срок службы $T_{сл}$, лет, для материала №		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1,0	4,61	4,76	4,87	0,36	0,36	0,36	1	1	1
2,0	4,77	4,99	5,10	0,42	0,40	0,38	3	4	5
3,0	5,01	5,31	5,52	0,47	0,43	0,40	3	7	9
4,0	5,32	5,74	6,14	0,51	0,46	0,41	2	7	10

Обозначения: 1 – асфальтобетон на обычном битуме; 2 – то же на модифицирующей добавке (термопласт); 3 – то же на модифицированном битуме (термоэластопласт).

ВЫВОДЫ

1. Срок службы (с момента открытия движения до появления усталостных дефектов в виде трещин) нижнего конструктивного слоя покрытия дорожной одежды при использовании асфальтобетона на обычном вяжущем составил три года. В случае применения для приготовления смеси модифицирующих полимерных добавок и модифицированных битумов расчетный срок службы может увеличиться до восьми лет. Полученные результаты объективны при достижении характеристик асфальтобетона, которые являются наиболее характерными при модификации асфальтобетонных компонентами различных типов (характеристики приведены выше).

2. Если одинаковые физико-механические свойства асфальтобетонов ($I_{пл}$) достигнуты на обычном битуме с применением добавок и на модифицированном битуме, то расчетные сроки службы будут больше на модифицированных асфальтобетонах на три-пять лет. Причем данный эффект достигается при индексах сопротивления пластическим деформациям 2,0 и более.

3. Устойчивость конструкции к пластическим деформациям выше при модификации асфальтобетонов многокомпонентными полимерными добавками (частный уровень надежности P_1), однако общий уровень надежности и циклическая долговечность материала по всем критериям прочности, как правило, могут быть выше в случае применения модифицированных битумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веренько, В. А. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько. Минск: АртДизайн, 2015. 291 с.
2. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ 1115–2013. Введ. 07.01.2014. Минск: БелдорНИИ: Госстандарт Беларуси, 2014. 39 с.
3. Веренько, В. А. Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства / В. А. Веренько. Минск: Навука і тэхніка, 1993. 246 с.
4. Печеный, Б. Г. Битумы и битумные композиции / Б. Г. Печеный. М.: Химия, 1990. 256 с.

5. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия: СТБ 1033–2016. Минск: Минстройархитектуры, 2016. 26 с.
6. Веренько, В. А. Новые материалы в дорожном строительстве / В. А. Веренько. Минск: Технопринт, 2004. 170 с.
7. Веренько, В. А. Надежность дорожных одежд / В. А. Веренько. Минск: БГПА, 2002. 120 с.
8. Золотарев, В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В. А. Золотарев. Харьков: Изд-во ХГУ, 1978. 112 с.
9. Веренько, В. А. Деформации и разрушения дорожных покрытий: причины и пути устранения / В. А. Веренько. Минск: Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі, 2008. 304 с.
10. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов: ТКП 45-3.03-3–2004 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2006. 27 с.

Поступила 04.05.2018

Подписана в печать 11.07.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Verenko V. A. (2015) *Durable Asphalt-Concrete Pavements of Automotive Roads, Bridges and Streets*. Minsk, ArtDizayn Publ. 291 (in Russian).
2. STB 1115–2013. *Road, Airdrome Bitumen-Concrete Mixtures and Asphalt Concrete. Test Methods*. Minsk, Publishing House of Belarusian Road Scientific-Research Institute, State Standard of Belarus, 2014. 39 (in Russian).
3. Verenko V. A. (1993) *Road Composite Materials. Structure and Mechanical Properties*. Minsk, Navuka i Tekhnika. 246 (in Russian).
4. Pecheny B. G. (1990) *Bitumen and Bitumen Compositions*. Moscow, Khimiya Publ. 256 (in Russian).
5. STB 1033–2016. *Road, Airdrome Bitumen-Concrete Mixtures and Asphalt Concrete. Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2016. 26 (in Russian).
6. Verenko V. A. (2004) *New Materials in Road Construction*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 170 (in Russian).
7. Verenko V. A. (2002) *Reliability of Road Dressings*. Minsk, Belarusian State Polytechnical Academy. 120 (in Russian).
8. Zolotarev V. A. (1978) *Durability of Road Asphalt-Concrete*. Kharkov, Publishing House of Kharkov State University. 112 (in Russian).
9. Verenko V. A. (2008) *Deformation and Destruction of Road Pavements: Causes and How to Remove Them*. Minsk, Publishing House Belaruskaya Entsiklopedyya imya P. Brovki. 304 (in Russian).
10. TKP [Technology Code of Practice] 45-3.03-3–2004 (02250). *Designing of Road Dressings for Streets and Roads at Populated Areas*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2006. 27 (in Russian).

Received: 04.05.2018

Accepted: 11.07.2018

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-458-464>

УДК 539.3

Две контактные задачи о вдавливании кольцевого штампа в упругое полупространство

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье приводятся решения двух контактных задач для кольцевого штампа на упругом полупространстве под действием осесимметрично приложенной силы и момента. Подобные задачи обычно возникают при расчетах жестких фундаментов с подошвой кольцевой формы у дымовых труб, градирен, водонапорных башен и других высотных сооружений на ветровую нагрузку и нагрузку от собственного веса. Обе задачи формулируются в виде тройных интегральных уравнений, которые способом подстановки сводятся к одному интегральному уравнению. В случае осесимметричной задачи ядро интегрального уравнения зависит от произведения трех функций Бесселя. Используя формулу для представления двух функций Бесселя в виде двойного ряда по произведениям гипергеометрической функции на функцию Бесселя, задача сводится к функциональному уравнению, связывающему перемещения штампа с неизвестными коэффициентами распределения контактных напряжений. Полученное функциональное уравнение сводится к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, которая решается способом усечения. При действии момента на кольцевой штамп распределение контактных напряжений ищется в виде ряда по произведениям присоединенных функций Лежандра с весом, соответствующим особенности в контактных напряжениях у краев штампа. При использовании спектрального соотношения Г. Я. Попова для кольцевой пластинки задача опять сводится к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, которая также решается способом усечения. Приводятся два примера расчетов для кольцевого штампа на упругом полупространстве на действие осесимметрично приложенной силы и момента. Выполнено сопоставление результатов расчетов по предлагаемому подходу с результатами для круглого и кольцевого штампов с решениями других авторов.

Ключевые слова: контактная задача, кольцевой штамп, упругое полупространство, осесимметричная задача

Для цитирования: Босаков, С. В. Две контактные задачи о вдавливании кольцевого штампа в упругое полупространство / С. В. Босаков // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 458–464. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-458-464>

Two Contact Problems for Circular Die Pressing-In in Elastic Half Space

S. V. Bosakov¹⁾

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

Abstract. The paper presents solutions on two contact problems for a circular die on an elastic half-space under the action of an axisymmetrically-applied force and moment. Such problems usually arise while making calculations for a wind load and a load from its own weight pertaining to rigid foundations of chimney stacks, cooling towers, water towers and other high-rise structures with a sole having a circular shape. Both problems are formulated in the form of triple integral equations which are reduced to one integral equation by a substitution method. In the case of the axisymmetric problem a kernel of the integral equation depends on the product of three Bessel functions. Using a formula to represent two Bessel functions in the form

Адрес для переписки

Босаков Сергей Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Bosakov Siarhei V.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

of a double row according to the products of a hyper-geometric function by Bessel function, the problem is reduced to a functional equation that interconnects movement of a die with unknown coefficients of the contact stresses distribution. The resulting functional equation is reduced to an infinite system of linear algebraic equations, which is solved by truncation. In the case when a moment is acting on a circular die distribution of contact stresses is searched as a series according to products of the Legendre attached functions with a weight corresponding to specific features in the contact stresses at die edges. While using the spectral G. Ya. Popov ratio for a ring plate the problem is again reduced to an infinite system of linear algebraic equations which is also solved by the truncation method. Two examples are given how to make calculations for a circular die on an elastic half-space according to the action of axially symmetric applied force and moment. A comparison of calculation results on the proposed approach has been made with the results for round and circular dies which were made by other authors.

Keywords: contact problem, circular die, elastic half space, axisymmetric problem

For citation: Bosakov S. V. (2018) Two Contact Problems for Circular Die Pressing-In in Elastic Half Space. *Science and Technique*. 17 (6), 458–464. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-458-464> (in Russian)

Введение

Впервые задачу о расчете кольцевой пластинки на упругом полупространстве поставил и решил Б. Н. Жемочкин [1]. Впоследствии она была решена многими авторами различными способами [2–13], причем Ф. Н. Бородачева [9] также решила контактную задачу о действии момента на кольцевой штамп, лежащий на упругом полупространстве. В. М. Александровым [5, 10] получены асимптотические формулы для распределения контактных напряжений и перемещений кольцевого штампа на упругом полупространстве при действии на штамп осесимметрично приложенной силы и момента. Более сложный вид упругого основания рассмотрен в [13]. В [14] выполнен обзор работ по контактным задачам для кольцевых пластинок. Ряд авторов рассматривали более сложную задачу о расчете кольцевого штампа на упругом слое [3, 6] и анизотропном полупространстве [12].

Следует отметить, что большинство из вышеперечисленных работ отличаются сложностью математических выкладок для нахождения решения. Ниже автором статьи более простым путем дано решение контактной задачи для кольцевого штампа, расположенного на упругом полупространстве и нагруженного силой и моментом.

Первая контактная задача для кольцевого штампа

Рассмотрим осесимметрично нагруженный силой R кольцевой штамп на упругом полупространстве (рис. 1). Будем считать, что на кон-

такте штампа и полупространства отсутствуют касательные напряжения и связи между нижней поверхностью штампа и полупространством являются двусторонними. В такой постановке задача определения контактных напряжений и перемещений штампа сводится к тройным интегральным уравнениям [2, 9]:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \alpha A(\alpha) J_0(\alpha r) d\alpha &= 0, \quad 0 < r < r_1; \\ \int_0^{\infty} \alpha A(\alpha) J_0(\alpha r) d\alpha &= W_0, \quad r_1 < r < r_2; \\ \int_0^{\infty} \alpha A(\alpha) J_0(\alpha r) d\alpha &= 0, \quad r_2 < r, \end{aligned} \quad (1)$$

где $A(\alpha)$ – неизвестная функция; W_0 – вертикальное перемещение штампа; $J_0(\alpha r)$ – функция Бесселя первого рода [15].

Далее будем пользоваться безразмерными величинами r, r_1, r_2 , отнесенными к r_2 .

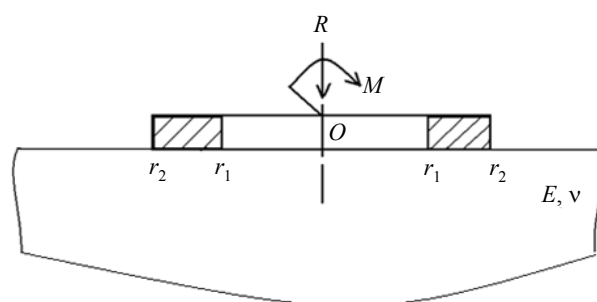


Рис. 1. Кольцевой штамп на упругом полупространстве

Fig. 1. Circular die on elastic half space

Приведем (1) к одному интегральному уравнению способом подстановки [16]. Для этого используем разрывной интеграл [17]:

$$\begin{aligned}
& \int_0^\infty \alpha^{1-m} J_n(\alpha a) J_n(\alpha b) J_m(\alpha r) d\alpha = 0, \\
& (a-b)^2 > r^2; \\
& = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} a^{m-1} b^{m-1} r^m (1-\mu^2)^{(2m-1)/4} P_{n-1/2}^{1/2-m}(\mu), \\
& (a+b)^2 > r^2 > (a-b)^2; \\
& = 0, (a+b)^2 < r^2, \quad \mu = \frac{a^2 + b^2 - r^2}{2ab}, \quad (2)
\end{aligned}$$

и представим

$$\begin{aligned}
A(\alpha) &= r_2 \sum_{n=0}^\infty C_{2n} J_{2n}(\alpha a) J_{2n}(\alpha b), \\
a &= \frac{r_2 - r_1}{2}; \quad b = \frac{r_2 + r_1}{2}.
\end{aligned} \quad (3)$$

В (2) $P_{n-1/2}^{1/2-m}(\mu)$ – присоединенная функция Лежандра первого рода [15].

Подставим (3) в (1) и на основании (2) получаем одно интегральное уравнение

$$\sum_{n=0}^\infty C_{2n} \int_0^\infty J_{2n}(\alpha a) J_{2n}(\alpha b) J_0(\alpha r) d\alpha = \frac{W_0}{r_2}, \quad (4)$$

$$r_1 < r < r_2.$$

Для решения (4) принимаем разложение [18] для произведения двух функций Бесселя

$$\begin{aligned}
\left(\frac{z}{2}\right)^{\gamma-\mu-\nu} J_\mu(\alpha z) J_\nu(\beta z) &= \frac{\alpha^\mu \beta^\nu}{\Gamma(\nu+1)} \sum_{m=0}^\infty (\gamma+2m) J_{\gamma+2m}(z) \times \\
&\times \sum_{n=0}^\infty (-1)^n \frac{\Gamma(\gamma+m+n) \alpha^{2n}}{n!(m-n)! \Gamma(n+\mu+1)} \times \\
&\times {}_2F_1\left(-n, -n-\mu; \nu+1; \frac{\beta^2}{\alpha^2}\right),
\end{aligned} \quad (5)$$

где ${}_2F_1\left(-n, -n-\mu; \nu+1; \frac{\beta^2}{\alpha^2}\right)$ – гипергеометрическая функция; $\Gamma(z)$ – гамма-функция [15].

Используем интеграл [15]

$$\int_0^\infty J_\mu(ax) J_\nu(bx) dx = b^\nu a^{-\nu-1} \frac{\Gamma\left(\frac{\mu+\nu+1}{2}\right)}{\Gamma(\nu+1) \Gamma\left(\frac{\mu-\nu+1}{2}\right)} \times$$

$$\times {}_2F_1\left(\frac{\mu+\nu+1}{2}, \frac{\nu-\mu+1}{2}; \nu+1; \frac{b^2}{a^2}\right).$$

В итоге получаем функциональное уравнение, связывающее между собой коэффициенты C_{2n} представления (3) и перемещение штампа W_0 . Обе части этого уравнения умножим

на $\frac{T_{2k}\left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r^2}{r_2^2 - r_1^2}\right)}{\sqrt{(r_2^2 - r^2)(r^2 - r_1^2)}} r dr$, $k = 0, 1, 2, \dots$ и про-

интегрируем по r в интервале от r_1 до r_2 . При этом используем свойство ортогональности полиномов Чебышева $T_{2k}(z)$ с весом [7, 15]:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{T_{2k}\left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r^2}{r_2^2 - r_1^2}\right) T_{2i}\left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r^2}{r_2^2 - r_1^2}\right)}{\sqrt{(r_2^2 - r^2)(r^2 - r_1^2)}} r dr = \frac{\pi}{2},$$

$$i = k = 0;$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\pi}{4}, \quad i = k > 0; \\
&= 0, \quad i \neq k.
\end{aligned} \quad (6)$$

Получаем бесконечную систему линейных алгебраических уравнений, которую решаем методом усечения [19], что позволяет выразить C_{2n} через перемещение W_0 .

Так как контактные напряжения определяются по формуле [2]

$$\sigma_z = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \sum_{n=0}^\infty C_{2n} \frac{P_{2n-1/2}^{1/2}(\mu)}{\sqrt{2\pi} ab \sqrt{1-\mu^2}},$$

то из уравнения равновесия всего штампа сразу следует, что

$$C_0 = \frac{R(1-\nu^2)}{\pi E r_2^2}, \quad (7)$$

где E , ν – упругие постоянные полупространства.

Пример 1. Рассмотрим пример расчета кольцевого штампа с размерами $r_1 = 0,5r_2$.

Получено при учете первых трех членов разложения (3):

$$\begin{Bmatrix} 2,5805 & 0,0177 & -0,0073 \\ 0,0193 & 0,1623 & -0,0037 \\ -0,0074 & -0,0053 & 0,0766 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} C_0 \\ C_2 \\ C_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\pi}{2} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} W_0, \quad (8)$$

где $C_0 = 0,6094 \frac{W_0}{r_2}$; $C_2 = -0,0712 \frac{W_0}{r_2}$; $C_4 = 0,0537 \frac{W_0}{r_2}$.

Вертикальное перемещение кольцевого штампа при принятом соотношении $r_1 = 0,5r_2$ будет равно

$$W_0 = 0,5224 \frac{R(1-\nu^2)}{E r_2}.$$

Отметим, что для осесимметрично нагруженного круглого штампа на упругом полупространстве [20] вертикальное перемещение

$$W_0 = 0,5 \frac{R(1-\nu^2)}{E r_2}.$$

Следует также отметить, что в матрице (8) при практических расчетах фундаментов с подошвой кольцевой формы по второй группе предельных состояний можно ограничиться одним членом ряда (3). Тогда

$$W_0 = 0,5229 \frac{R(1-\nu^2)}{E r_2}.$$

Для такого кольцевого штампа в [9] получено

$$W_0 = 0,5015 \frac{R(1-\nu^2)}{E r_2}.$$

Вторая контактная задача для кольцевого штампа

Рассмотрим нагруженный сосредоточенным моментом кольцевой штамп на упругом полупространстве (рис. 1) при ранее принятых предпосылках. Следуя В. М. Абрамову [21], построим систему интегральных уравнений для расчета штампа на действие момента:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \alpha A(\alpha) J_1(\alpha r) d\alpha &= 0, \quad 0 < r < r_1; \\ \int_0^\infty A(\alpha) J_1(\alpha r) d\alpha &= \gamma r, \quad r_1 < r < r_2; \\ \int_0^\infty \alpha A(\alpha) J_1(\alpha r) d\alpha &= 0, \quad r_2 < r, \end{aligned} \quad (9)$$

где $A(\alpha)$ – неизвестная функция; γ – угол поворота штампа; $J_1(\alpha r)$ – функция Бесселя первого рода [15].

Принимаем [22]

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \alpha A(\alpha) J_1(\alpha \rho) d\alpha &= \varphi(\rho), \quad \varphi(\rho) = 0, \quad 0 < \rho < r_1; \\ \varphi(\rho) &= 0, \quad r_2 < \rho < \infty. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда первое и третье уравнения (9) удовлетворяются тождественно, а (10) в силу обратного преобразования Ханкеля [23] дает

$$A(\alpha) = \int_{r_1}^{r_2} \rho \varphi(\rho) J_1(\alpha \rho) d\rho. \quad (11)$$

Подставляя (11) во второе уравнение (9) и меняя очередность интегрирования, получаем:

$$\begin{aligned} \int_{r_1}^{r_2} \rho \varphi(\rho) K(r, \rho) d\rho &= \gamma r; \\ K(r, \rho) &= \int_0^\infty J_1(\alpha \rho) J_1(\alpha r) d\alpha, \quad r_1 < \rho < r_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Интегральное уравнение (12) полностью совпадает с разрешающим уравнением контактной задачи для несимметричного вдавливания кольцевого штампа в упругое полупространство, полученное В. М. Александровым [10] другим путем.

Для решения представим в безразмерных координатах $\left(r_2 = 1, \quad a = \frac{r_1}{r_2}, \quad r = \frac{r}{r_2} \right)$

$$\begin{aligned} \int_0^\infty J_1(ur) J_1(u\rho) du &= \\ &= \sum_{m=0}^\infty \sum_{n=0}^\infty C_{2m+1, 2n+1} P_{2m+1}^1(\sqrt{1-\rho^2}) P_{2n+1}^1(\sqrt{1-r^2}). \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая, что по физическому смыслу $\frac{E}{2(1-\nu^2)}\varphi(\rho)$ дает распределение контактных напряжений под подошвой штампа, примем

$$\varphi(\rho) = \frac{1}{(1-\rho^2)(\rho^2-r_1^2)} \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+1} P_{2n+1}^1(\sqrt{1-r^2}). \quad (14)$$

Подставим $\varphi(\rho)$ (14) в уравнение (12) и с учетом (13) выполним интегрирование по переменной ρ . При интегрировании используем:

очевидное представление произведения двух присоединенных функций Лежандра с целочисленными индексами в виде ряда по полиномам Лежандра [15]

$$\begin{aligned} P_{2m+1}^1(\sqrt{1-\rho^2}) P_{2n+1}^1(\sqrt{1-\rho^2}) &= \\ &= \sum_{i=0}^{m+n+1} d_{2m,2n,2i} P_{2i}^1(\sqrt{1-\rho^2}); \end{aligned} \quad (15)$$

результаты [24] для $0 < r, \rho < 1$

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} J_1(ur) J_1(u\rho) du &= \frac{1}{8} \sum_{n=0}^{\infty} (3+4n) \frac{\Gamma^2(n+1/2)}{\Gamma^2(n+2)} \times \\ &\times P_{2n+1}^1(\sqrt{1-\rho^2}) P_{2n+1}^1(\sqrt{1-r^2}); \end{aligned} \quad (16)$$

спектральное соотношение Г. Я. Попова [25]

$$\int_a^1 \frac{y P_{2n}(\sqrt{1-y^2})}{\sqrt{1-y^2} \sqrt{y^2-a^2}} dy = (-1)^n \frac{\pi (2n-1)!!}{2 (2n)!!} P_{2n}(a).$$

В результате получим

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+1} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (3+4n) \frac{\Gamma^2(n+1/2)}{\Gamma^2(n+2)} P_{2n+1}^1(\sqrt{1-r^2}) \right. \\ \left. \sum_{i=0}^{k+n+1} d_{2k,2n,2i} (-1)^i \frac{(2i-1)!!}{(2i)!!} P_{2i}(a) \right\} = \\ = \frac{8E\gamma}{\pi(1-\nu^2)} r. \end{aligned} \quad (17)$$

Умножим обе части (17) на

$$\frac{P_{2j+1}^1(\sqrt{1-r^2})}{\sqrt{1-r^2} \sqrt{r^2-a^2}} r dr \text{ и проинтегрируем по } r$$

в пределах $(a, 1)$, $j = 0, 1, 2, \dots$. При этом используем представление (15). Получаем бесконечную систему линейных алгебраических уравнений, которую решаем методом усечения [19]. В результате получаем связь между углом наклона штампа γ и коэффициентами

разложения B_{2k+1} (17). Далее находим полную энергию упругого основания и действующего на кольцевую пластинку момента [26]

$$\Phi = \frac{1}{2} r_2^3 \int_0^{2\pi} \int_a^1 q_1(r) \cos^2 \varphi r^2 dr - M\gamma. \quad (18)$$

Приравняв производную от полной энергии (18) по угловому перемещению к нулю, находим это перемещение, что позволяет найти распределение контактных напряжений под подошвой кольцевого штампа от действия момента.

Пример 2. $\frac{r_1}{r_2} = a = 0,5$.

Получено при учете первых трех членов разложения (14):

$$B_1 = -0,2852 \frac{16E}{\pi^2(1-\nu^2)} \gamma;$$

$$B_3 = 0,0418 \frac{16E}{\pi^2(1-\nu^2)} \gamma;$$

$$B_5 = 0,0039 \frac{16E}{\pi^2(1-\nu^2)} \gamma;$$

$$\gamma = 0,7525 \frac{M(1-\nu^2)}{Eb^3}.$$

Отметим, что для круглого штампа на упругом полупространстве [20] $\gamma = \frac{3M(1-\nu^2)}{4Eb^3}$, для подобного кольцевого штампа на полупространстве [9] $\gamma = 0,7628 \frac{M(1-\nu^2)}{Eb^3}$.

ВЫВОДЫ

1. Предложены решения двух контактных задач для кольцевого штампа на упругом полупространстве. Необходимость решения таких задач возникает при расчетах фундаментов с подошвой кольцевой формы у дымовых труб, водонапорных башен, градирен и иных высотных сооружений, если в качестве модели грунтового основания принято упругое полупространство.

2. В существующих нормативных документах [27] отсутствуют указания по расчету фундаментов с подошвой кольцевой формы по вто-

рой группе предельных состояний. Результаты настоящей работы могут быть использованы для таких расчетов.

3. Автор не останавливался в тексте на вопросах корректности использования способа усечения [19] при решении получаемых бесконечных систем ввиду сложных и громоздких формул для коэффициентов при неизвестных в этих системах. Однако в [28] доказано, что использование способа ортогональных многочленов при решении контактных задач приводит к регулярным бесконечным системам [19], которые допускают решение способом усечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жемочкин, Б. Н. Расчет круглых плит на упругом основании на симметричную нагрузку / Б. Н. Жемочкин. М.: Изд-во ВИА РККА имени Куйбышева, 1938. 135 с.
2. Егоров, К. Е. К вопросу расчета оснований под фундаментом с подошвой кольцевой формы / К. Е. Егоров // Сб. тр. НИИОСП. М.: Госстройиздат, 1958. Вып. 34: Механика грунтов. С. 34–57.
3. Губенко, В. С. Давление осесимметричного кольцевого штампа на упругий слой и полупространство / В. С. Губенко // Известия АН СССР, ОТН Механика и машиностроение. 1960. № 3. С. 60–64.
4. Егоров, К. Е. Расчет оснований под фундаментом с подошвой кольцевой формы / К. Е. Егоров // Доклады к VI Междунар. конгр. по механике грунтов и фундаментам. М.: Стройиздат, 1965. С. 74–82, 290–298.
5. Александров, В. М. Осесимметричная задача о действии кольцевого штампа на упругое полупространство / В. М. Александров // Известия АН СССР, Механика твердого тела. 1967. № 4. С. 108–116.
6. Валов, Г. М. Бесконечный упругий слой и полупространство под действием кольцевого штампа / Г. М. Валов // Прикладная математика и механика. 1968. Т. 32, вып. 5. С. 894–907.
7. Губенко, В. С. Точное решение задачи о кольцевом штампе / В. С. Губенко, Г. М. Накашидзе, В. Г. Пятоволонко // Докл. АН УССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки. 1986. № 8. С. 40–44.
8. Антипов, Ю. А. Точное решение задачи о вдавлении кольцевого штампа в полупространство / Ю. А. Антипов // Докл. АН УССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки. 1987. № 7. С. 29–33.
9. Бородачева, Ф. Н. О вдавлении кольцевого штампа в упругое полупространство под действием вертикальной внецентренной силы / Ф. Н. Бородачева // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1969. № 8. С. 15–19.
10. Александров, В. М. Взаимодействие плоского наклонного кольцевого штампа с упругим полупространством / В. М. Александров // Прикладная математика и механика. 1996. Т. 60, № 1. С. 132–139.
11. Toshkazy, Shibuya. An Elastic Contact Problem for a Half-Space Indented by a Flat Annular Rigid Stamp / Shibuya Toshkazy, Koizumi Takashi, Nakahara Ichiro // Int. J. Engng. Sci. 1974. Vol. 12, No 9. P. 759–771.
12. Dhawan, G. K. A Transversely Isotropic Half-Space Indented by a Flat Annular Rigid Stamp / G. K. Dhawan // Acta Mechanica. 1979. Vol. 31, No 3–4. P. 291–299.
13. Генералова, Н. В. О вдавлении кольцевого в плане штампа в упругий слой с тонким усиливающим покрытием / Н. В. Генералова, Е. В. Коваленко // Механика твердого тела. 1999. № 3. С. 27–33.
14. Шматкова, А. А. Контактные задачи для полупространства, сложные в плане области контакта / А. А. Шматкова // Механика контактных взаимодействий. М.: Физматлит, 2001. С. 138–156.
15. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. М.: Физматлит, 1963. 1100 с.
16. Уфлянд, Я. С. Метод парных уравнений в задачах математической физики / Я. С. Уфлянд. Л.: Наука, 1977. 220 с.
17. MacDonald, H. M. Note on the Evaluation of the Certain Integral Containing Bessel's Functions / H. M. Macdonald // Proc. London Math. Soc. 1909. Vol. S2–7, No 1. P. 142–149.
18. Бейтмен, П. Высшие трансцендентные функции. В 2 ч. / П. Бейтмен, А. Эрдейи. М.: Наука, 1974. Ч. 2. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены. 295 с.
19. Канторович, Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. М.: Физматлит, 1962. 708 с.
20. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. М.: Стройиздат, 1984. 679 с.
21. Абрамов, В. М. Исследование случая несимметричного давления штампа круглого сечения на упругое полупространство / В. М. Абрамов // ДАН СССР. 1939. Т. 23, № 8. С. 759–763.
22. Ahner, J. F. On the Solution of a Class of Integral Equations / J. F. Ahner, J. S. Lowndes // J. of Math. Anal. and Appl. 1984. Vol. 109, No 2. P. 447–462.
23. Уфлянд, Я. С. Интегральные преобразования в теории упругости / Я. С. Уфлянд. Л.: Наука, 1968. 402 с.
24. Босаков, С. В. Метод Ритца в контактных задачах теории упругости / С. В. Босаков. Брест: Изд-во БрГТУ, 2006. 108 с.
25. Попов, Г. Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подкреплений / Г. Я. Попов. М.: Наука, 1982. 344 с.
26. Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности / А. В. Александров, В. Д. Потапов. М.: Высш. шк., 1990. 400 с.
27. Фундаменты плитные. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-67-2007 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2008. 140 с.
28. Развитие теории контактных задач в СССР / под ред. Л. А. Галина. М.: Наука, 1976. 496 с.

Поступила 01.06.2018

Подписана в печать 15.08.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Zhemochkin B. N. (1938) *Calculation of Round Plates on Elastic Foundation for Symmetrical Load*. Moscow, Publishing House of Military Engineering Academy named for V. V. Kuybyshev of Workers' and Peasants' Red Army. 135 (in Russian).
2. Egorov K. E. (1958) On the Problem Pertaining to Calculation of Bed Under Foundation with Foot of Circular Shape. *Collected Papers of Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP). Iss. 34. Mechanics of Soils*. Moscow, Publishing House Gosstroyizdat, 34–57 (in Russian).
3. Gubenko V. S. (1960) Pressure of Axisymmetric Circular Die on Elastic Layer and Half-Space. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk. Mekhanika i Mashinostroyeniye* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences, Department of Engineering Sciences, Mechanics and Mechanical Engineering], (3), 60–64 (in Russian).
4. Egorov K. E. (1965) Calculation of Beds Under Foundation with Foot of Circular Shape. *Doklady k VI Mezhdunarodnomu Kongressu po Mekhanike Gruntov i Fundamentostroyeniyu* [Reports for VIth International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering] Moscow, Publishing House Stroyizdat, 74–82, 290–298 (in Russian).
5. Alexandrov V. M. (1967) Axisymmetric Problem Pertaining to Action of Circular Die on Elastic Half-Space. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika Tverdogo Tela = Mechanics of Solids*, (4), 108–116 (in Russian).
6. Valov G. M. (1968) Infinite Elastic Layer and Half-Space Under Action of Circular die. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 32 (5), 917–930. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(68\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0021-8928(68)90012-9).
7. Gubenko V. S. Nakashidze G. M., Pyatovolenko V. G. (1986) Exact Solution of Circular die Problem. *Doklady AN USSR. Seriya A: Fiziko-Matematicheskie i Tekhnicheskie Nauki* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, Series A, Physico-Mathematical and Engineering Sciences], (8), 40–44 (in Russian).
8. Antipov Yu. A. (1987) Exact Solution of Problem Pertaining to Pressing of Circular Die into Half-Space. *Doklady AN USSR. Seriya A: Fiziko-Matematicheskie i Tekhnicheskie Nauki* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, Series A, Physico-Mathematical and Engineering Sciences], (7), 29–33 (in Russian).
9. Borodacheva F. N. (1969) On pressing Circular Die into Elastic Half-Space Due to Action of Vertical Eccentric Force. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo i Arkhitektura* [News of Higher Education Institutions. Construction and Architecture], (8), 15–19 (in Russian).
10. Aleksandrov V. M. (1996) The Interaction Between a Plane Inclined Ring-Shaped Punch and an Elastic Half-Space. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 60 (1), 127–134. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(96\)00017-2](https://doi.org/10.1016/0021-8928(96)00017-2).
11. Toshkazy Shibuya, Koizumi Takashi, Nakahara Ichiro (1974) An Elastic Contact Problem for a Half-Space Indented by a Flat Annular Rigid Stamp. *International Journal of Engineering Science*, 12 (9), 759–771. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(74\)90056-1](https://doi.org/10.1016/0020-7225(74)90056-1).
12. Dhawan G. K. (1979) A Transversely Isotropic Half-Space Indented by a Flat Annular Rigid Stamp. *Acta Mechanica*, 31 (3–4), 291–299. <https://doi.org/10.1007/bf01176856>.
13. Generalova N. V., Kovalenko E. V. (1999) On Pressing Circular Die in Terms of Elastic Layer with thin Reinforcing Coating. *Izvestiya RAN. Mekhanika Tverdogo Tela = Mechanics of Solids*, (3), 27–33 (in Russian).
14. Shmatkova A. A. (2001) Contact Problems for a Half-Space Which are Complicated in Terms of Contact Area. *Mechanics of Contact Interactions*. Moscow, Fizmatlit Publ. 138–156 (in Russian).
15. Gradshtein I. S., Ryzhik I. M. (1963) *Integral Tables of Sums, Series and Products*. Moscow, Fizmatlit Publ. 1100 (in Russian).
16. Uflyand Ya. S. (1977) *Method of Pair Equations in Problems of Mathematical Physics*. Leningrad, Nauka Publ. 220 (in Russian).
17. MacDonald H. M. (1909) Note on the Evaluation of the Certain Integral Containing Bessel's Functions. *Proceedings of the London Mathematical Society*, S2–7 (1), 142–149. <https://doi.org/10.1112/plms/s2-7.1.142>.
18. Bateman P., Erdélyi A. (1974) *Higher Transcendental Functions. Part 2. Bessel Functions, Parabolic Cylinder Functions, Orthogonal Polynomials*. Moscow, Nauka Publ. 295 (in Russian).
19. Kantorovich L. V., Krylov V. I. (1962) *Approximate Methods of Higher Analysis*. Moscow, Fizmatlit Publ. 708 (in Russian).
20. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on Elastic Foundation*. Moscow, Publishing House Stroyizdat, 679 (in Russian).
21. Abramov V. M. (1939) Investigation of Asymmetric Circular-Section Die Pressure on Elastic Half-Space. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 23 (8), 759–763 (in Russian).
22. Ahner J. F., Lowndes J. S. (1984) On the Solution of a Class of Integral Equations. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 109 (2), 447–462. [https://doi.org/10.1016/0022-247x\(84\)90093-3](https://doi.org/10.1016/0022-247x(84)90093-3).
23. Uflyand Ya. S. (1968) *Integral Transformations in the Theory of Elasticity*. Leningrad, Nauka Publ. 402 (in Russian).
24. Bosakov S. V. (2006) *Ritz Method for Contact Problems in Elasticity Theory*. Brest, Publishing House of Brest State Technical University, 108 (in Russian).
25. Popov G. Ya. (1982) *Concentration of Elastic Stresses Near Dies, Sections, Thin Inclusions and Reinforcements*. Moscow, Nauka Publ. 344 (in Russian).
26. Alexandrov A. V., Potapov V. D. (1990) *Fundamentals of Elasticity and Plasticity Theory*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
27. TKP [Technical Code of Common Practice] 45-5.01-67–2007 (02250). *Slab Foundations. Design Rules*. Minsk, Publishing House of Ministry of Construction and Architecture, 2008. 140 (in Russian).
28. Abramyan B. L., Aleksandrov V. M., Amenzade Yu. A., Aramanovich I. G., Babeshko V. A., Belokon' A. V., Bondareva V. F., Borodachev N. M., Vorovich I. I., Druyanov B. A., Galin L. A. (ed.) (1976) *Development of Contact Problem Theory in USSR*. Moscow, Nauka Publ. 496 (in Russian).

Received: 01.06.2018

Accepted: 15.08.2018

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-465-470>

УДК 624.21.012

Конструкция плиты для сборных дорожных покрытий

Канд. техн. наук, доц. С. И. Зиневич¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Опыт эксплуатации сборных бетонных покрытий при интенсивном движении тяжелых автомобилей показал, что, несмотря на высокую прочность самих бетонных плит, под них необходимы прочные основания. При непосредственной укладке бетона на грунт в нем в результате нажимов упруго прогибающихся при проходах автомобилей плит накапливаются остаточные деформации, что приводит к образованию под плитой пустот, а в самой плите – трещин. Для увеличения жесткости плиты (уменьшения ее осадок при проезде транспорта) автором предложено устраивать плиты с двумя продольными ребрами, а сами плиты укладывать на рыхлый, перемешанный с цементом грунт. Ребра следует размещать на полосах наката, т. е. симметрично относительно продольной оси плиты, на расстоянии друг от друга, равном расстоянию между колесами расчетного автомобиля на одной оси. С целью определения зависимости жесткости плиты от формы и размеров поперечного сечения продольных ребер выполнены расчеты с использованием метода конечных элементов на ПК «Лира». Конечно-элементная модель плиты включала 19152 узла и 18943 конечных элемента. Упругое основание моделировалось упругими вертикальными связями, находившимися в каждом нижнем узле. Плита загружалась нагрузкой, эквивалентной нагрузке от колеса расчетного автомобиля в четырех точках: колесо посередине плиты; колесо на углу плиты; два колеса одновременно на линии, перпендикулярной продольной оси плиты и находящейся в начале (или конце) плиты; два колеса одновременно на линии, перпендикулярной продольной оси плиты и проходящей через ее центр. Вначале при одинаковой площади поперечного сечения продольного ребра исследовались следующие его формы: треугольная, овальная (полукруг) и прямоугольная. Наиболее оптимальной формой, с точки зрения увеличения жесткости плиты, оказалась треугольная. Перепады высот у такой плиты при воздействии нагрузки наименьшие. Так, по сравнению с типовой плитой (без продольных ребер) наличие продольных ребер треугольного поперечного сечения увеличивает жесткость плиты в среднем на 50 % в зависимости от места положения расчетного колеса на плите (39–64 %). После определения оптимальной формы поперечного сечения продольного ребра найдена зависимость жесткости плиты от высоты продольных треугольных ребер. При постоянных объеме плиты и размере основания ребра 32 см (примерная ширина колеса расчетного автомобиля) изменялись высота ребра и толщина плиты. В результате проведенных расчетов получена зависимость жесткости плиты от высоты продольного ребра. Для данного объема и размеров плиты определено, что оптимальной высотой ребра является 25 см.

Ключевые слова: сборное покрытие, плита, основание, продольное ребро, метод конечных элементов

Для цитирования: Зиневич, С. И. Конструкция плиты для сборных дорожных покрытий / С. И. Зиневич // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 465–470. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-465-470>

Plate Design for Prefabricated Pavements

S. I. Zinevich¹⁾

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

Abstract. Experience in the operation of prefabricated concrete pavements with intensive traffic of heavy vehicles has shown that despite a high strength of the concrete slabs themselves it is necessary to arrange strong foundations. While laying concrete on the ground residual deformations are accumulating in it due to pressures which are initiated by elastically bending plates when vehicles are passing that leads to formation of voids under the plate and cracks in the plate itself. In order

Адрес для переписки

Зиневич Сергей Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Zinevich Siarhei I.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

to increase rigidity of the plate (reduction of its settlement during the passage of vehicles) the author has proposed to arrange plates with two longitudinal ribs, and the plates themselves are to be laid on loose soil mixed with cement. The ribs are proposed to be placed on roll bars, i. e. symmetrically with respect to a longitudinal axis of the plate at a distance from each other which is equal to the distance between wheels of the calculated vehicle on one axis. In order to determine dependence of plate rigidity on a shape and a size of a cross section in longitudinal ribs calculations have been made while using a PC "Lira" and a finite element method. A finite element model of the plate has included 19152 nodes and 18943 finite elements. An elastic foundation has been modeled by vertical elastic links which are in every bottom node. The plate has been loaded with a load which is equivalent to the load from a calculated vehicle wheel at four points: a wheel in the middle of the plate; a wheel on the corner of the plate; two wheels at the same time on the line which is perpendicular to the longitudinal axis of the plate and located at the beginning (or end) of the plate; two wheels at the same time on the line which is perpendicular to the longitudinal axis of the plate and passing through its center. The following forms of a longitudinal rib having the same cross-sectional area have been studied at the beginning: triangular, oval (semicircle) and rectangular. In the context of plate rigidity increase the most optimal form has been a triangular shape. Height differences in such a plate are the least in case of load action. So, for example, in comparison with a typical plate (plate without longitudinal ribs), presence of longitudinal ribs of triangular cross – section increases plate rigidity by an average of 50 % depending on the location of the calculated wheel on the plate (39–64 %). After determining an optimal shape of cross section for longitudinal ribs the dependence has been found for plate rigidity and it depends on a height of longitudinal triangular ribs. While having a constant volume of the plate and a constant a size of the rib base (32 cm) (approximate width of a calculated vehicle wheel) a rib height and a plate thickness have been changed. The calculations have made it possible to determine dependence of the plate rigidity on a height of a longitudinal rib. It has been determined that as for the given volume and dimensions of the plate the optimal rib height is 25 cm.

Keywords: prefabricated pavement, plate, base, longitudinal rib, finite element method

For citation: Zinevich S. I. (2018) Plate Design for Prefabricated Pavements. *Science and Technique*. 17 (6), 465–470. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-465-470> (in Russian)

Введение

В последнее время в Республике Беларусь строится мало дорог со сборным бетонным покрытием, несмотря на то что устройство такого типа покрытия может осуществляться круглогодично. Есть и другие плюсы сборных покрытий, например движение транспорта открывается сразу после укладки плит, а не после набора прочности бетоном, как в случае монолитного бетонного покрытия. Это имеет большое значение при реконструкции и капитальном ремонте дорог, когда закрытие движения на длительный срок приводит к значительным экономическим потерям [1, 2]. Немаловажно также и то, что ремонт сборных покрытий может выполняться по типу ремонта тротуаров из бетонной плитки, т. е. заменой дефектных плит на новые.

В настоящее время, по мнению автора, сборные бетонные покрытия в Республике Беларусь приобретают особую актуальность, поскольку руководством страны поставлена задача за три-четыре года повысить качество сети местных дорог, протяженность которых составляет более 71 тыс. км. В значительной степени такие покрытия будут востребованы на участках небольшой протяженности, какими являются подъезды к агрогородкам и малым

деревням. На этих участках разворачивать бетоноукладочные комплексы экономически невыгодно, проще и быстрее уложить готовые плиты.

Опыт эксплуатации бетонных покрытий показал, что, несмотря на высокую прочность самих бетонных плит, под них необходимы прочные основания. При непосредственной укладке бетона на грунт в нем в результате нажимов упруго прогибающихся при проходах автомобилей плит накапливаются остаточные деформации. Вначале под плитами образуются полости, и плиты теряют контакт с грунтом, а затем в них появляются трещины. Поэтому на дорогах с высокой интенсивностью движения бетонные покрытия укладывают на прочные основания [3, 4]. Устройство прочных оснований значительно повышает стоимость дороги.

Для увеличения жесткости плиты (уменьшения ее осадок при проезде транспорта) автором предложено устраивать плиты с двумя продольными ребрами, а сами плиты укладывать на рыхлый, перемешанный с цементом грунт. Ребра следует располагать на полосах наката, т. е. симметрично относительно продольной оси плиты на расстоянии друг от друга, равном расстоянию между колесами расчетного автомобиля на одной оси (рис. 1).

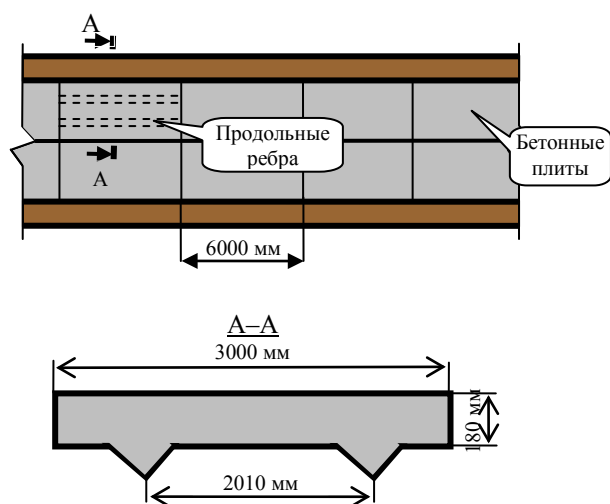


Рис. 1. Поперечный разрез плиты с продольными ребрами

Fig. 1. Cross-section of plate with longitudinal ribs

Цель исследований – проверить эффективность указанных продольных ребер для увеличения жесткости плит и в случае их эффективности определить оптимальную форму и размеры их поперечного сечения.

Проведение расчета

С целью определения зависимости жесткости плиты от наличия формы и размеров поперечного сечения продольных ребер использовался метод конечных элементов [5, 6]. Конечно-элементная модель плиты включала 19152 узла и 18943 конечных элемента типа параллелепипеда и треугольной призмы. Упругое основание моделировалось упругими вертикальными связями, находящимися в каждом нижнем узле [7, 8]. Жесткость каждой связи находили по формуле [9, 10]

$$R = \frac{E_0 \sqrt{F}}{K(1 - \nu_0^2)N},$$

где E_0 , ν_0 – усредненный модуль упругости и коэффициент Пуассона цементогрунта; N – число нижних узлов конечно-элементной модели; K – коэффициент, для плиты размерами 6×3 м, согласно [7] принят равным 0,9; F – площадь нижней поверхности плиты.

Рассчитывалась железобетонная плита размерами в плане 3000×6000 мм и толщиной 180 мм, изготовленная из бетона марки по морозоустойчивости F150 с ненапрягаемой арматурой. В качестве основания рассматривался цементогрунт. Нагружалась плита колесом расчетного автомобиля в виде гибкой квадратной нагрузки эквивалентной площади круга диаметром 0,41 м. Величина равномерно распределенной нагрузки 0,60 МПа.

Для определения оптимальной формы поперечного сечения продольного ребра исследовали следующие его формы: прямоугольную, овальную (полукруг) и треугольную (рис. 1). Площадь поперечного сечения ребра во всех случаях была одинаковой.

Рассматривали четыре схемы загрузки плиты:

- 1) штамп приложен посередине плиты (рис. 2а);
- 2) штамп приложен на углу плиты (рис. 2б);
- 3) два штампа приложены одновременно на линии, перпендикулярной продольной оси плиты и находившейся в начале (или конце) плиты (рис. 2с);
- 4) два штампа приложены одновременно на линии, перпендикулярной продольной оси плиты и проходившей через ее центр (рис. 2д).

Расчеты выполнены на ПК «Ли́ра». При обработке результатов жесткость плит при воздействии нагрузки оценивалась по перепаду высот их поверхности. Кроме того, жесткость плит с ребрами сравнивалась с жесткостью обычной плиты, т. е. не имеющей продольных ребер.

Полученные результаты представлены в табл. 1, из которой видно, что наиболее оптимальной формой поперечного сечения продольных ребер, с точки зрения увеличения жесткости плиты, является треугольная. Перепады высот у такой плиты оказались наименьшими. По сравнению с плитой без продольных ребер жесткость увеличивается на 39–64 % в зависимости от схемы нагружения.

Вертикальные перемещения плиты с продольными ребрами треугольного поперечного сечения и плиты, не имеющей продольных ребер, например при схеме нагружения 1, приведены на рис. 3.

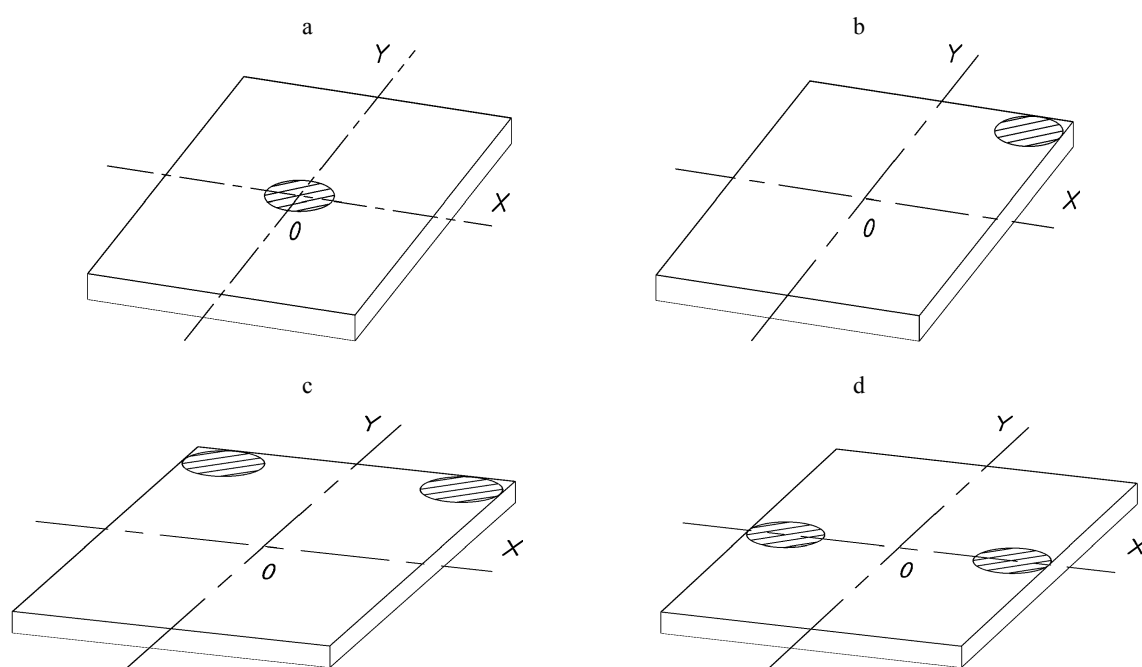


Рис. 2. Схемы загрузки плиты

Fig. 2. Diagrams of plate loading

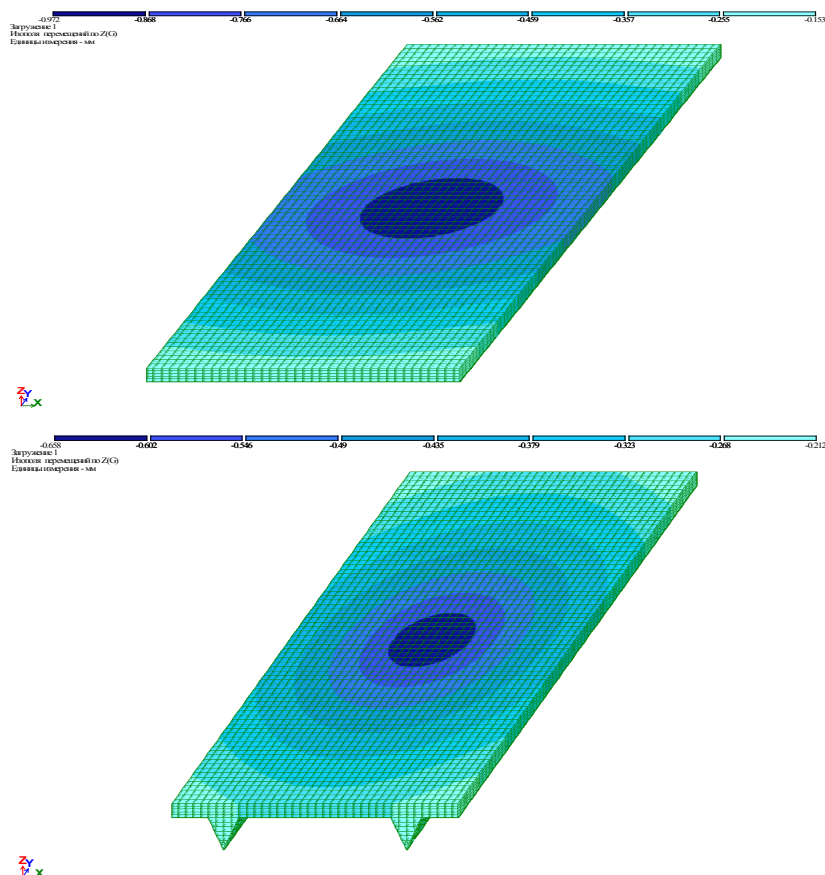


Рис. 3. Вертикальные перемещения плиты

Fig. 3. Vertical plate displacement

После определения оптимальной формы поперечного сечения продольного ребра найдена зависимость жесткости плиты от высоты продольных треугольных ребер. При постоянных объеме плиты и размере основания ребра 32 см (примерная ширина колеса расчетного автомобиля) изменялись высота ребра и толщина плиты.

В результате проведенных расчетов получена зависимость жесткости плиты от высоты продольного ребра, представленная на рис. 4.

Руководствуясь графиком рис. 3, для данного объема и размера плиты оптимальной высотой поперечного сечения продольного ребра можно считать 25 см. При других геометрических размерах плиты результаты могут быть иными.

Таблица 1

Перепад высот поверхности различных типов плит под нагрузкой
Height difference in plates of various types under loading

Схема нагружения плиты	Форма поперечного сечения продольных ребер	Деформация плиты			
		Максимальное значение	Минимальное значение	Перепад высот	Увеличение жесткости плиты, %
1	Без ребер	-0,972	-0,1530	0,8119	0
	Прямоугольная	-0,827	-0,3000	0,5270	35
	Овальная	-0,717	-0,2250	0,4920	39
	Треугольная	-0,658	-0,2120	0,4460	45
2	Без ребер	-4,410	-0,1710	4,2390	0
	Прямоугольная	-3,300	-0,0345	3,2660	29
	Овальная	-2,820	-0,0377	2,7820	34
	Треугольная	-2,600	-0,0330	2,5670	39
3	Без ребер	-4,070	-0,0590	4,0110	0
	Прямоугольная	-2,930	-0,0807	2,8490	29
	Овальная	-2,430	-0,0875	2,3430	42
	Треугольная	-2,000	-0,00141	1,9990	50
4	Без ребер	-1,610	-0,0104	1,5990	0
	Прямоугольная	-1,160	-0,3100	0,8500	47
	Овальная	-0,955	-0,2390	0,7160	55
	Треугольная	-0,793	-0,2150	0,5780	64

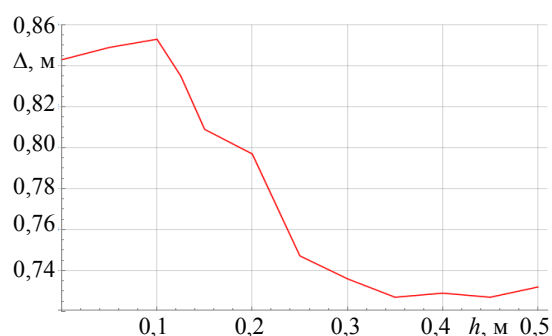


Рис. 4. Зависимость перепада высот поверхности плиты Δ от высоты поперечного сечения продольного ребра h при схеме нагружения 1

Fig. 4. Dependence in height difference of plate surface Δ on height of longitudinal rib cross-section h according to diagram of loading 1

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований жесткости плиты с продольными ребрами раз-

личного поперечного сечения и сравнения ее с жесткостью плиты, не имеющей продольных ребер, установлено, что наличие продольных ребер увеличивает жесткость плиты в среднем на 50 %. Наиболее оптимальной формой поперечного сечения продольных ребер является треугольная. Перепады высот у такой плиты наименьшие. По сравнению с плитой без продольных ребер жесткость увеличивается на 39–64 % в зависимости от схемы нагружения. Для данного объема и размера плиты оптимальной высотой поперечного сечения продольного ребра можно считать 25 см.

2. При других геометрических размерах плиты результаты могут быть иными. В дальнейшем целесообразно получить зависимость жесткости плиты, имеющей продольные ребра, от ее геометрических размеров, а также установить, как влияют геометрические размеры на

оптимальную высоту продольного ребра треугольного поперечного сечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабков, В. Ф. Проектирование автомобильных дорог. Ч. I / В. Ф. Бабков, О. В. Андреев. М.: Транспорт, 1979. 367 с.
2. Орловский, В. С. Проектирование и строительство сборных дорожных покрытий / В. С. Орловский. М.: Транспорт, 1978. 149 с.
3. Носов, В. П. Состояние, проблемы, перспективы применения цементобетона при строительстве автомобильных дорог / В. П. Носов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 4. С. 1–3.
4. Левицкий, Е. Ф. Бетонные покрытия автомобильных дорог / Е. Ф. Левицкий, В. А. Чернигов. М.: Транспорт, 1980. 288 с.
5. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона / С. Ф. Клованич. Одесса: Изд-во ОНМУ, 2007. 110 с.
6. Метод конечных элементов как аппарат для расчета многослойных аэродромных покрытий / А. А. Хатунцев [и др.] // Проблемы и технологии инженерно-аэродромного обеспечения войск: сб. науч. статей по матер. докладов XXIII межвузовской НПК «Перспектива-2013». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. С. 119–124.
7. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. М.: Стройиздат, 1984. 639 с.
8. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. М.: Стройиздат, 1962. 239 с.
9. Ржаницын, А. Р. Строительная механика / А. Р. Ржаницын. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.
10. Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. Минск: БНТУ, 2002. 128 с.

Поступила 06.06.2018

Подписана в печать 15.08.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Babkov V. F., Andreev O. V. (1979) *Design of Highways. Part I*. Moscow, Transport Publ. 367 (in Russian).
2. Orlovsky V. S. (1978) *Design and Construction of Prefabricated Road Pavements*. Moscow, Transport Publ. 149 (in Russian).
3. Nosov V. P. (2011) *State, Problems, Perspectives of Cement Concrete Application in the Construction of Highways* / *Nauka i Tekhnika v dorozhnoy otrasli* [Science and Technique in the road sector]. No 4. P. 1–3.
4. Levitsky E. F., Chernigov V. A. (1980) *Concrete Pavements of Highways*. Moscow, Transport Publ. 288 (in Russian).
5. Klovanych S. F. (2007) *Finite Element Method in Mechanics of Reinforced Concrete*. Odessa, Publishing House of Odessa National Maritime University. 110 (in Russian).
6. Khatuntsev A. A., Popov A. N., Makarov E. V., Burakov A. V. (2013) Finite Element Method as Apparatus for Calculating Multilayer Airfield Pavements. *Problems and Technologies of Engineering and Airfield Support of Troops: Collection of Scientific Papers of XXIIIrd Interuniversity Scientific and Practical Conference "Perspective-2013"*. Voronezh, Publishing House of Air Force Military Educational and Scientific Centre "Air Force Academy", 119–124 (in Russian).
7. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on Elastic Foundation*. Moscow, Publishing House Stroyizdat. 639 (in Russian).
8. Zhemochkin B. N., Sinitsyn A. P. (1962) *Practical Calculation Methods of Foundation Beams and Plates on Elastic Foundation*. Moscow, Publishing House Stroyizdat. 239 (in Russian).
9. Rzhanytsyn A. R. (1991) *Structural Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 439 (in Russian).
10. Bosakov S. V. (2002) *Static Calculations of Slabs on Elastic Foundation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 128 (in Russian).

Received: 06.06.2018

Accepted: 15.08.2018

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-471-477>

УДК 624.138; 004.42

Определение предельного сопротивления дилатирующего грунта сдвигу при помощи искусственных нейронных сетей

Кандидаты техн. наук, доценты О. В. Попов¹⁾, Ю. Б. Попова¹⁾, инж. С. В. Яцынович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Современные геотехнические технологии изготовления свай позволяют решать многие инженерные задачи в строительстве со значительным экономическим эффектом и сокращением сроков ведения работ. Однако теоретическое обоснование данных технологий значительно отстает от их практического использования. Фактор стесненной дилатансии является основным резервом несущей способности свай в несвязных грунтах. Его понимание открывает путь к совершенствованию геотехнических технологий изготовления свай, обеспечивающих активное воздействие на грунт основания и его предельное напряженное состояние, которое определяется соотношением сопротивления грунта сдвигу и нормальных напряжений, либо главных напряжений на площадке сдвига в момент разрушения. Определение общих нормальных напряжений в плоскости сдвига в зависимости от плотности несвязного грунта, его гранулометрического состава и условий стесненной дилатансии позволяет найти предельное сопротивление грунта сдвигу, а следовательно, и его прочность. На основании предложенной упругопластической модели дилатирующего грунта при сдвиге, реализованной согласно принятой методике в специально разработанном дилатометрическом сдвиговом приборе, получены экспериментальные данные о дополнительных дилатантных нормальных напряжениях и прочностных параметрах грунта в зависимости от его плотности, гранулометрического состава и условий стесненной дилатансии. Использование искусственных нейронных сетей при математической обработке экспериментальных данных позволило разработать аналитический метод определения предельного сопротивления несвязного грунта сдвигу в условиях стесненной дилатансии и произвести калибровку расчетных параметров принятой грунтовой модели. Доказано, что прочность грунта является функцией условий разрушения, которые определены трением и дилатансией, при этом традиционная теория прочности Кулона – Мора для несвязных грунтов справедлива как для условий свободного дилатирования, так и при стесненном сдвиге, но с учетом дополнительных нормальных дилатантных напряжений.

Ключевые слова: несвязный грунт, дилатансия, напряжения, деформации, коэффициент пористости грунта, действующий диаметр частиц грунта, коэффициент жесткости массива, сцепление, угол внутреннего трения

Для цитирования: Попов, О. В. Определение предельного сопротивления дилатирующего грунта сдвигу при помощи искусственных нейронных сетей / О. В. Попов, Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 471–477. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-471-477>

Determination of Limiting Resistance for Dilatant Soil to Shearing While Using Artificial Neural Networks

О. В. Попов¹⁾, Yu. B. Popova¹⁾, S. V. Yatsynovich¹⁾

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

Abstract. Modern geotechnical pile manufacturing technologies allow to solve many engineering problems in construction with significant economic effect and reduction of work schedule. However a theoretical justification for these technologies

Адрес для переписки

Попова Юлия Борисовна
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-53
jpopova@bntu.by

Address for correspondence

Popova Yuliya B.
Belarusian National Technical University
9 B. Khmel'nitsky str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-53
jpopova@bntu.by

is significantly lagging behind from their practical application. A constrained dilatancy factor is considered as the main reserve of pile bearing capacity in loose soils. Understanding of such approach opens a way to improvement of geotechnical pile manufacturing technologies that provide an active impact on base soil and its ultimate stress state which is determined by the ratio of soil resistance to shearing and normal stresses, or main stresses on a shear site at the moment of failure. Determination of total normal stresses in the shearing plane according to density of loose soil, its granulometric composition and constrained dilatancy conditions makes it possible to determine an ultimate resistance of the soil to shear, and, consequently, its strength. The proposed elastic-plastic model of dilatant soil in shear state being realized according to the adopted technology which was developed while using a special dilatometric shearing device has made it possible to obtain additional data on dilatant normal stresses and strength parameters of the soil depending on its density, granulometric composition and constrained dilatancy conditions. The use of artificial neural networks in the mathematical processing of experimental data has permitted to develop an analytical method for determining an ultimate resistance of loose soil to shearing process under constrained dilatancy conditions and carry out calibration of the calculated parameters of the adopted soil model. It has been proved that soil strength is a function of fracture conditions, which are determined by friction and dilatancy. In this case a conventional Coulomb-Mora strength theory for loose soils is valid both for free dilatation conditions and constrained shear but with due account of additional normal dilatant stresses.

Keywords: loose soil, dilatancy, stresses, deformations, soil porosity coefficient, effective size of soil particles, massif rigidity stiffness coefficient, grip, angle of internal friction

For citation: Popov O. V., Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2018) Determination of Limiting Resistance for Dilatant Soil to Shearing While Using Artificial Neural Networks. *Science and Technique*. 17 (6), 471–477. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-471-477> (in Russian)

Введение

Особенностью деформируемости несвязных грунтов является их способность к существенным объемным деформациям в результате развития только деформаций формоизменения при сдвиге. Для описания данного состояния грунта используют термин «дилатансия», который впервые был введен Рейнольдсом в 1885 г. В своих опытах Рейнольдс обнаружил, что плотные зернистые среды при пластическом деформировании увеличивают объем (дилатируют), в то время как рыхлосложенные, напротив, его уменьшают, т. е. контрактируют.

Современные испытания образцов грунта, проводимые в приборах прямого среза в соответствии с существующей методикой [1], направлены на определение характеристик прочности (угла внутреннего трения φ и удельного сцепления c) в условиях свободного дилатирования. Данные характеристики находят методом сдвига одной части образца относительно другой горизонтальной нагрузкой, нормальной к плоскости среза, при предварительном нагружении образца. В результате испытаний определяется предельное сопротивление грунта сдвигу τ_u , возникающее в момент разрушения образца грунта от максимальной сдвигающей нагрузки и соответствующее начальному нормальному давлению σ_0 . После проведения испытаний с несколькими образцами грунта строятся графические зависимости $\tau_u = c + \sigma_0 \tan \varphi$, по которым

вычисляются искомые прочностные характеристики.

При решении ряда геотехнических задач, например в случаях расчета несущей способности свай в несвязных грунтах, следует учитывать условия ограничения дилатансии грунта на его предельное сопротивление сдвигу, что и являлось объектом исследований.

Исследование предельного сопротивления дилатирующего грунта

Для изучения явления дилатансии и его влияния на прочность грунтов был изготовлен и запатентован dilatометрический прибор прямого сдвига [2], позволяющий моделировать напряженно-деформированное состояние грунта при разрушении в условиях стесненной дилатансии и определять предельные значения сопротивления грунта сдвигу как по обычной [1], так и по предлагаемой методике ограничения дилатансии зоны сдвига с использованием динамометрического приспособления регулируемой жесткости [3].

При проведении испытаний плотный несвязный грунт (коэффициент пористости e_0 меньше критического значения $e_{кр}$) по мере развития горизонтальных смещений каретки начинает дилатировать: вначале происходит небольшое уплотнение грунта, а затем по мере увеличения горизонтального смещения наблюдается интенсивное разрыхление. При этом

происходит подъем штампа, достигающий своего максимума при предельном сдвиге. Величина вертикальных дилатантных перемещений ограничена жесткостью динамометрического приспособления, которое моделирует отпор со стороны массива, не участвующего в процессе сдвига, на дилатансию зоны разрушения. В результате дилатансии зоны разрушения в плоскости сдвига возникают дополнительные нормальные дилатантные напряжения σ_d , которые, накладываясь на начальное нормальное давление σ_0 , определяют предельное сопротивление грунта сдвигу τ'_u [4].

В случае проведения испытаний по традиционной методике [1] (условия свободной дилатансии) предельное сопротивление несвязного грунта сдвигу, согласно закону Кулона, представлено прямой 1 на рис. 1 и определяется зависимостью

$$\tau_u = \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi. \quad (1)$$

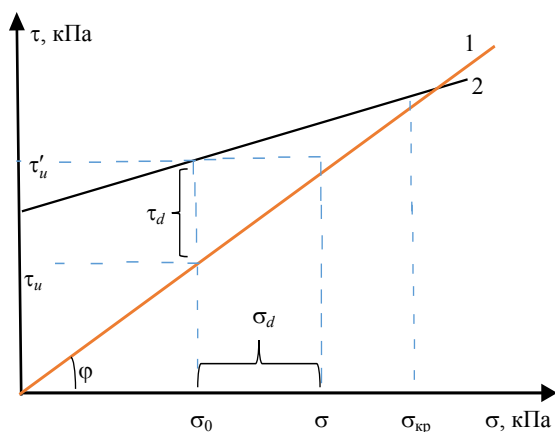


Рис. 1. Схематичные зависимости $\tau_u = f(\sigma_0)$ и $\tau'_u = f(\sigma)$

Fig. 1. Schematic dependencies $\tau_u = f(\sigma_0)$ and $\tau'_u = f(\sigma)$

Испытания в этом случае соответствуют условию действия постоянной вертикальной нагрузки на штамп прибора. При ограничении дилатансии возникает тенденция стремления начального коэффициента пористости e_0 к критическому значению $e_{кр}$ [5]. Подъем штампа вызовет увеличение вертикального давления на образец грунта за счет проявления дилатантных напряжений, величина которых определяется жесткостью дилатометрического приспособления, моделирующего упругий отпор со стороны массива. Фактическое нормальное давление в

сдвиговом приборе на момент разрушения составит

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_d, \quad (2)$$

а сопротивление грунта сдвигу определяется как

$$\tau'_u = (\sigma_0 + \sigma_d) \operatorname{tg} \varphi = \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi + \tau_d. \quad (3)$$

На рис. 1 данная зависимость схематично представлена прямой 2.

Программа испытаний несвязных грунтов в дилатометрических приборах прямого среза включала в себя испытания песков разного гранулометрического состава и плотности при различных жесткостях динамометрического приспособления, т. е. при разных моделируемых коэффициентах жесткости массива грунта. При обработке результатов сдвиговых испытаний плотных песков установлено, что в случае ограниченной дилатансии величина предельного сопротивления сдвигу должна определяться с учетом проявления дилатантных нормальных напряжений, зависящих от уровня начального нормального давления σ_0 , гранулометрического состава несвязного грунта (его действующего диаметра частиц) d_{50} , его коэффициента пористости e_0 , коэффициента жесткости массива грунта K . Пересечение прямых 1 и 2 на рис. 1 определяет величину критического начального давления $\sigma_{кр}$ на образец грунта, при котором дилатансия не проявляется, и величины дилатантных напряжений и соответствующих деформаций близки к нулю.

По результатам испытаний данное критическое нормальное давление, при котором дилатансия не наблюдается (порядка 0,7 МПа), соответствует состоянию, когда грунт до и после сдвига составляет один и тот же объем, т. е. выполняется условие критической пористости. Это свидетельствует о необходимости увязывать понятие критической пористости с напряженным состоянием грунта. Исходя из вышеизложенного, каждому начальному нормальному напряженному состоянию σ_0 соответствует определенная величина дилатантных напряжений σ_d , определяющая прирост предельного сопротивления грунта сдвигу τ_d , называемая дилатантной составляющей сдвига (рис. 1). При увеличении начального нормального дав-

ления σ_0 до критического нормального давления $\sigma_{кр}$ величины дилатантных нормальных напряжений σ_d , а следовательно, и соответствующие дилатантные составляющие τ_d , уменьшаются от своих максимальных значений до нуля. При этом угол внутреннего трения, согласно нашим экспериментам, рассматриваемый как $\varphi = \arctg(\tau'_u/(\sigma_0 + \sigma_d))$, остается практически неизменной величиной в пределах погрешности измерений.

Согласно рис. 2, при известном значении критического нормального давления $\sigma_{кр}$ величину дилатантных напряжений σ_d при заданном значении начального нормального давления σ_0 можно определить по формуле

$$\sigma_d = \sigma_{d\max} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{кр}} \right), \quad (4)$$

а величину предельного сопротивления грунта как

$$\tau_u = \left(\sigma_0 + \sigma_{d\max} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{кр}} \right) \right) \operatorname{tg} \varphi, \quad (5)$$

где $\sigma_{d\max}$ – максимальные дилатантные напряжения, определяемые эмпирическим путем по данным испытаний.

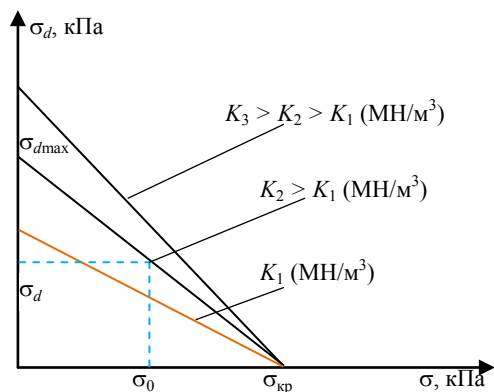


Рис. 2. Схематичная зависимость $\sigma_d = f(K, \sigma)$

Fig. 2. Schematic dependence $\sigma_d = f(K, \sigma)$

Проведенные эксперименты позволили получить таблицы значений максимальных дилатантных напряжений $\sigma_{d\max}$ для фиксированных значений действующего диаметра частиц несвязного грунта d_{50} , его коэффициента пористости e_0 и коэффициента жесткости массива грунта K . Данные таблицы предлагается использо-

вать в качестве обучающей выборки для обучения искусственной нейронной сети (ИНС). Результаты работы ИНС могут быть применены для расчета максимальных дилатантных напряжений в зависимости от указанных выше параметров.

Описание работы искусственной нейронной сети

Искусственный нейрон (ИН) имитирует в первом приближении свойства биологического нейрона [6]. На вход ИН поступает некоторое множество сигналов, каждый из которых является выходом другого нейрона. Каждый вход умножается на соответствующий вес, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона. Модель, реализующая эту идею, представлена на рис. 3. Здесь множество входных сигналов, обозначенных $x_1, x_2, \dots, x_n$, поступает на искусственный нейрон и имеет соответствующие веса $w_1, w_2, \dots, w_n$. Каждый вес отвечает «силе» одной синаптической связи. Суммирующий блок алгебраически объединяет взвешенные входы, создавая выход NET [6].

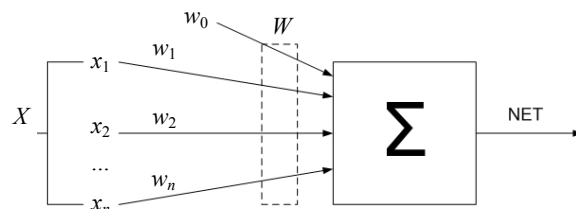


Рис. 3. Графическое представление искусственного нейрона

Fig. 3. Graphical representation of artificial neuron

Данное описание можно представить следующей формулой:

$$\text{NET} = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0,$$

где w_i – вес i -го нейрона; x_i – выход i -го нейрона; n – количество нейронов, которые входят в обрабатываемый нейрон; w_0 – bias-нейрон, или нейрон смещения.

Существует достаточно большое количество методов обучения искусственных нейронных сетей, однако для многослойных ИНС

наиболее популярным является метод обратного распространения ошибки, включающий в себя три фазы [7]:

- проведение через сеть обучающего примера (фаза прямого распространения);
- вычисление значения ошибки между полученным выходом сети и ожидаемым, на основе которого затем рассчитываются ошибки для каждого предыдущего слоя вплоть до входного (фаза обратного распространения ошибки);
- единовременная корректировка всех весов, основываясь на их текущем значении, величине ошибки, соответствующей рассматриваемому нейрону и активационному значению нейрона.

Графическое представление метода обратного распространения ошибки приведено на рис. 4 [8] для K нейронов первого слоя, M нейронов скрытого слоя и N нейронов выходного слоя.

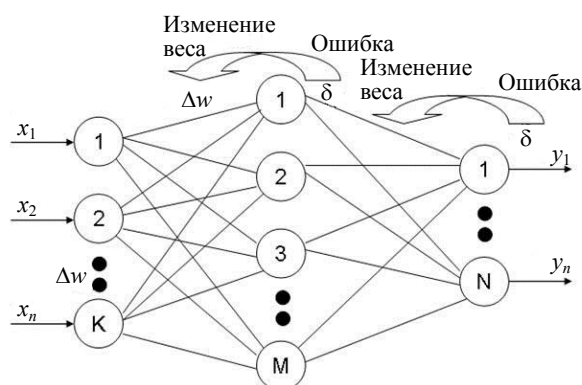


Рис. 4. Графическое представление метода обратного распространения ошибки

Fig. 4. Graphical representation of method for of back error propagation

Для решения данной задачи были выбраны: ИНС с тремя входами (диаметр частиц несвязного грунта d_{50} , коэффициент пористости несвязного грунта e_0 , коэффициент жесткости массива грунта K), два нейрона на скрытом слое и один на выходе (максимальное дилатантное напряжение σ_{dmax}). Обобщенная схема алгоритма расчета искусственного нейрона представлена на рис. 5.

Вначале алгоритм проходит по входным нейронам и вычисляет выходные значения для каждого из них. Далее алгоритм циклически переходит на расчет выходов для скрытого слоя на основе весов и ранее определенных выходов первого слоя. При вычислении выходов нейронов используется сигмоидальная функция активации.

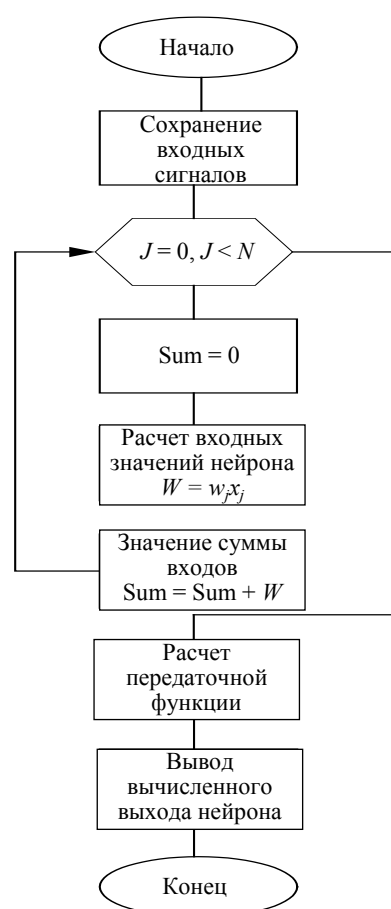


Рис. 5. Схема алгоритма расчета искусственного нейрона

Fig. 5. Scheme of algorithm for calculating artificial neuron

После работы алгоритма на выходе последнего слоя получается результат работы искусственной нейронной сети. Алгоритм обучения ИНС, реализующий описанный выше метод обратного распространения ошибки, приведен в [9, 10].

Анализ полученных результатов

Программная реализация искусственной нейронной сети была выполнена на языке JavaScript с использованием библиотек Node.js и Underscore.js. Копия экрана работы программы расчета максимального дилатантного напряжения несвязного грунта для вводимых с клавиатуры значений коэффициента жесткости массива грунта, коэффициента пористости грунта и среднего диаметра частиц грунта представлена на рис. 6. Ограничения на диапазон входных параметров получены эмпирическим путем и определены как: коэффициент жесткости массива грунта $K \in [0; 5000]$ МН/м³; коэффициент пористости несвязного грунта $e_0 \in [0; 1,3]$; диаметр частиц несвязного грунта $d_{50} \in [0,0001; 0,01]$ м.

Нейронная сеть обучена и готова к использованию

Расчет Gdmax

Расчет всех Gdmax обучающей выборки

Рассчитать

K - коэффициент жесткости массива грунта, МН/м³

1208

Gdmax - 0.19919951863101196

e - коэффициент пористости грунта

0.43

d50 - средний диаметр частиц грунта, м

0.0015

Рис. 6. Расчет максимального дилатантного напряжения несвязного грунта

Fig. 6. Calculation of ultimate dilatant stress in loose soil

Нейронная сеть обучена и готова к использованию

Расчет Gdmax

Расчет всех Gdmax обучающей выборки

№	K - коэффициент жесткости массива грунта, МН/м ³	e - коэффициент пористости грунта	d50 - средний диаметр частиц грунта, м	Gdmax - максимальное дилатантное напряжение, МН/м ²	Результат расчета	Среднеквадратичное отклонение
1	0	0.43	0.0015	0	0.016	0.00800
2	0	0.5	0.0015	0	0.014	0.00700
3	0	0.6	0.0015	0	0.012	0.00600
4	0	1	0.0015	0	0.000	0.00000
5	44	0.43	0.0015	0.047	0.028	0.00950
6	44	0.5	0.0015	0.031	0.024	0.00350
7	44	0.6	0.0015	0.022	0.020	0.00100
8	44	1	0.0015	0	0.000	0.00000
9	385	0.43	0.0015	0.14	0.147	0.00350

График

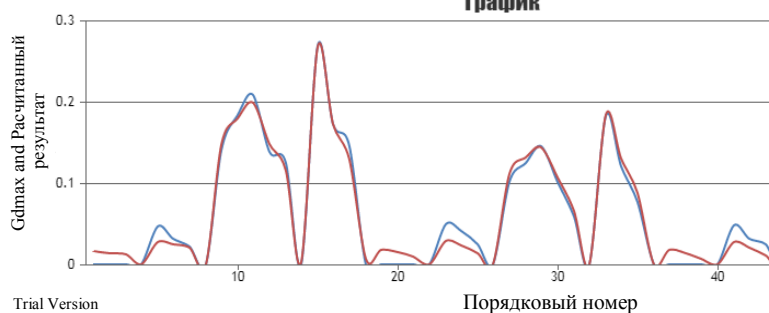


Рис. 7. Расчет напряженности грунта для обучающей выборки

Fig. 7. Calculation of soil strength for training sample

Для подтверждения работоспособности разработанной искусственной нейронной сети в предлагаемом программном продукте имеется возможность расчета ИНС на всем диапазоне обучающей выборки с расчетом среднеквадратичного отклонения и составлением графика для визуального сравнения (рис. 7). На рис. 7 синим цветом показаны эмпирические значения

σ_{dmax} , а коричневым – результаты расчета искусственной нейронной сети.

ВЫВОДЫ

1. Прочность несвязного грунта со значением коэффициента пористости, меньше критической величины, является функцией усло-

вий разрушения грунта и определяется его внутренним трением и дилатансией.

2. При определении предельного сопротивления несвязного грунта сдвигу следует учитывать изменение нормального давления в плоскости разрушения вследствие дилатансии. Новое напряженное состояние определяется соотношением предельного сопротивления грунта сдвигу к суммарным нормальным напряжениям в момент разрушения.

3. Статистическая обработка результатов сдвиговых испытаний несвязных грунтов в условиях стесненной дилатансии с использованием искусственных нейронных сетей позволяет с достаточно высокой точностью определять дополнительные нормальные дилатантные напряжения в плоскости разрушения в зависимости от действующего диаметра частиц несвязного грунта, его начального коэффициента пористости, упругого отпора со стороны массива грунта на дилатансию зоны сдвига, начального нормального давления и геометрических размеров плоскости сдвига.

4. Фактор стесненной дилатансии является главным резервом повышения несущей способности свай, его понимание открывает путь к совершенствованию современных геотехнических технологий изготовления свай, обеспечивающих активное и целенаправленное воздействие на грунт околосвайного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформированности: ГОСТ 12248–2010. М.: Стандартинформ, 2012. 78 с.
2. Устройство для определения контактного сопротивления сдвигу сыпучих материалов: а. с. 1491143 СССР / Д. Ю. Соболевский, О. В. Попов. 1989.
3. Соболевский, Д. Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д. Ю. Соболевский. Минск: Навука і тэхніка, 1994. 232 с.
4. Соболевский, Д. Ю. О сдвиговой осадке и боковом трении по стволам свай в песках / Д. Ю. Соболевский, О. В. Попов // Механизир. безотход. технол. возведения свайных фундаментов из свай завод. готовности. Владивосток, 1988. С. 97–99.
5. Герсевич, Н. М. Основы механики грунтов и их практические приложения / Н. М. Герсевич, Д. Е. Польшин. М.: Стройиздат, 1948. 248 с.
6. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика / Ф. Уоссермен. М.: Мир, 1992. 184 с.
7. Парадигмы обучения нейронных сетей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://apsheronk.bozo.ru/Neural/Lec3.htm>. Дата доступа: 10.05.2017.

8. Попова, Ю. Б. Обучение искусственных нейронных сетей методом обратного распространения ошибки [Электронный ресурс] / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович. Режим доступа: <http://www.bntu.by/news/67-conference-mido/4860-2016-11-18-15-47-40.html>. Дата доступа: 01.08.2017.
9. Попова, Ю. Б. Реализация искусственной нейронной сети для управления виртуальными объектами / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 4. С. 72–78.
10. Попова, Ю. Б. Моделирование и программная реализация искусственной нейронной сети / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под общ. ред. А. А. Большакова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. Т. 12. Ч. 1. С. 168–171.

Поступила 11.07.2018

Подписана в печать 18.09.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Soils. Laboratory Methods for Determining the Strength and Strain Characteristics: GOST [All-Union State Standard] 12248–2010. Moscow, Standartinform, 2012. 78 (in Russian).
2. Sobolevsky D. Yu., Popov O. V. (1989) Device for Determination the Contact of Resistance to Bulk Material Displacement. Inventor's Certificate No 1491143 USSR (in Russian).
3. Sobolevsky D. Yu. (1994) Strength and Bearing Capacity of Dilatant Soil. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 232 (in Russian).
4. Sobolevsky D. Yu., Popov O. V. (1988) On Contact Settlement and Lateral Friction Along Pile Shafts in Sand Soil. Mechanized Non-Waste Technology for Creation of Pile Foundation. Vladivostok, 97–99 (in Russian).
5. Gersevanov N. M., Polshin D. E. (1948) Fundamentals of Soil Mechanics and its Practical Application. Moscow, Publishing House Stroyizdat. 248 (in Russian).
6. Wasserman F. (1989) Neural Computing: Theory and Practice. Coriolis Group. 230.
7. Training Paradigms for Neural Networks. Available at: <http://apsheronk.bozo.ru/Neural/Lec3.htm>. (Accessed 10 May 2017) (in Russian).
8. Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2017) Training for Artificial Neural Networks While Using Back-Prop Method. Available at: <http://www.bntu.by/news/67-conference-mido/4860-2016-11-18-15-47-40.html>. (Accessed 1 August 2017) (in Russian).
9. Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2017) Software Implementation of the Artificial Neural Network for Virtual Objects Control. Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Informatics, (4), 72–78 (in Russian).
10. Popova Yu. B., Yatsynovich S. V. (2017) Simulation and Programming Realization of Artificial Neural Network. Matematicheskiye Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh. Sb. tr. Mezhdunar. Nauch. Konf. T. 12, Ch. 1 [Mathematical Methods for Equipment and Technologies. Collected Papers of International Scientific Conference. Vol. 12. Part. 1]. Saint-Petersburg, Publishing House of Polytechnical University, 168–171 (in Russian).

Received: 11.07.2018

Accepted: 18.09.2018

Published online: 30.11.2018

Берегозащитные сооружения откосного типа на водохранилищах Беларуси и причины их деформаций

Докт. техн. наук, доц. В. Е. Левкевич¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. На основании обследования сооружений берегозащиты более чем по 100 водохранилищам страны выполнена оценка современного состояния различных видов креплений с выявлением причин их разрушений и масштабов деформаций. В статье приведены результаты натурных наблюдений за берегозащитными сооружениями откосного типа, применяемыми на водохранилищах Беларуси. Наиболее распространенные крепления берегов и откосов – крепления в виде железобетонных монолитных либо сборных плит. Определено, что деформации креплений откосов представлены раскрытием межплиточных строительных, температурных и осадочных швов (зарегистрирована ширина раскрытия до 0,35 м), которые развиваются под комплексным воздействием ветрового волнения, колебания уровней и других факторов. В последующем деформации обнажившихся швов ведут к разрушению крепления. Деформация откосов в ряде случаев достигает значительных величин: линейная переработка (разрушение) откосов до 24,20 м, объем размывов до 4,25 м³/м пог. Физическое моделирование деформаций откосов, выполненное в гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета на моделях грунтовых подпорных сооружений, защищенных железобетонным креплением с различной шириной раскрытия швов, позволило установить динамику и масштабы развития деформаций откоса при воздействии волнового и уровня режимов, имеющих различные параметры. Данные натурных обследований креплений дали возможность выполнить оценку состояния покрытий откосов при разных сроках эксплуатации подпорных сооружений. В статье приведены причины и факторы, влияющие на устойчивость креплений. Результаты натурных и лабораторных исследований устойчивости креплений позволили установить влияние на развитие деформаций различных причин, к которым относятся: наличие в принятых расчетных проектных схемах и зависимостях определения параметров креплений объективных неточностей и допущений; отсутствие полноты учета условий волнообразования и уровня режима водохранилищ; в исходных данных и материалах изысканий не всегда достоверно представлена информация о грунтовых условиях строительства объекта берегозащиты; технологические отклонения при строительстве сооружений и их креплений. Установлено, что одной из характеристик, определяющих динамическую устойчивость берегов и откосов сооружений в условиях водохранилищ Беларуси, наряду с вышеприведенными причинами, является состав размываемого грунта, характеризуемый, в частности, коэффициентом неоднородности несвязного грунта. Выявленный в процессе исследования устойчивости креплений эффект самоотмокания, образующейся при разрушении берега, сложенного несвязными грунтами с повышенной неоднородностью, позволил предложить способ крепления откосов и берегов. На основе данных натурных исследований и лабораторных экспериментов получены эмпирические зависимости для расчета профиля динамического равновесия с самоотмоканием двух типов. Предложен расчет комбинированного крепления откосов, состоящий из каменной отсыпки и синтетических фильтрующих материалов повышенной прочности.

Ключевые слова: крепление откоса, водохранилище, берег, деформация, абразия, переработка, профиль динамического равновесия, линейное отступление берега, объем размыва, самоотмокание, самоукрепление, каменная наброска

Для цитирования: Левкевич, В. Е. Берегозащитные сооружения откосного типа на водохранилищах Беларуси и причины их деформаций / В. Е. Левкевич // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 478–488. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-478-488>

Адрес для переписки

Левкевич Виктор Евгеньевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-71-74
levkevich@bntu.by

Address for correspondence

Levkevich Victor E.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-71-74
levkevich@bntu.by

Slope Protection Structures at Water Reservoirs in Belarus and Causes of their Deformations

V. E. Levkevich¹⁾

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

Abstract. Assessment of the current state in respect of various bank stabilization with identification of causes of their destruction and deformation scale has been carried out on the basis of the survey pertaining to coastal protection structures in more than 100 reservoirs of the country. The paper presents results of field observations on bank slope protection structures which are used at water reservoirs in Belarus. It has been established that the most common protection of banks and slopes is strengthening in the form of reinforced concrete monolithic or prefabricated slabs. It has been determined that deformations of slope protection are represented by opening of tile-to-tile construction, temperature and settlement joints (it has been recorded opening width of 0.35 m) which develop under a complex impact of wind waves, fluctuations in levels and other factors. Subsequently deformations of exposed joints lead to destruction of the protection. Value of slope deformations reaches in some cases rather significant extent: linear processing (destruction) of slopes – up to 24.20 m; volume of erosion – up to 4.25 m³/m running. Physical modeling of slope deformations carried out at a hydro-technical laboratory of the Belarusian National Technical University while using models of ground retaining structures protected by reinforced concrete strengthening with various opening width of joints has allowed to determine dynamics and scope of slope deformations due to the influence of wave and level regimes having various parameters. Data of on-site investigations on protection have made it possible to assess the state of slope paving for various operational periods of retaining structures. The paper presents reasons and factors that affect the protection stability. The results of on-site and laboratory investigations on protection stability have permitted to determine that the following reasons influence on the development of deformations: presence of objective inaccuracies and assumptions in the accepted calculated design schemes and dependencies for determination of protection parameters; lack of completeness in registration of conditions for wave formation and level regime of reservoirs; initial data and survey materials do not always provide true information about ground conditions for construction of bank protection facility; technological deviations while constructing structures and their protection. It has been ascertained that one of the characteristics determining a dynamic stability of banks and slopes in structures under conditions of the reservoirs in Belarus along with the above reasons is a composition of the eroded soil characterized, in particular, by a inhomogeneity coefficient of loose soil. A self-pavement effect identified during the study of protection stability and formed during destruction of a bank composed of loose soils with increased heterogeneity has made it possible to propose a method for protecting slopes and banks. On-site investigations and laboratory experiments have permitted to obtain empirical relationships for calculation of dynamic equilibrium profile with self-pavement of two types. The paper provides a calculation for combined slope protection consisting of rockfill and synthetic filter materials of increased strength.

Keywords: slope protection, reservoir, bank, deformation, abrasion, processing, dynamic equilibrium profile, linear bank retreat, erosion volume, self-pavement, self-reinforcement, rock rip-rap

For citation: Levkevich V. E. (2018) Slope Protection Structures at Water Reservoirs in Belarus and Causes of their Deformations. *Science and Technique*. 17 (6), 478–488. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-478-488> (in Russian)

Введение

Защита берегов водохранилищ, а также верховых откосов дамб и плотин осуществляется с помощью различных берегозащитных сооружений – креплений, которые по характеру взаимодействия с волновым потоком подразделяются на активные и пассивные.

Активные типы сооружений – волноломы, молы, а также искусственные намытые или отсыпанные пляжи. Кроме того, к этому типу креплений относится биологическое крепление откосов в виде залужения или посадки высшей древесной растительности, преимущественно лиственных быстрорастущих пород (ивы, лозы, черемухи черной и др.) [1–3].

Пассивные типы берегозащитных сооружений [1–3] представлены волнобойными стенка-

ми и откосными креплениями с закреплением верхового откоса каменной наброской, мощением (сборным железобетонным и монолитным бетонным).

В статье приведены результаты исследований состояния эксплуатируемых в стране берегозащитных сооружений только пассивного типа, причем лишь откосного крепления из железобетонного покрытия, рассмотрены причины развития деформаций креплений и альтернативные типы креплений из естественного валунного материала.

Основная часть

Обследование креплений берегов и откосов водохранилищ Беларуси показало, что большинство из них с течением времени начина-

ют деформироваться и разрушаться. Наиболее распространены бетонные и железобетонные крепления. Основными причинами повреждений бетонных креплений являются: слабое уплотнение швов, некачественное выполнение бетонных работ и подготовки, низкий уровень эксплуатации, что ведет к раскрытию швов, выносу грунта из-под плит и последующему разрушению покрытий. Общая длина укрепленных берегов и берегоукрепительных сооружений на водохранилищах Беларуси составляет около 250 км. Длина поврежденных и разрушенных берегоукрепительных конструкций и сооружений, по данным натурных обследований автора, проведенных в 2013–2016 гг., около 110 км, что составляет примерно 50 % протяженности всех креплений [4, 5].

Дамбы обвалования – самый распространенный тип берегозащитных сооружений в Беларуси. Они часто используются в качестве защитного мероприятия от затопления на водохранилищах русловой формы (водохранилища Вилейское, Заславское, Дрозды, Солигорское, Красная Слобода) или при строительстве водных объектов наливного типа (водохранилища Малые Автюки, Загатье, Смолевичское, Коммунар и т. д.). Высота дамб обвалования редко превышает 5–7 м.

В качестве защитного мероприятия от развития эрозионных процессов в практике отечественной берегозащиты применяются также крепления откосного типа различных конструкций [3–6] (рис. 1).

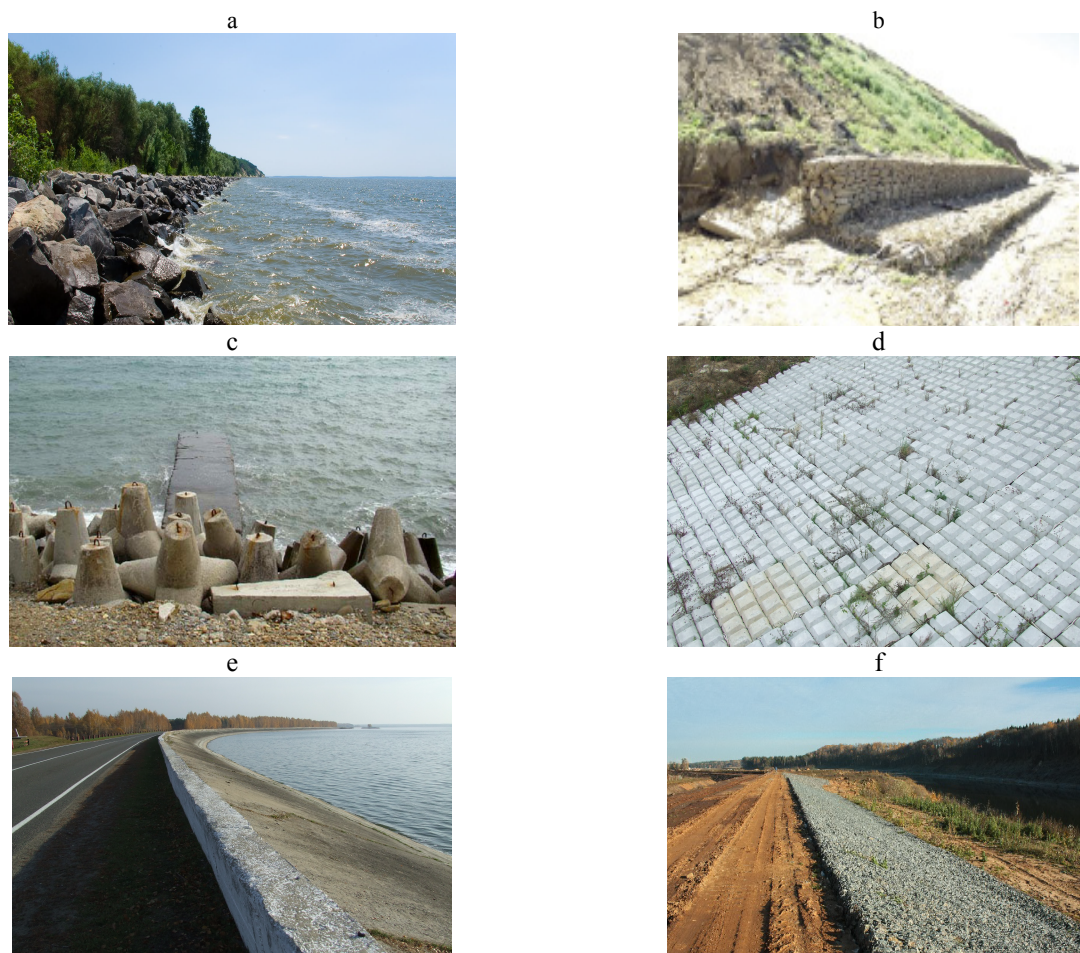


Рис. 1. Примеры крепления откосов: а – каменная отсыпка; б – подпорная стенка; в – крепление железобетонными тетраподами; д – гибкое железобетонное крепление откоса; е – крепление откоса плитами; ф – комбинированное крепление откоса камнем и металлической сеткой

Fig. 1. Examples of slope protection: а – rockfill; б – retaining wall; в – protection with reinforced tetrapod; д – flexible reinforced slope protection; е – slope protection with slabs; ф – combined slope protection with stone and metal mesh

На основе сведений натурных обследований сооружений, лабораторных исследований, а также опубликованных материалов автором выполнено обоснование конструктивных решений по креплению верховых откосов дамб и плотин, наиболее часто применяемых в условиях водохранилищ Беларуси. Предлагается использовать конструкции креплений, приведенных в работах Е. М. Левкевича, Н. В. Сурмы, Х. Р. Молеро, А. П. Чеплашкина, С. С. Агалакова, И. Г. Бельченко, М. В. Чукубаева, С. С. Чукубаевой, Б. В. Глазырина, которые отличаются конструктивными особенностями, себестоимостью и эффективностью. Такие крепления рекомендуются к практическому использованию в условиях Беларуси (рис. 2).

Обобщение и анализ материалов, полученных в результате обследования более чем 100 водохранилищ страны [4, 5], показали, что крепления в период эксплуатации подвержены деформациям, в результате чего происходят местные размывы их верховых откосов, обусловленные различными причинами. К последним относятся:

– наличие в принятых расчетных проектных схемах и зависимостях определения параметров креплений объективных неточностей и допущений;

– отсутствие полноты учета условий волнообразования и уровня режима водохранилищ;

– в исходных данных и материалах изысканий не всегда достоверно представлена информация о грунтовых условиях строительства объекта берегозащиты;

– технологические отклонения при строительстве сооружений и их креплений.

Приведенные причинно-следственные условия ведут к развитию деформаций откосов и их креплений. Деформация откосов в ряде случаев достигает значительных величин: линейная переработка (разрушение) откосов S_t до 24,20 м, объем размывов Q_t до 4,25 м³/м пог. Сведения о масштабах размывов и деформаций верховых откосов дамб и плотин [4, 5] приведены в табл. 1.

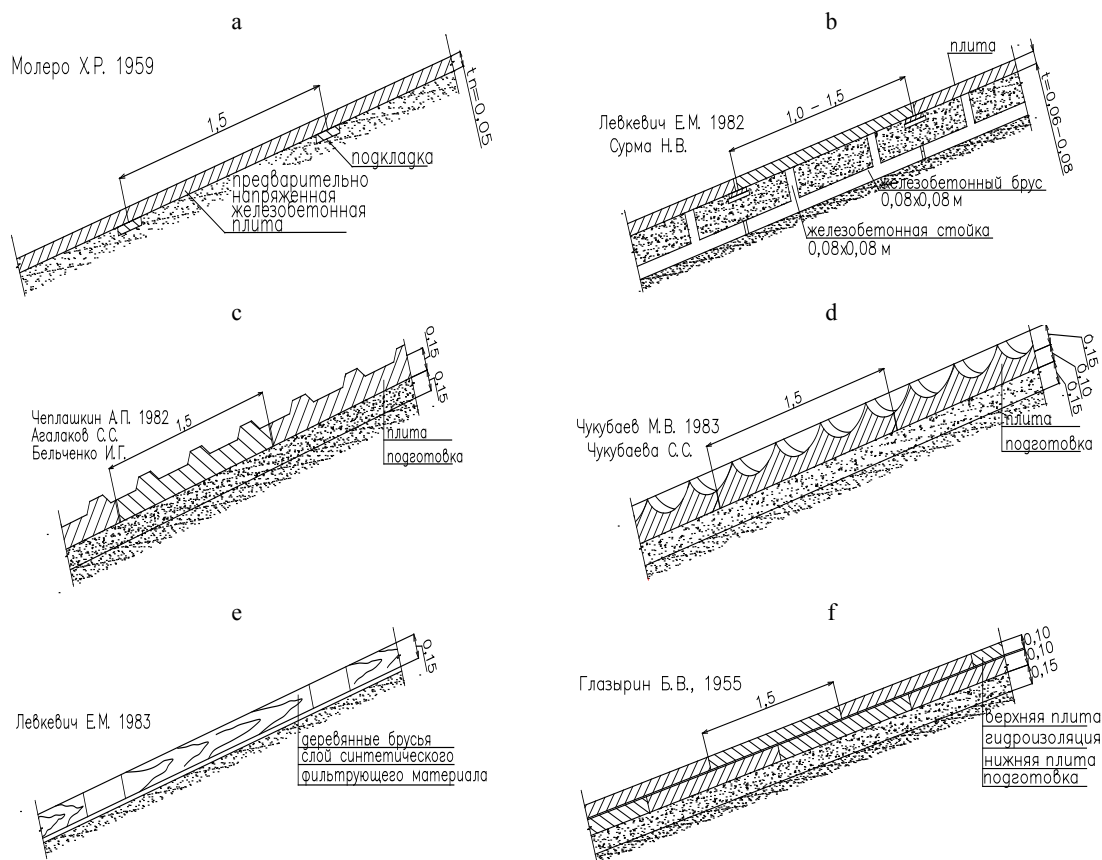


Рис. 2. Крепления, рекомендуемые для условий Беларуси

Fig. 2. Protection recommended for conditions of Belarus

Таблица 1

Деформации верховых откосов дамб и плотин
Deformations of upper slopes in dikes and dams

Название водохранилища	Длина участка размыва $L_{абр}$, м	Объем переработки верхового незакрепленного откоса Q_t , $м^3/м$ пог.	
Краснослободское	700	5,90	2,26
Солигорское	4500	6,20	2,22
Локтыши	650	6,70	2,46
Погост	500	8,50	4,25
Любашевское	450	5,50	2,19
Большие Орлы	650	7,30	1,51
Бобруйковское	250	2,50	0,31
Головчицкое	300	4,50	1,08
Загатье	500	5,00	0,50
Коммунар	350	2,00	0,30
Малые Автюки	450	3,00	0,90
Красный Боец	300	8,00	2,64
Судково	750	24,20	2,40

Монолитные железобетонные крепления обычно выполняются из плит толщиной до 0,20 м на слое песчано-гравийной подготовки. Плиты разрезаются температурно-осадочными швами по всей высоте откоса (рис. 3).

Сборно-монолитные крепления выполняются из отдельных плит размерами 4,0×1,75 м с последующим омоноличиванием швов (Солигорское, Заславское, Любанское и другие водохранилища). Толщина плит крепления при этом составляет 0,15–0,20 м, а гравийной подготовки до 0,20 м.

Обследование водных объектов, расположенных в различных регионах страны (Поозерье, Центральная часть, Полесье) с разными типами креплений, показало, что наряду с вышеуказанными причинами нарушения условий нормальной эксплуатации сооружений берего-

защиты и одной из важнейших причин образования повреждений бетонных и железобетонных креплений является некачественное уплотнение швов и гравийной подготовки на стадии строительства. Это в итоге приводит к переработке откосов волновым потоком в пространстве под плитами при различных положениях уровня верхнего бьефа водохранилищ, выносу грунта из-под плит и их последующему разрушению (рис. 4).

Наиболее часто встречаемые виды деформации креплений и причины их возникновения приведены в табл. 2.

Изучение совместного воздействия волнения, а также колебания уровней на устойчивость плит креплений проводилось автором в волновом лотке гидротехнической лаборатории БНТУ на размываемой модели откоса заложением 1:3 с креплением из железобетонных плит толщиной 2,2 см и открытыми швами (рис. 5). Моделирование выполнялось в масштабе 1:10. Опыты позволили оценить характер воздействия волнового потока на крепление и вымыв грунта откоса из-под плит, установить зависимость объемных деформаций откоса Q_t от ширины раскрытия швов $b_{шва}$, высоты волны h и уровней воды в лотке (рис. 6) [4–6].

На рис. 5 приведены графики вида $Q_t = f(b_{шва})$, полученные по данным лабораторных экспериментов, отображающие связь величины объема выносимого грунта Q_t из-под плит в зависимости от ширины раскрытия межплитных швов $b_{шва}$. Учитывая принятый масштаб моделирования (1:10), графики позволяют в первом приближении получать величины возможных объемов разрушений откосов под плитами крепления в зависимости от параметров волнения (высоты волны) и глубины в водоеме [7, 8].



Рис. 3. Повреждение железобетонного крепления откосов: а – осадочные швы; б – температурные швы

Fig. 3. Damage of reinforced concrete slope protection: a – settlement joints; b – temperature joints



Рис. 4. Характерные разрушения железобетонных креплений откосов водохранилищ:
а – Заславского; б – Чигиринского; с – Лепельского; д – Любаньского

Fig. 4. Common destructions of reinforced concrete slope protection for reservoirs:
a – Zaslavsky; b – Chigirinsky; c – Lepelskoe; d – Lubanskoye

Таблица 2

Виды деформаций креплений откосов и причины их возникновения

Types of deformations in slope protection and reasons for their occurrence

Название водохранилища (тип, вид регулирования)	Амплитуда колебания уровней, м	Причина нарушения устойчивости крепления	
		Тип деформации	Ширина раскрытия межплиточных швов $b_{шва}$, м
Заславское (русловое, многолетнее)	1,2	Просадка железобетонных плит верхового напорного откоса грунтовой плотины	0,05–0,20
Острошицкий Городок (русловое, сезонное)	0,5	Разрушение монолитного крепления откоса в районе водосброса	0,20–0,30
Лошанское (русловое, сезонное)	1,0	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса плотины	0,05–0,10
Любаньское (русловое, сезонное)	1,3	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса плотины и самих плит	0,05–0,20
Локтыши (русловое, сезонное)	1,0	Разрушение заполнения швов плит крепления плотины водохранилища	0,15–0,20
Княжеборское (русловое, сезонное)	0,2	Вывод грунта из-под монолитного берегоукрепительного сооружения, образование трещин и провалов	0,15–0,30
Лепельское (озерное, сезонное)	1,1	Разрушение заполнения швов между плитами крепления откоса, вынос грунта из-под плит	0,20–0,35
Тетеринское (русловое, сезонное)	0,7	Разрушение заполнения швов между плитами крепления напорного откоса плотины	0,10–0,20



Рис. 5. Лабораторные исследования разрушения железобетонных креплений откосов:
а – начальная стадия разрушения; б – стадия обрушения крепления

Fig. 5. Laboratory investigations on destruction of reinforced concrete slope protection:
а – initial stage of destruction; б – stage of protection collapse

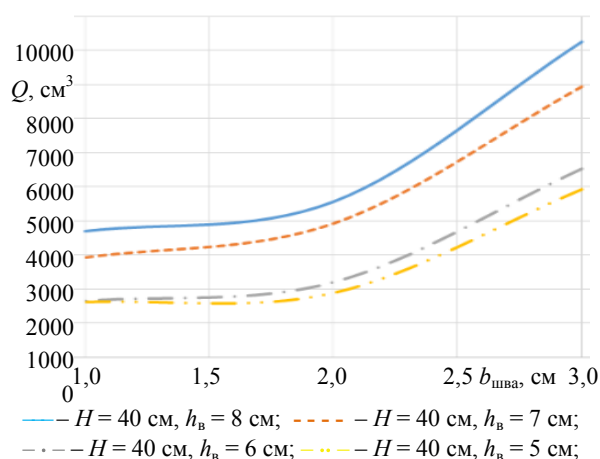


Рис. 6. Зависимость объема вымытого из-под крепления грунта от ширины раскрытия швов при:
 $H = 0,35\text{--}0,40 \text{ м}$; $h_b = 0,05\text{--}0,08 \text{ м}$

Fig. 6. Dependence of washed up soil volume from under protection on joint opening width at $H = 0.35\text{--}0.40 \text{ m}$; $h_b = 0.05\text{--}0.08 \text{ m}$

Наблюдения, проведенные автором на ряде водохранилищ страны, позволили выявить природный эффект, который состоит в том, что при абразии (переработке береговых склонов, сложенных несвязными грунтами с повышенной неоднородностью) образуются береговые отмели, покрытые валунами, галькой и другим крупнофракционным материалом, устойчивым к воздействию волн, колебанию уровней, подвижкам ледового покрова и т. д. Валунно-галечниковый материал образует на поверхности отмели естественную самоотмокку из слоя наиболее крупных фракций за счет выноса находящихся между ними более мелких частиц (рис. 7), препятствующую ее разрушению.



Рис. 7. Образование естественной самоотмокки на водохранилищах: а – Заславском; б – Дубровском

Fig. 7. Formation of natural self-pavement in reservoirs: а – Zaslavsky; б – Dubrovskoe

Установлено, что одной из характеристик, определяющих динамическую устойчивость берегов в условиях водохранилищ Беларуси, является состав размываемого грунта, в частности коэффициент неоднородности несвязного грунта η [9, 10].

Лабораторные исследования образования самоотмостки, проведенные автором в гидротехнической лаборатории БНТУ, позволили изучить механизм закрепления поверхности отмели $B_{\text{Пс}}$ (рис. 8) в зависимости от неоднородности материала и оценить скорость процесса переработки и формирования профиля равновесия.

В качестве основного «базового» грунта, образующего тело модели, использовались однородный среднезернистый песок с $d_{50} = 0,5$ мм и песчано-гравийная смесь с крупнофракционными добавками. Исследовалось влияние на динамику разрушения модели 1-, 2-, 3- и 4-компонентных песчано-гравийных смесей, имеющих разный средний диаметр частиц D_{50} и коэффициент неоднородности η_0 при различном содержании крупнозернистых включений: 10, 25, 50 и 75 %. В опытах в качестве добавки применялся сортированный гравий с $D_{50} = 1,5; 3,5; 7,5$ и 12,5 мм. Обеспечение условий автомодельности выполнялось по [1, 2, 6]. Моделирование откоса проводилось без искажений линейного масштаба, как для условий галечно-гравийных грунтов. Всего проведено 18 серий опытов. В качестве «оптимального» состава размываемого грунта, при котором наблюдался наибольший берегозащитный тормозящий эффект, экспериментальным путем была определена смесь, имеющая содержание гравелистых частиц $P = 25$ %. Лабораторные эксперименты показали, а натурные наблюдения подтвердили, что возможно образование двух основных типов профиля, имеющего покрытие из крупнофракционного материала: первый – при размыве грунта с содержанием крупных фракций более 25 %, второй – с содержанием крупных фракций менее 25 % (рис. 8).

В результате лабораторных опытов получен ряд зависимостей для расчета отдельных эле-

ментов профиля откоса, закрепляемого самоотмосткой (табл. 3) [5, 6].

Наряду с самоотмосткой, обеспечивающей крепление откосов, можно производить защиту размываемых береговых склонов путем отсыпки естественного камня различного фракционного состава. Расчет диаметра частиц отсыпaeмого материала может выполняться по зависимостям, приведенным в [12].

Для расчета диаметра каменной наброски $D_{\text{ш}}$, защищающей откос на участке дамбы или плотины, подверженном волновому воздействию, наиболее часто используются следующие формулы [12]:

$$D_{\text{ш}} = \sqrt[3]{\frac{M}{0,524\rho_k}}; \quad (1)$$

$$D_{\text{б}} = 1,5Ch_{1\%} \left(\frac{\sqrt[3]{m_{h1\%}}}{m} + 0,5 \right) \frac{m+1,8}{1,8m-1} \frac{\gamma_a}{\gamma_k - \gamma_a}, \quad (2)$$

где M – масса камня, т, определяемая по формуле

$$M = \frac{0,079\rho_k h_{1\%}^3}{\left(\frac{\rho_k}{\rho_b} - 1 \right)^3 \sqrt{1+m^3}} \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{h_{1\%}}}; \quad (3)$$

C – гидравлический коэффициент сопротивления, принимаемый равным 0,2 при диаметре камня более 0,15 м и высоте волны более 0,5 м; $m_{h1\%}$ – пологость волны 1%-й обеспеченности, принимаемая для водохранилищ равной 7; γ_a – удельный вес аэрированной воды, стекающей с наброски в конце отката волны, принимаемый 10 кН/м³; γ_k – удельный вес камня, который можно принять 26,5 кН/м³; ρ_k, ρ_b – плотность камня и воды, т/м³; $\bar{\lambda}, h_{1\%}$ – длина и высота расчетной волны, м.

Расчет высоты волны производится по ТКП 45-3.04-170-2009 [11]. Для условий водохранилищ Беларуси, например водохранилища Витебской ГЭС, расчетная высота волны может быть принята следующих параметров: длина волны $\lambda = 15$ м; высота волны 1%-й обеспеченности $h_{1\%} = 0,72$ м.

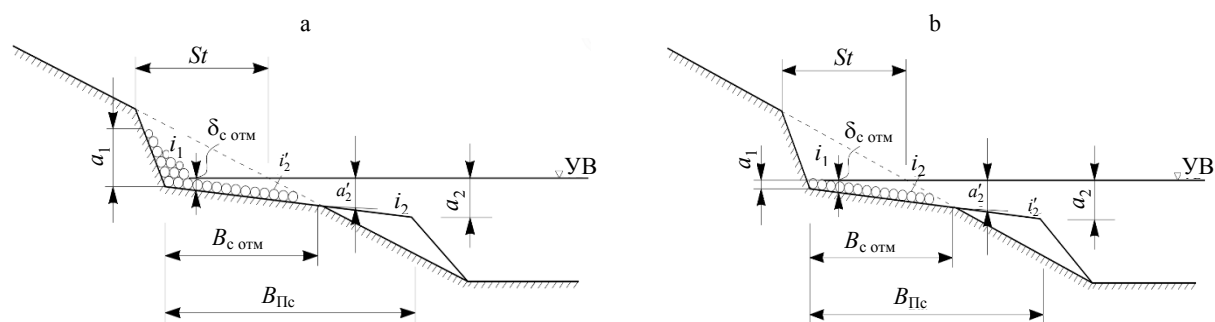


Рис. 8. Варианты профиля равновесия в зависимости от содержания крупнофракционного материала в грунте [11]:
а – профиль с призмой (25 % < P < 50 %); б – профиль без призмы (10 % < P < 25 %)

Fig. 8. Variants of equilibrium profile depending on content of large-fraction material in soil [11]:
а – profile with prism (25 % < P < 50 %); б – profile without prism (10 % < P < 25 %)

Таблица 3

Зависимости для расчета элементов профиля с креплением самоотмосткой
Dependencies for calculation of profile elements with protection using self-pavement

Тип профиля с самоотмосткой	Элемент профиля	Расчетная зависимость
Самоотмостка с призмой на урезе при 25 % ≤ P _{гр} ≤ 50 %	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = (1,5 - 2,0)\delta_{отм}$
	Нижняя граница самоотмостки	$a'_2 = 0,36 \left(\frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{50} \eta_0^{0,3}}} \right)^{\frac{2}{3}}$
	Внешний край береговой отмели	$a_2 = a'_2 / 0,70$
	Уклон призмы самоотмостки выше уреза воды	$i_1 = 0,032 \left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{D_{50} \eta_0^{0,3}} \right)^{\frac{2}{3}} + i_0$
	Уклон поверхности самоотмостки ниже уреза воды	$i'_2 = 0,028 \left[\left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{50}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] + i_0$
	Уклон на нижней границе отмели	$i_2 = 0,50 i'_2$
Профиль с самоотмосткой без призмы при 10 % ≤ P _{гр} ≤ 25 %	Верхний предел размыва и граница самоотмостки	$a_1 = \delta_{отм}$
	Нижняя граница самоотмостки	$a'_2 = 0,27 \left(\frac{h_{1\%}^2 \lambda_0}{\sqrt{D_{50} \eta_0^{0,3}}} \right)^{\frac{2}{3}}$
	Внешний край береговой отмели	$a_2 = a'_2 / 0,80$
	Уклон самоотмостки на урезе воды	$i_1 = i'_2$
	Уклон поверхности самоотмостки ниже уреза воды	$i'_2 = 0,012 \left[\left(\frac{h_{1\%} \sqrt[3]{\lambda_0}}{d_{50}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] + i_0$
	Уклон на нижней границе отмели	$i_2 = 0,60 i'_2$
Обозначения: a_1, a_2, a'_2 – предел размыва, глубина в конце самоотмостки, м; $\delta_{отм}$ – толщина слоя отмостки, м; $h_{1\%}$ – высота волны, м; λ_0 – относительная длина волны, м; D_{50}, d_{50} – средневзвешенная крупность частиц соответственно размываемого грунта и самоотмостки, м; η_0 – коэффициент неоднородности размываемого грунта; i_0, i_1, i'_2 – уклон исходного профиля и поверхности элементов самоотмостки соответственно.		

Подставив в (1) и (3) расчетные значения параметров волнения при $\rho_k = 2,65 \text{ т/м}^3$ и $\rho_b = 1,00 \text{ т/м}^3$, получим:

$$D_{ш} = \sqrt[3]{\frac{0,015}{0,524 \cdot 2,65}} = 0,22 \text{ м};$$

$$M = \frac{0,079 \cdot 2,65 \cdot 0,72^3}{\left(\frac{2,65}{1} - 1\right)^3 \sqrt{1+3^3}} \sqrt{\frac{15}{0,72}} = 0,015 \text{ т}.$$

Подставив в (2) числовые значения параметров волнения, получим

$$D_6 = 1,5 \cdot 0,2 \cdot 0,72 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{7}}{3} + 0,5\right) \times \\ \times \frac{3+1,8}{1,8 \cdot 3 - 1} \cdot \frac{10}{26,5 - 10} = 0,164 \text{ м}.$$

Оценка устойчивости откосов к волновым воздействиям показала, что для их защиты требуется камень большего диаметра (минимум 0,16 м) с толщиной наброски $3D = 0,48 \text{ м}$, что ведет к удорожанию крепления. Поэтому в настоящее время применяется комбинированное крепление откосного типа, состоящее из каменной однослойной отсыпки и укладки под нее вместо песчано-гравийного фильтра синтетического фильтрующего материала типа геотекстиль. Характерным примером широкого применения такого откосного крепления является укрепление берегов водохранилищ Витебской и Полоцкой ГЭС (рис. 9).



Рис. 9. Комбинированное крепление верхнего откоса ограждающей дамбы на водохранилище Витебской ГЭС

Fig. 9. Combined protection of upper slope for embankment dam in reservoir of Vitebsk Hydroelectric Power Station

ВЫВОДЫ

1. На основании обследования сооружений берегозащиты более чем по 100 водохранилищам страны автором проведена оценка современного состояния различных видов креплений с выявлением причин их разрушений и масштабов деформаций.

2. Установлено, что наиболее распространенными являются крепления берегов и откосов в виде железобетонных монолитных либо сборных плит. Определено, что деформации креплений представлены раскрытием межплиточных строительных, температурных и осадочных швов (зарегистрирована ширина раскрытия до 0,35 м), которые развиваются под комплексным воздействием ветрового волнения, колебания уровней и других факторов.

3. Экспериментально установлено, что в результате раскрытия швов плит происходят разрушение и вымыв песчано-гравийной подготовки, образование пазух и ниш с последующей переработкой грунтового откоса, деформацией и разрушением крепления. Физическое моделирование деформаций откосов, защищенных железобетонным креплением с различной шириной раскрытия швов, позволило установить динамику и масштабы развития деформаций откоса при воздействии волнового и уровенного режимов.

4. Натурные исследования и лабораторные эксперименты позволили установить эффект самоупрепления откоса гравелистыми частицами при размыве грунтов с повышенной неоднородностью, который рекомендован для использования в качестве крепления откосов сооружений. Предложен расчет комбинированной берегозащиты, состоящей из каменной отсыпки и синтетических фильтрующих материалов повышенной прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимчук, В. Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ / В. Л. Максимчук. Киев: Будівельник, 1981. 112 с.
2. Пышкин, Б. А. Динамика берегов водохранилищ / Б. А. Пышкин. Киев: Наук. думка, 1973. 416 с.

3. Сапожников, Г. П. Из опыта эксплуатации креплений верховых откосов земляных плотин и берегов водохранилищ БССР / Г. П. Сапожников, Е. М. Левкевич // Водное хозяйство Белоруссии: респ. межвед. сб. науч. трудов. Минск: Вышэйш. шк., 1977. Вып. 7. С. 97–105.
4. Саплюков, Ф. В. Защита берегов и дамб на водоемах от разрушения ветровыми волнами / Ф. В. Саплюков, Е. С. Ленартович // Мелиорация и водное хозяйство. 1976. № 10. С. 12–18.
5. Левкевич, В. Е. Опыт эксплуатации берегозащитных сооружений в Белоруссии / В. Е. Левкевич // Мелиорация и водное хозяйство. 1991. № 5. С. 66–74.
6. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. Минск: Право и экономика, 2015. 307 с.
7. Левкевич, В. Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2017. 51 с.
8. Левкевич, В. Е. Методические рекомендации по оценке устойчивости креплений верховых откосов дамб, плотин и берегов водохранилищ Беларуси / В. Е. Левкевич, А. А. Новиков, А. В. Бузук. Минск: Команд.-инж. ин-т МЧС Респ. Беларусь, 2015. 54 с.
9. Михневич, Э. И. Устойчивость русл открытых водотоков / Э. И. Михневич. Минск: Ураджай, 1988. 240 с.
10. Михневич, Э. И. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич // Мелиорация. 2016. Т. 78, № 4. С. 18–23.
11. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов): ТКП 45-3.04-170–2009. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 73 с.
12. Михневич, Э. И. Обеспечение устойчивости дамб для защиты от наводнений на реке Горынь / Э. И. Михневич, П. М. Богославчик, Е. А. Володько // Наука и техника. 2013. № 5. С. 34–39.
3. Sapozhnikov G. P., Levkevich E. M. (1977) From Operational Experience on Upper Slopes Anchorages in Earth Dams and Banks of Reservoirs in Belarussian Soviet Socialist Republic (BSSR). *Vodnoe Khozyaistvo Belorussii: Respublikanskii Mezhdvdomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Water Management of Belarus. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. (7), 97–105 (in Russian).
4. Saplyukov F. V., Lenartovich E. S. (1976) Protection of Water Reservoir Banks and Dams against their Destruction by Wind Waves. *Melioratsiya i Vodnoye Khozyaistvo* [Melioration and Water Management], (10), 12–18 (in Russian).
5. Levkevich V. E. (1991) Experience in Exploitation of Coastal Protection Structures in Belarus. *Melioratsiya i Vodnoye Khozyaistvo* [Melioration and Water Management], (5), 66–74 (in Russian).
6. Levkevich V. E. (2015) *Dynamic Stability of Water Reservoir Banks in Belarus*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 307 (in Russian).
7. Levkevich V. E. (2017) *Dynamic Stability of Water Reservoir Banks in Belarus*. Minsk: Belarusian National Technical. University. 51 (in Russian).
8. Levkevich V. E., Novikov A. A., Buzuk A. V. (2015) *Methodological Recommendations on Assessment of Stability in Anchorages of Upper Slopes for Earth Dams, Embankments and Water Reservoir Banks in Belarus*. Minsk, Command and Engineering Institute of Ministry for Emergency Situations of Belarus. 54 (in Russian).
9. Mikhnevich E. I. (1988) *Stability in Channels of Open Streams*. Minsk, Uradzhay Publ. 240 (in Russian).
10. Mikhnevich E. I., Levkevich V. E. (2016) Stability of Water Reservoir Banks while Forming Profile of Dynamic Equilibrium in Incoherent Soils. *Melioratsiya* [Melioration], 78 (4), 18–23 (in Russian).
11. *TKP [Technical and Commercial Proposal] 45-3.04-170–2009. Hydraulic Engineering Structures. Rules for Determining Loads and Impacts (Wave, Ice and Ships)*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2011. 73 (in Russian).
12. Mikhnevich E. I., Bogoslavchik P. M., Volodko E. A. (2013) Provision of Dike Slope Stability for Territory Protection Against Goryn River Floods. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 39–44 (in Russian).

Поступила 26.04.2018

Подписана в печать 04.07.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Maximchuk V. L. (1981) *Rational use and Protection of Reservoir Banks*. Kiev, Budivelnik Publ. 112 (in Russian).
2. Pyshkin B. A. (1973) *Dynamics of Reservoir Banks*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 416 (in Russian).

Received: 26.04.2018

Accepted: 04.07.2018

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-489-496>

УДК 711.4:001.891:62 (510)

Особенности планировки и застройки научно-технологических парков в условиях провинций Шаньси и Ганьсу в Китайской Народной Республике

Асп. Лу Гопин¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Создание и развитие научно-технологических парков в Китайской Народной Республике используется как средство активизации районов, нуждающихся в социально-экономическом развитии, например таких, как территории вдоль Нового шелкового пути в провинциях Шаньси и Ганьсу. Разработаны пять типов базовых планировочных моделей, рекомендуемых для создания научно-технологических парков разного функционального профиля. Модель А – научно-технологические парки с компактной планировкой (площадь территории менее 2 кв. км), размещаемые в периферийных зонах больших городов, встроенные в инфраструктуру города, практически не имеющие резервов для территориального развития. Модель рекомендуется для образовательно-научных парков, парков высоких технологий. Модель Б – научно-технологические парки средней величины (площадь территории 2–10 кв. км), размещаемые в ближайших пригородах больших городов (до 10 км), частично использующие городскую инфраструктуру, имеющие возможность территориального развития. Модель рекомендуется для парков производственно-логистических, высоких технологий, легкой промышленности, точного машиностроения. Модель В – научно-технологические парки средней величины (площадь территории 10–20 кв. км), размещаемые в пригородных зонах больших городов (до 30 км), территориально и инфраструктурно взаимосвязанные с международными аэропортами. Модель рекомендуется для парков высоких технологий, точного машиностроения, биохимии, производящих продукцию, которую экономически целесообразно перевозить на самолетах (смартфоны, оптико-волоконная техника и иные высокотехнические устройства, косметика, лекарства и др.). Модель Г – научно-технологические парки средней величины (площадь территории 10–20 кв. км), размещаемые в пригородных зонах больших городов (до 30 км) вдоль транспортно-коммуникационных коридоров национального и регионального значения, имеющие собственную инфраструктуру и возможность территориального развития. Модель рекомендуется для парков строительной индустрии, транспортного машиностроения, био- и агротехнологий. Модель Д – научно-технологические парки большой величины (площадь территории более 20 кв. км), размещаемые на межселенных территориях, вдоль транспортно-коммуникационных коридоров международного и национального значения, имеющие собственную инфраструктуру и возможность территориального развития. Модель рекомендуется для парков химической промышленности, тяжелого, транспортного машиностроения. Выявлены характерные типы функционально-планировочных зон, формируемых на территории научно-технологических парков, и даны рекомендации по их соотношению. Анализ планировки существующих и проектируемых научно-технологических парков позволил разработать характерные схемы их планировочной организации: полосовую, компактную, рассредоточенную.

Ключевые слова: научно-технологический парк, приоритетное направление развития, функционально-планировочная организация, планировочные параметры, планировочная модель, композиционно-пространственная организация, застройка

Для цитирования: Лу, Гопин. Особенности планировки и застройки научно-технологических парков в условиях провинций Шаньси и Ганьсу в Китайской Народной Республике / Гопин Лу // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 489–496. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-489-496>

Адрес для переписки

Лу Гопин
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 33 601-46-98
lup5@hotmail.com

Address for correspondence

Lu Guoping
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 33 601-46-98
lup5@hotmail.com

Peculiarities of Planning and Building of Scientific and Technological Parks in Conditions of the Shanxi and Gansu Provinces in the People's Republic of China

Lu Guoping¹⁾

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

Abstract. Creation and development of scientific and technological parks in the People's Republic of China is used as a means of activating areas in need of socio-economic development, for example such territories as along the New Silk Road in Shanxi and Gansu provinces. Five types of basic planning models recommended for creation of scientific and technological parks of different functional profiles have been developed in the paper. Model A comprises scientific and technological parks with a compact layout (area of less than 2 square kilometers) located in the peripheral zones of large cities built into the city's infrastructure and they do not have practically reserves for territorial development. The model is recommended for creation of educational and scientific parks and high-tech parks. Model B comprises scientific and technological parks of medium size (area of their territory – 2–10 square kilometers) located in the nearest suburbs of large cities (up to 10 km) and these parks partially use urban infrastructure having the possibility for territorial development. The model is recommended for creation parks of industrial-logistics, high technology, light industry, precision engineering. Model C comprises scientific and technological parks of medium size (area of 10–20 square kilometers) located in the suburbs of large cities (up to 30 km), geographically and infra-structurally interconnected with international airports. The model is recommended for creating parks of high-tech, precision engineering, biochemistry that produce products which are economically expedient to be transported by airplanes (smart phones, optical fiber equipment, other high-tech devices, cosmetics, medicines, etc.). Model D comprises scientific and technological park of medium size (area of 10–20 square kilometers) located in the suburbs of large cities (up to 30 km) along transport and communication corridors of national and regional importance with its own infrastructure and territorial development opportunities. The model is recommended for creation of parks in construction industry, transport engineering, bio- and agro-technologies. Model E comprises large-scale scientific and technological parks (with area of more than 20 square kilometers) located in inter-settlement territories along transport and communication corridors of international and national importance with its own infrastructure and territorial development opportunities. The model is recommended for creation of parks for chemical industry, heavy and transport engineering. The paper has made it possible to identify common types of functional-planning zones formed on the territory of scientific and technological parks and it provides recommendations on their correlation. Analysis of the layout for existing and projected scientific and technological parks has allowed to develop characteristic schemes of their planning organization: band, compact, dispersed.

Keywords: scientific and technological park, priority direction of development, functional planning organization, planning parameters, planning model, composition-spatial organization, building

For citation: Lu Guoping (2018) Peculiarities of Planning and Building of Scientific and Technological Parks in Conditions of the Shanxi and Gansu Provinces in the People's Republic of China. *Science and Technique*. 17 (6), 489–496. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-489-496> (in Russian)

Введение

Научно-технологические парки создаются с целью интеграции науки и производства, отбора, разработки и реализации новых научных идей. Важная особенность научно-технологических парков – перераспределение потоков знаний и технологий между университетами, исследовательскими институтами, компаниями и рынками.

В соответствии с документами, определившими приоритеты развития промышленности, технологий и науки в Китайской Народной Республике, на территории провинций Шаньси и Ганьсу предусмотрено создание «золотого звена» Нового шелкового пути, которое воссоздает одно из главных направлений исторического Шелкового пути на новой технологической основе.

Исторический Великий шелковый путь начинался в бывшей столице Китайской империи – городе Чанъань (современный Сиань –

центр провинции Шаньси), проходил по территории современных провинций Шаньси и Ганьсу, по странам Центральной Азии и далее – к странам Европы (рис. 1).

Приоритетные направления развития научно-технологических парков в провинциях Шаньси и Ганьсу

Перспективными для развития в зоне влияния Нового шелкового пути на территории провинций Шаньси и Ганьсу определены следующие функциональные типы научно-технологических парков:

- образовательно-научные парки с экспериментальной базой и опытным производством;
- парки высоких технологий (производство компьютеров, смартфонов, оптико-волоконной техники, мультимедийных и других высокотехнических устройств);
- производственно-логистические парки с предоставлением таможенных, сервисных и других услуг;



Рис. 1. Трасса Нового шелкового пути, который воссоздает исторический Великий шелковый путь из Китая в Европу на новой технологической основе

Fig. 1. Route of New Silk Road which recreates historic Great Silk Road from China to Europe on new technological base

- парки легкой промышленности (производство тканей, одежды, обуви и др.), производство мебели, канцелярских товаров, др.;
- парки точного машиностроения (производство станков с компьютерным управлением, медицинского оборудования, машин и механизмов малой механизации, др.);
- парки строительной индустрии (производство строительных материалов и изделий);
- парки транспортного машиностроения (производство самолетов, автомобилей, железнодорожных локомотивов и вагонов, дорожных машин и механизмов, др.);
- парки тяжелого машиностроения (производство металла и продукции металлообработки, энергетических установок, труб большого диаметра, космической и военной техники, др.);
- парки био- и агротехнологий (производство медикаментов, продуктов питания, косметики и др.);
- парки химической промышленности (производство продукции нефтехимии, красок, лаков, чистящих средств и др.) [1–6].

Укрупненные функционально-планировочные зоны научно-технологических парков

Для всех типов научно-технологических парков характерно наличие таких функционально-планировочных зон, как: административно-деловая, научно-образовательная, производственная, инженерно-технического обеспечения, жилая, ландшафтно-рекреационная.

В зонах размещаются:

- в административно-деловой – офисы администрации; центры бизнес-услуг, офисы юридических и консультативных фирм; конференц-центры, образовательные и тренинговые центры, центры поддержки и развития бизнеса; выставочные и торговые помещения; общественно-культурный центр с многофункциональными залами; чайные, рестораны, пункты быстрого питания; другие необходимые объекты и помещения;

- в научно-образовательной – университетские аудитории, кафедры; информационные центры, научные библиотеки и медиатеки; научно-исследовательские лаборатории; опытно-конструкторские производства; предприятия по производству экспериментальной продукции; другие необходимые объекты и помещения;

- в производственной – производственные предприятия; складские объекты и помещения; транспортно-логистические объекты и помещения; другие необходимые объекты и помещения;

- в зоне инженерно-технического обеспечения – объекты энергоснабжения (газо-, электро- и теплоснабжения); объекты водоснабжения и водоотведения (канализация); объекты переработки отходов; другие необходимые объекты и сооружения;

- в жилой – гостиницы; многоквартирная и коттеджная жилая застройка; арендное жилье; общежития для студентов и временных рабо-

чих; детские дошкольные учреждения; объекты социального обслуживания; другие необходимые объекты и сооружения;

– в ландшафтно-рекреационной – зеленые насаждения; водные системы; места кратковременного отдыха; спортивные площадки и сооружения; спортивные и досуговые центры; другие необходимые объекты и сооружения.

Выделяются также резервные территории, предназначенные для развития научно-технологических парков в процессе их эксплуатации [7, 8].

Базовые планировочные модели научно-технологических парков разного функционального профиля

Проведенное исследование позволило разработать пять базовых планировочных моделей научно-технологических парков, рекомендуемых для формирования парков разного функционального профиля.

Модель А – научно-технологические парки с компактной планировкой (площадь территории менее 2 кв. км), размещаемые в периферийных зонах больших городов, встроенные в инфраструктуру города, практически не имеющие резервов для территориального развития. Модель рекомендуется для образовательно-научных парков, парков высоких технологий.

Модель Б – научно-технологические парки средней величины (площадь территории 2–10 кв. км), размещаемые в ближайших пригородах больших городов (до 10 км), частично использующие городскую инфраструктуру, имеющие возможность территориального развития. Модель рекомендуется для парков производственно-логистических, высоких технологий, легкой промышленности, точного машиностроения.

Модель В – научно-технологические парки средней величины (площадь территории 10–20 кв. км), размещаемые в пригородных зонах больших городов (до 30 км), территориально и инфраструктурно взаимосвязанные с международными аэропортами. Модель рекомендуется для парков высоких технологий, точного машиностроения, биохимии, производящих продукцию, которую экономически целесообразно перевозить на самолетах (смартфоны, оптоволоконная техника и иные высокотехнические устройства, косметика, лекарства и др.).

Модель Г – научно-технологические парки средней величины (площадь территории 10–20 кв. км), размещаемые в пригородных зонах больших городов (до 30 км) вдоль транспортно-коммуникационных коридоров национального и регионального значения, имеющие собственную инфраструктуру и возможность территориального развития. Модель рекомендуется для парков строительной индустрии, транспортного машиностроения, био- и агротехнологий.

Модель Д – научно-технологические парки большой величины (площадь территории более 20 кв. км), размещаемые на межселенных территориях, вдоль транспортно-коммуникационных коридоров международного и национального значения, имеющие собственную инфраструктуру и возможность территориального развития. Модель рекомендуется для парков химической промышленности, тяжелого, транспортного машиностроения.

Для научно-технологических парков, которые создаются на основе разных базовых планировочных моделей, может быть рекомендовано разное соотношение площадей основных функционально-планировочных зон (табл. 1).

Таблица 1

Рекомендуемое соотношение основных функционально-планировочных зон для базовых моделей научно-технологических парков
Recommended ratio of main functional-planning zones for basic models of scientific and technological parks

Модель	Соотношение площадей основных функционально-планировочных зон на территории научно-технологических парков, %					
	Административно-деловая	Научно-образовательная	Производственная	Инженерно-технического обеспечения	Жилая	Ландшафтно-рекреационная
А	10–15	40–50	10–20	До 5	До 5	20–30
Б	10–15	20–30	10–20	До 5	5–10	30–40
В	10–15	20–25	10–20	До 5	5–10	30–40
Г	5–10	5–10	20–30	5–10	15–20	30–40
Д	5–10	5–10	30–40	5–10	15–20	40–45

Схемы планировочной организации научно-технологических парков

Проведенный анализ планировки существующих и проектируемых научно-технологических парков позволил выделить следующие характерные схемы их планировочной организации.

1. Полосовая планировка применяется для научно-технологических парков, формируемых вдоль транспортно-коммуникационных коридоров на межселенных территориях и в пригородных зонах больших городов. Ее особенностью является создание нескольких полос застройки параллельно железнодорожной или автомобильной транспортной магистрали (рис. 2а).

Полосовая планировка позволяет развивать научно-технологические парки без изменения их планировочной структуры, добавляя по мере территориального развития новые планировочные модули вдоль транспортных магистралей и формируя при необходимости дополнительные подцентры и комплексы обслуживания.

Такая планировочная схема наиболее удобна для научно-технологических производственно-логистических парков, парков строительной индустрии, легкой промышленности, транспортного и тяжелого машиностроения.

2. Компактная планировка применяется для научно-технологических парков, формируемых в границах больших городов (обычно на территории периферийных зон городов). Ее особенность – компактное размещение застройки вокруг планировочного центра научно-технологического парка (рис. 2б).

Достоинствами компактной планировки являются территориально близкое расположение всех объектов научно-технологических парков друг к другу и возможность использования городской инфраструктуры для функционирования парков. Недостатки – относительно малая площадь территории и отсутствие резервов для территориального развития.

Такая планировка наиболее удобна для образовательно-научных парков, парков высоких технологий.

3. Рассредоточенная планировка применяется для научно-технологических парков, формируемых на межселенных территориях и имеющих ограничения по противопожарной, санитарной и другим видам опасности производственных процессов.

Такая планировка используется при создании научно-технологических парков химической промышленности, тяжелого машиностроения (рис. 2с).

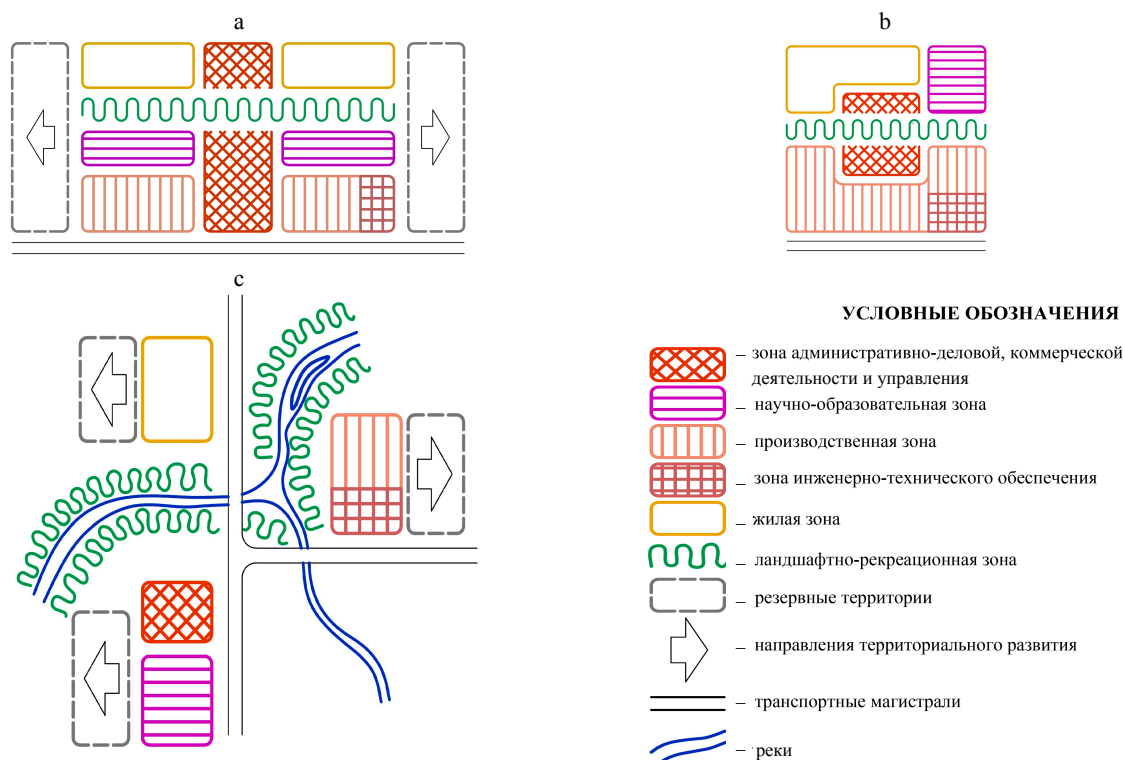


Рис. 2. Характерные схемы планировочной организации научно-технологических парков: а – полосовая; б – компактная; с – рассредоточенная

Fig. 2. Typical schemes of planning organization for scientific and technological parks: а – band layout; б – compact planning; с – dispersed layout

Особенности композиционно-пространственной организации научно-технологических парков

К композиционно-пространственной организации научно-технологических парков предъявляются повышенные архитектурно-художественные требования. Архитектурно-художественный образ застройки научно-технологических парков должен соответствовать их инновационной направленности – иметь современный и художественно выразительный облик [9, 10].

Анализ применения разных типов зданий при застройке различных функционально-планировочных зон научно-технологических парков выявил определенные закономерности.

Административно-деловая зона – место концентрации большого количества людей, формируется как композиционно-пространственный центр научно-технологического парка. Размещаемая в этой зоне застройка выполняет не только рабочие функции, но также является «лицом» парка.

В центральной части административно-деловой зоны может быть рекомендовано создание площади с местами общения и кратковременного отдыха, средствами информации, произведениями монументального искусства. Приемы планировки и застройки каждой площади, состав оборудования и элементов благоустройства определяются с учетом ее величины, особенностей использования, градостроительной ситуации.

В качестве композиционных доминант могут использоваться здания повышенной этажности, выделяющиеся среди окружающей застройки (рис. 3а).

Для создания запоминающегося облика научно-технологических парков используются здания, в которых размещаются общественно-культурные центры с multifunctional залами большой вместимости, выставочные павильоны и другие уникальные объекты (рис. 3б).

Научно-образовательная зона – также активно посещаемая территория, к ее застройке, как и к застройке административно-деловой зоны, зоны коммерческой деятельности и управления, предъявляются высокие архитектурно-художественные требования.

Для размещения научно-исследовательских лабораторий, учебных аудиторий, кафедр наиболее удобны здания коридорного типа удлинённой формы высотой 4–7 этажей, которые соединяются между собой крытыми переходами (рис. 3с).

Для инновационных центров, инкубаторов бизнеса, где пользователи часто сменяют друг друга, рекомендуются здания коридорного, зального или павильонного типов, обладающие планировочной гибкостью (рис. 3д). В зданиях этого же типа целесообразно размещать малые опытно-конструкторские предприятия и предприятия по производству экспериментальной продукции.

Главное требование к планировке и застройке производственной зоны научно-технологических парков – рациональность. Важно удобно расположить относительно друг друга производственные и вспомогательные здания, пешеходные пути и транспортные проезды.

С целью уменьшения загрязненности воздушного бассейна должны быть обеспечены условия проветривания производственных территорий. Подбором оптимальной формы, размеров зданий и сооружений, их взаимным размещением можно уменьшить загазованность воздушной среды в пределах производственных территорий.

К зданиям, размещаемым в производственной зоне, предъявляются требования универсальности, мобильности, экономичности архитектурно-планировочных и инженерных решений. Для возможности трансформации помещений используются такие конструктивные приемы, как уменьшение количества несущих опор, применение оболочек, подвешенных покрытий, размещение инженерных коммуникаций под потолком помещений, наружное размещение обслуживающих помещений и др.

Наиболее удобным типом производственных сооружений, размещаемых на территории научно-технологических парков, являются одноэтажные здания зального типа большой площади, в которых легко варьировать планировку при изменении технологических процессов или арендаторов (рис. 3е). Этот же тип зданий используется для размещения складов и транспортно-логистических объектов.

Еще один распространенный вид производственных зданий – 1–3-этажные здания павильонного типа небольшой площади, которые могут сдаваться в аренду разным пользователям (рис. 3ф).

На территории жилой зоны важно создать комфортные условия проживания людей, хорошо озелененную жилую среду.

Для многоквартирной жилой застройки предпочтительно использование секционных зданий высотой 5–7 этажей с бестранспортными озелененными дворами (рис. 3г).

На части территории жилой зоны (не более 10 % от общей площади жилой зоны) рекомендуется размещать коттеджную жилую застройку с озелененными участками площадью 0,4–0,8 га (рис. 3h).

Для гостиниц, общежитий студентов и временных рабочих используются здания коридорного типа. Их высота определяется с учетом необходимой вместимости и особенностей местоположения на территории научно-технологических парков, предпочтительно использование зданий высотой до семи этажей (рис. 3i).

Здания для размещения детских дошкольных учреждений, объектов социального обслуживания, других необходимых объектов в составе жилой, а также ландшафтно-рекреационной зон подбираются индивидуально, с учетом особенностей каждого научно-технологического парка.

Спортивные и досуговые центры в ландшафтно-рекреационной зоне размещаются, как правило, в 1–2-этажных зданиях, окруженных зелеными насаждениями (рис. 3j).

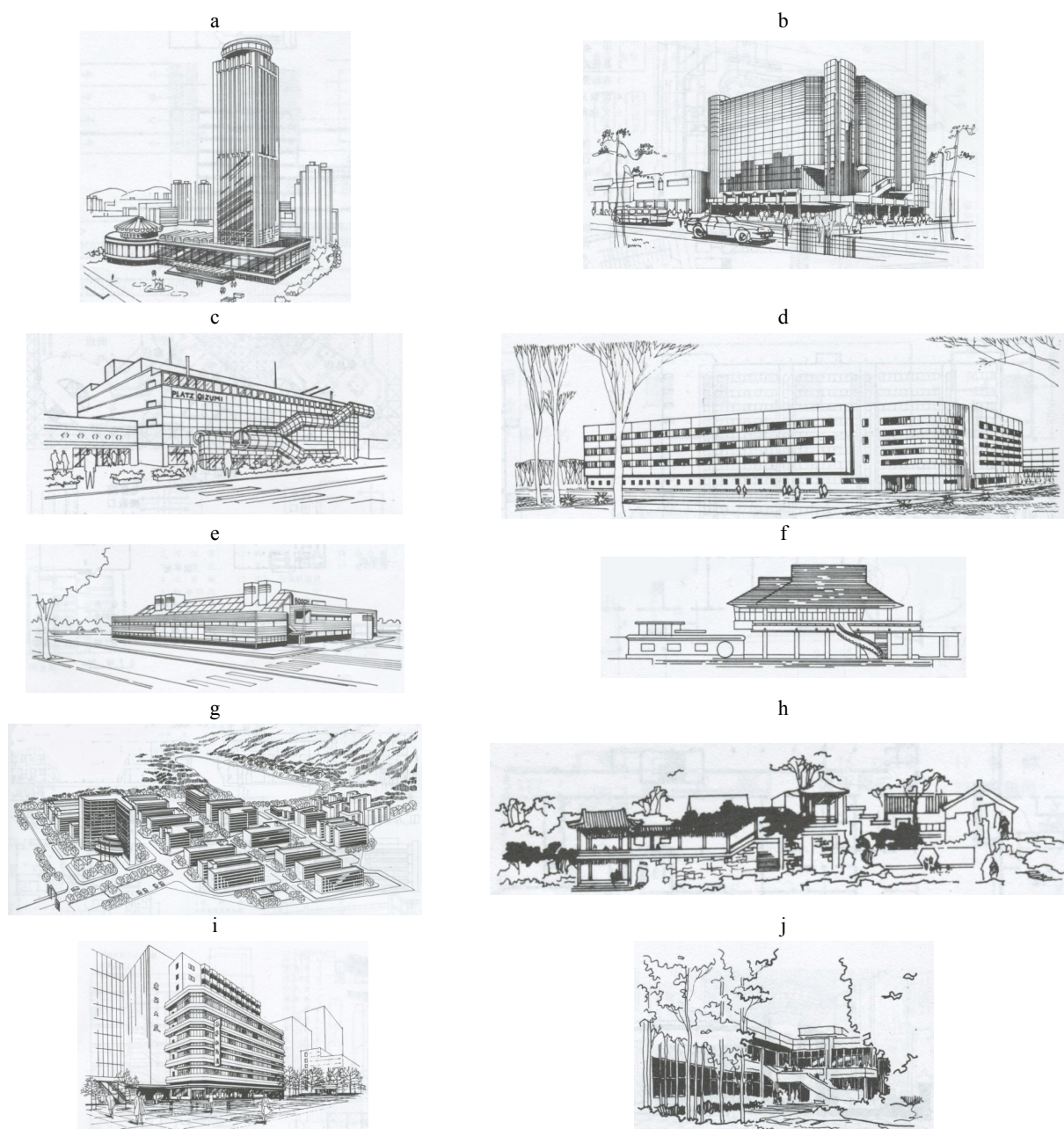


Рис. 3. Типы зданий, рекомендуемые для застройки научно-технологических парков

Fig. 3. Types of buildings recommended for building of scientific and technological parks

ВЫВОДЫ

1. Создание и развитие научно-технологических парков в Китайской Народной Республике используется как средство активизации районов, нуждающихся в социально-экономическом развитии, таких как территории вдоль Нового шелкового пути в провинциях Шаньси и Ганьсу.

2. В результате проведенного исследования разработаны пять базовых планировочных моделей, рекомендуемых для формирования научно-технологических парков разного функционального профиля; даны рекомендации по соотношению функционально-планировочных зон на территории научно-технологических парков разных типов.

3. Анализ планировки существующих и проектируемых научно-технологических парков позволил разработать характерные схемы их планировочной организации: полосовую, компактную, рассредоточенную.

4. Выявлены закономерности композиционно-пространственной организации научно-технологических парков и разработана типология зданий, рекомендуемых для размещения в разных функционально-планировочных зонах парков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уведомление Государственного совета об утверждении национальных высокотехнологических зон промышленного развития и соответствующих политических положений КНР, 6 марта 1991 г.
2. Компиляция отдела стандартов в области науки и техники Государственного управления охраны окружающей среды. Компиляция циркулярной экономики и экопромышленного планирования [М]. Пекин: Chemical Industry Press, 2004.
3. Чэнь, Е. Энергично развивать высокотехнологические парки и построить «Силиконовую долину» в Западном Китае / Е. Чэнь // Journal of Xi'an Jiaotong University (Издание социальных наук). 2002. Т. 2, № 3. С. 72–73.
4. Чжан, Тяньли. Исследование стратегии планирования среднесрочных и долгосрочных научно-технических работ в провинции Ганьсу [М] / Тяньли Чжан // Gansu Science and Technology Press. 2007. С. 135–136.
5. Реформа и развитие зоны Ганьсу, Региональное бюро Комиссии развития и реформ провинции Ганьсу. 2006.
6. Департамент науки и техники провинции Ганьсу. Провинциальная научная и технологическая конференция по обмену данными [М]. Провинциальный департамент науки и технологий провинции Ганьсу. 2006.
7. Лю, Вэйдун. Тенденции в развитии мировых парков

высоких технологий [J] / Вэйдун Лю // World Geography Research. 2001. № 1. С. 36–40.

8. Лай, Янь Хуэй. Урбанистический дизайн зоны высокотехнологического промышленного развития в крупных городах [D] / Янь Хуэй Лай // Xi'an University of Architecture and Technology. 2004.
9. Потаев, Г. А. Тенденции развития градостроительства / Г. А. Потаев. Минск: БНТУ, 2014. 222 с.
10. Потаев, Г. А. Философия современного градостроительства / Г. А. Потаев. Минск: БНТУ, 2018. 347 с.

Поступила 18.07.2018

Подписана в печать 26.09.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Notification of the State Council on Approval of National High-Tech Industrial Development Zones and Relevant Political Provisions of the People's Republic of China, March 6, 1991 (in Chinese).
2. Compilation of Science and Technology Standards Department of the State Environmental Protection Administration. Compilation of Circular Economy and Eco-Industry Planning [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004 (in Chinese).
3. Chen Ye. (2002) Actively Develop High-Tech Parks and Create "Silicon Valley" in Western China. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Science Edition)*, 2 (3), 72–73 (in Chinese).
4. Zhang Tianli (2007). Research on Planning Strategy for Medium- and Long-Term Scientific and Technological Development in Gansu Province [M]. *Gansu Science and Technology Press*. 135–136.
5. Reform and Development of Gansu Zone, Local Bureau of Committee for Development and reforms of Gansu Province. 2006 (in Chinese).
6. Gansu Provincial Department of Science and Technology (2006) *Provincial Science and Technology Conference on Data Exchange* [M]. Gansu Provincial Department of Science and Technology. 2006 (in Chinese).
7. Liu Weidong (2001) Trends in Development of World High-Tech Parks [J]. *World Geography Research*, (1), 36–40 (in Chinese).
8. Lei Yan Hui (2004). *Urban design of High-Tech Industrial Development Zone in Large Cities* [D]. Xi'an University of Architecture and Technology. 2004 (in Chinese).
9. Potaev G. A. (2014) *Tendencies in Urban Development*. Minsk, Belarusian National Technical University. 222 (in Russian).
10. Potaev G. A. (2018) *Philosophy of Modern Urbanism*. Minsk, Belarusian National Technical University. 347 (in Russian).

Received: 18.07.2018

Accepted: 26.09.2018

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-497-501>

УДК 625.855.3

Теоретические предпосылки упрочнения микроструктуры поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий с помощью коллоидного вещества

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев¹⁾, докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Исходя из гипотезы «вечных дорог», решение проблемы прочности и долговечности дорожных бетонных покрытий в значительной мере определяется теоретическими предпосылками, положенными в основу технологии упрочнения микроструктуры их верхнего поверхностного слоя. Применение мелкозернистого бетона с использованием ультрадисперсных добавок частично помогает получить упрочненный верхний слой таких покрытий. Вместе с тем для разработки технологических параметров требуются дальнейший поиск и развитие теоретического анализа данной проблемы. Исследований по этому направлению крайне недостаточно, и затронутый вопрос продолжает оставаться актуальным. Известен метод применения коллоидного цементного клея и активированного торкрет-раствора для усиления сцепления нового и старого бетона в инженерных конструкциях. Однако исследования в области защиты поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий от коррозионных разрушений отсутствуют. Это сдерживает широкое применение указанных приемов в инженерной практике эффективного содержания бетонных покрытий. В данном случае представляет интерес рассмотрение имеющихся теоретических положений о существовании квантовой механики структурообразования в системах, состоящих из коллоидно-дисперсных частиц. Такой подход в дорожном бетоне является новым, он связан с возможностью регулирования процессов микромеханики структурообразования в минеральных системах при создании защитных поверхностных слоев в дорожных бетонных покрытиях. Этой проблеме и посвящена данная статья.

Ключевые слова: долговечность дорожных бетонных покрытий, структурообразование в минеральных системах, коллоидно-дисперсные частицы, квантово-механические эффекты

Для цитирования: Пшембаев, М. К. Теоретические предпосылки упрочнения микроструктуры поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий с помощью коллоидного вещества / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 497–501. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-497-501>

Theoretical Prerequisites for Strengthening Micro-Structure of Surface Layer in Road Concrete Pavement by Colloid Material

М. К. Pshembaev¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾

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

Abstract. Assuming that there are perpetual roads solution of the problem pertaining to strength and longevity of road concrete pavements are mainly determined by theoretical prerequisites which are considered as basic ones in technology for strengthening micro-structure of their top surface layer. Application of fine grain concrete with ultra-disperse additives partially helps to obtain strengthened top layer of such pavements. At the same time further search and improvement of theoretical analysis for the given problem are required for development of technological parameters. Investigations on this direction are

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

rather insignificant and the problem continues to be considered as an actual one. There is a known method for application of colloid cement glue and activated gunite solution for strengthening binding of new and old concrete in engineering structures. However it is necessary to point out the fact that investigations in the field of protection of road concrete pavements against corrosion destructions are actually absent. Such approach restrains a wide application of the mentioned methods in engineering practice for provision of efficient maintenance of concrete pavements. In this case it is necessary to consider the existing theoretical statements on the essence of quantum structure-formation mechanics in the systems consisting of colloid-disperse particles. This approach to road concrete science is accepted a new one and it is connected with the possibility to regulate processes of structure-formation micro-mechanics in mineral systems while creating protective surface layers in road concrete pavements. The given paper is devoted to this problem.

Keywords: longevity of road concrete pavements, structure formation in mineral systems, colloid-disperse particles, quantum-mechanical effects

For citation: Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N. (2018) Theoretical Prerequisites for Strengthening Micro-Structure of Surface Layer in Road Concrete Pavement by Colloid Material. *Science and Technique*. 17 (6), 497–501. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-497-500> (in Russian)

Введение

Значительный интерес, с точки зрения анализа формирования прочной микроструктуры в поверхностном слое бетонных покрытий, представляют результаты экспериментально-теоретических исследований, приведенные в [1]. Здесь авторы впервые показали, что механизм упрочнения микроструктуры системы, состоящей из коллоидно-дисперсных частиц в бетоне, носит квантово-механический характер. Было выявлено, что в системах, имеющих в начальной стадии неупорядоченную структуру, вследствие проявления квантово-механических эффектов [2, 3] самопроизвольно образуются более упорядоченные пространственные структуры [4]. При этом показано, что квантово-механические эффекты обусловлены наличием термоэлектрокинетического потенциала дегидратационного или десорбционного диспергирования (ДДД) коллоидных частиц и переменного электрического тока в образующейся системе.

Установленные авторами [1] потенциал ДДД и переменный электрический ток возникают при изменении термодинамических условий системы. Это происходит в процессе ее дегидратации или десорбции в результате микроэнергетического взаимодействия между коллоидными цементными частицами и образующимися при этом газообразными ионизированными частицами, отрывающимися с поверхности коллоидных цементных частиц. В этом случае, как выявлено в [1], взаимодействия между коллоидными частицами и газообразным веществом сопровождаются поляризацией

или появлением диполей [2, 3], что и определяет их квантово-механический характер.

Теоретические основы упрочнения поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий

Авторы [1] показали, что коллоидная система в процессе структурообразования обладает способностью генерировать электрическую энергию. При этом ими экспериментально доказано, что комплексное явление конденсационно-кристаллизационного образования структурированных дисперсных систем с участием газовой фазы и квантово-механических эффектов, а также термоэлектрокинетического потенциала создает энергетическое поле, в области которого коллоидные частицы в момент дегидратационно-десорбционного диспергирования, помимо броуновского движения, получают комбинированные перемещения: колебательное – от колеблющихся электрических зарядов и поступательное – от термоэлектрокинетического потенциала дегидратационного или десорбционного диспергирования. Такое перемещение способствует максимальному уплотнению системы. Конденсирующиеся при этом на поверхность коллоидных частиц монослои из газовой среды, проявляя диполи [3], обеспечивают прочные химические связи между коллоидными частицами. В результате происходит чрезвычайно высокое уплотнение всей системы. В [1] показано, что в дисперсных коллоидных системах существуют различные энергетические уровни, которые отражают определенные виды связей коллоидных частиц при

образовании структурированных дисперсных систем. Выделено три таких уровня: I, II, III.

I уровень электростатических взаимодействий характерен при коагуляционном структурообразовании. Это проявляется в виде слабых сил Ван-дер-Ваальса, когда электронные оболочки не перекрываются и возникает только действие сил притяжения. К этому уровню относится коагуляционное твердение «структур высыхания» (в частности, твердение глин).

Ко II уровню относится коагуляционное твердение минеральных вяжущих типа гипса. В процессе твердения между коллоидными частицами возникают значительные по величине силы Ван-дер-Ваальса. Взаимодействие между частицами обусловлено ориентационным, индукционным и дисперсионным эффектами [3], но химической связи между частицами не возникает.

III уровень – это конденсационно-кристаллизационное твердение минеральных вяжущих типа цементного алита ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). Как установлено в [5], гидратация алита протекает циклично с выделением большого количества теплоты, что вызывает дегидратацию образовавшегося геля. При этом с коллоидных зерен вместе с водой переходят в газовую фазу ионизированные частицы, вследствие чего возникает термоэлектрокинетический потенциал ДДД [6, 7]. В образовавшемся переменном электрическом поле коллоидные частицы получают комплексные перемещения (колебательные и поступательные). Такое движение коллоидных частиц, вызванное квантово-механическим эффектом, становится упорядоченным [2, 3], приводит их к резкому сближению и в результате – к предельному уплотнению дисперсной системы. Этому также способствует параллельно протекающий процесс конденсации мономолекулярных слоев из кремнекислородных соединений в форме $\text{Si}(\text{OH})_4$ на поверхностях коллоидных частиц. Такой процесс объясняется проявлением квантово-механических эффектов: содержащиеся в атомах электроны находятся в непрерывном движении, при котором распределение зарядов внутри атомов становится несимметричным, в результате чего возникают мгновенные диполи [2, 3]. При конденсации монослоев из кремнекислородных соединений на поверхностях коллоидных ча-

стиц движение мгновенных диполей перестает быть независимым, что вызывает притяжение коллоидных частиц друг к другу на расстояния, близкие к взаимодействию в кристаллических решетках, т. е. при этом возникают химические связи, вызывающие субуплотнение вещества.

Таким образом, в образовавшейся структурированной системе, полученной в этом процессе, энергия химической связи между коллоидными частицами становится равной или близкой по величине энергии внутрикристаллического взаимодействия.

В контексте рассмотрения дисперсных систем с применением традиционных минеральных вяжущих представляет интерес также вопрос применения золя SiO_2 или наноразмерного порошка SiO_2 . Это вызвано необходимостью использования таких композиций для защиты поверхностного слоя бетонных покрытий от коррозионных разрушений.

Как известно, при механическом измельчении на поверхностях кристаллических кварцевых частиц образуется аморфизированная зона, обладающая нескомпенсированными энергетическими связями. Частицы такой зоны имеют запас энергии, достаточный для того, чтобы при взаимодействии с водой переходить в гидратные формы, образуя $\text{Si}(\text{OH})_4$. Однако из-за малости энергии гидратации гидратные новообразования не могут перейти в раствор и остаются на поверхности исходных зерен кварца. Установлено [1], что для продолжения структурообразования системы $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$ необходимы:

- 1) добавочный подвод энергии в виде нагревания;
- 2) предварительное уплотнение с ограниченным количеством воды.

Это объясняется тем, что при повышенной температуре, уменьшенной влажности, наличии термоэлектрокинетического потенциала и квантово-механического эффекта более слабое физическое электростатическое взаимодействие между коллоидными частицами замещается более сильным энергетическим взаимодействием с образованием прочных контактов срастания на границе раздела фаз.

Таким образом, упрочнению микроструктуры коллоидных частиц должны предшествовать следующие процессы:

1) переход ионизированных частиц, содержащих кремнекислородные комплексы, в газовую фазу;

2) возникновение термоэлектрокинетического потенциала ДДД;

3) накопление газообразного $\text{Si}(\text{OH})_4$;

4) конденсация монослоев кремнекислородных соединений на поверхности кислородных частиц, сопровождающаяся появлением квантово-механических эффектов и завершающаяся сцеплением частиц химическими связями.

В итоге энергия взаимодействия между коллоидными частицами становится равной или близкой энергии связи внутрикристаллического взаимодействия в SiO_2 . По такому же принципу твердеют гидравлические вяжущие типа портландцемента.

Основной вывод, сделанный в [1], состоит в том, что явление межколлоидного взаимодействия в высокодисперсных системах имеет комплексный характер и их свойства находятся в непосредственной зависимости от энергетического уровня взаимодействия между коллоидными частицами.

Приведенный анализ твердения минеральных коллоидных систем [1] стимулировал поиск информации о возможности новых подходов для защиты существующих бетонных конструкций от коррозионных разрушений.

Оказалось, что исследования в этом направлении имеют свою историю. Перед исследователями встал вопрос о создании прочного соединении «старого» и «нового» бетона, используемого, например, в качестве защитного слоя на существующих бетонных конструкциях. Такой проблемой занимались еще в первый период развития бетона и железобетона (Н. А. Житкевич, СПб., 1905, 1912 гг.). Позже у специалистов возникла идея создать праймер-слой, обеспечивающий хороший адгезионный контакт нового бетонного слоя со старым (существующим), на основе использования коллоидного цементного клея (КЦК). Проблеме применения КЦК в строительстве посвящена известная статья Н. Б. Урьева и Н. В. Михайлова [8], где рассмотрены вопросы повышения прочного сцепления нового (свежеуложенного) бетона со старым (затвердевшим) и «склеивания» этих бетонов между собой. При этом коллоидный цементный клей используют как про-

слойку (1–2 мм) перед укладкой слоя песчаного водонепроницаемого бетона по существующему старому.

Эффективность применения КЦК, по сравнению с полимерными защитными материалами, очевидны [8]: он дешевле более чем в 200–400 раз эпоксидных смол, в 20 раз – фенол-формальдегидных и почти в 50 раз – полиэфирных смол. Установлено, что стоимость КЦК близка к стоимости бетонов.

Дальнейшим развитием в этом направлении исследований явилась инженерная разработка [9], где предложен активированный торкрет-раствор. Здесь коллоидный цементный раствор представлял собой высокодисперсную смесь вибромолотого портландцемента и песка с удельной поверхностью $5000 \pm 500 \text{ см}^2/\text{г}$, мелкого песка и ПАВ в виде сульфитно-дрожжевой бражки (СДБ по СН 406–70). При этом активированный цементный коллоидный раствор смешивали и наносили цемент-пушкой по правилам обычного торкрета.

Значительный вклад в последующее развитие исследований по коллоидным цементным растворам внесла также статья Н. Б. Урьева и И. С. Дубинина [10].

Некоторые исследователи утверждают, что наивысшая прочность сцепления обеспечивается, когда составы в новом и старом бетоне одинаковы или близки [11]. Например, в [12] показано, что при применении глиноземистого цемента в новом бетоне в контакте между новым и старым бетоном на портландцементе образуется двухкальциевый гидроалюминат с очень рыхлой структурой и низкой прочностью, что снижает прочность сцепления от 20 до 50 %.

ВЫВОДЫ

1. Анализ показал, что результаты, приведенные в [1], могут служить теоретической основой для разработки составов и технологий для защиты поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий от коррозионных разрушений.

Известен метод применения коллоидного цементного клея и активированного торкрет-раствора для усиления сцепления нового и старого бетона в инженерных конструкциях. Однако исследования по данному направлению

применительно к защите поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий от коррозионных разрушений отсутствуют. Это сдерживает широкое применение указанных приемов в инженерной практике эффективного содержания бетонных покрытий.

2. Для применения коллоидного цементного клея и активированных торкрет-растворов в дорожной практике необходимо, чтобы вещества, используемые в качестве водонепроницаемого поверхностного слоя на существующих бетонных покрытиях, были в виде коллоидов (например, золь SiO_2) или тонкодисперсного порошка из кварцевых наноразмерных частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Явление, механизм и энергетические уровни образования структурированных дисперсных систем / А. В. Нехорошев [и др.] // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 528, № 1. С. 149–153.
2. Козман, У. Введение в квантовую химию / У. Козман. М.: Иностранная лит., 1960. 560 с.
3. Карапетьянц, М. Х. Строение вещества / М. Х. Карапетьянц, С. И. Дракин. М.: Высш. шк., 1978. 304 с.
4. Эбелинг, В. Образование структур при необратимых процессах / В. Эбелинг. М.: Мир, 1979. 279 с.
5. Малинин, Ю. С. Исследование гидратации и твердения цемента / Ю. С. Малинин // Труды IX Всесоюз. совещания-семинара работников цементных заводов. М.: Стройиздат, 1965. С. 50–73.
6. Нехорошев, А. В. О процессах цементации (твердения) в системах кремнезем–вода и глина–вода / А. В. Нехорошев // Доклады Академии наук СССР. 1965. Т. 160, № 2. С. 416–419.
7. Будников, П. П. Твердофазные реакции с участием переноса «носильщиками» летучих соединений / П. П. Будников, А. В. Нехорошев // Журнал прикладной химии. 1965. Т. 38, № 10. С. 2155–2165.
8. Урьев, Н. Б. Коллоидный цементный клей и его применение в строительстве / Н. Б. Урьев, Н. В. Михайлов. М.: Изд-во лит. по строительству, 1961. 175 с.
9. Руководство по применению коллоидного цементного раствора и активированного торкрета для гидроизоляции конструкций энергетических сооружений: П02-73/ВНИИГ. [Срок введ. III кв. 1973 г.] / М-во энергетики и электрификации СССР. Главниипроект. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидротехники им. Б. Е. Веденеева. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1973. 20 с.
10. Урьев, Н. Б. Коллоидный цементный клей / Н. Б. Урьев, И. С. Дубинин. Л.: Стройиздат, 1980. 192 с.
11. Лавринович, Е. В. Зависимость прочности и стойкости стыковых соединений от вида цемента и добавок / Е. В. Лавринович // Гидротехническое строительство. 1957. № 7. С. 29–32.
12. Хуторянский, М. С. Условия монолитности бетонных и железобетонных конструкций / М. С. Хуторянский. Харьков: Гonti НКТП, 1938. Ч. 1. 100 с.

Поступила 11.09.2018

Подписана в печать 12.11.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Nekhoroshev A. V., Gusev B. V., Baranov A. T., Kholpanov L. P. (1981) Phenomenon, Mechanism and Energetic Levels for Formation of Structurized Disperse Systems. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of USSR Academy of Sciences], 528 (1), 149–153 (in Russian).
2. Kauzmann W. (1957) *Quantum Chemistry. An Introduction*. NY, Academic Press Inc. 744. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-2745-0.50001-9>.
3. Karapetyants M. Kh., Drakin S. I. (1978) *Constitution of Matter*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian).
4. Ebeling W. (1976) *Strukturbildung bei Irreversiblen Prozessen* [Formation of Structures in Irreversible Processes]. Leipzig, Teubner-Verlag. (in German).
5. Malinin Yu. S. (1965) Investigations on Hydration and Cement Hardening. *Proceedings of IX All-Union Workshop-Meeting of Cement Plant Workers*. Moscow, Publishing House Stroyizdat, 50–73 (in Russian).
6. Nekhoroshev A. V. (1965) On Processes Pertaining to Cementation (Hardening) in Silicon-Water and Clay-Water Systems. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of USSR Academy of Sciences], 160 (2), 416–419 (in Russian).
7. Budnikov P. P., Nekhoroshev A. V. (1965) Solid-Phase Reactions with Participation of Shifting by Volatile Compound Carriers. *Zhurnal Prikladnoi Khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 38 (10), 2155–2165 (in Russian).
8. Uriev N. B., Mikhailov N. V. (1961) *Colloidal Cement Glue and its Application in Construction*. Moscow, Publishing House for Literature on Construction. 175 (in Russian).
9. *Guidance on Application of Colloidal Cement Mortar and Activated Guniting for Hydro-Isolation of Power Engineering Structures: П02-73/VNIIG* [All Russia Institute of Hydraulic Engineering]. 1973. Leningrad, Energiya Publ. 20 (in Russian).
10. Uriev N. B., Dubinin I. S. (1980) *Colloidal Cement Glue*. Leningrad, Publishing House Stroyizdat. 192 (in Russian).
11. Lavrinovich E. V. (1957) Dependence of Strength and Resistance of Butt Joints on Type of Cement and Additives. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo = Power Technology and Engineering*, (7), 29–32 (in Russian).
12. Khutoryansky M. S. (1938) *Conditions for Monolithic Character of Concrete and Reinforced Concrete Structures*. Kharkov, State Joint Scientific and Technical Publishing House of the People's Commissariat of Heavy Industry of the USSR. 100 (in Russian).

Received: 11.09.2018

Accepted: 12.11.2018

Published online: 30.11.2018

Algorithm of Plastic Concrete Crack Resistance is Calculation under Capillary Shrinkage Using Generalizing Criteria

S. N. Leonovich¹⁾

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

Abstract. The method of concrete crack-resistance prediction at early age is developed at capillary shrinkage with use of approaches of fracture mechanics, which is guided by the concept of accumulation of defects in structure in the form of capillaries and cracks to their critical concentration of C_c . At the same time process at two stages is considered: on the first – process of formation and growth of defects and on the second – the process, which is directly accompanying destructions (fragmentation) at critical concentration of defects. As a theoretical basis of a method physical ideas of the increment volume mechanism of hollowness of cracks in the concrete model, presented as two-level structure are accepted: a matrix of the hardened cement stone with inclusions and emptiness of various form (crack) as result of the external influences, changing the intense deformed state. The main criterion of a method – the generalized total parameter of crack-resistance $K_c = \sqrt{K_{lc}^2 + K_{llc}^2}$, calculated on the basis of model schemes of growth, association, localization of cracks system, their classification by types and relative quantity in volume at the initial concentration increasing to critical, that is caused by physical processes of capillary shrinkage is established. Being based on the considered regularities of process of concrete destruction, it is offered to divide all defects of structure, both initial, and developed as a result of power and not power influences, into 5 main types. The amount of pores and cracks of the first four types depends on concrete porosity, and type V – and on the volume content of grains of small or coarse aggregate. To each type of damages, there corresponds the stress intensity factor, extent of influence and which value on the general crack resistance of material depend on quantity of this type of pores and cracks in concrete volume. The new evidence-based algorithm of crack resistance calculation at concrete shrinkage at early age by the generalized criterion, which contains the sequence of operations of calculation as for selection of structure, taking into account the factors, influencing capillary pressure and according to characteristics of properties of concrete components, its technological parameters, and for residual resource definition of concrete on its structure and properties, and also on the samples, which are selected from structures at early age is offered.

Keywords: algorithm, calculation, crack-resistance, plastic (early age) concrete, capillary shrinkage, generalizing criteria, stress intensity factor

For citation: Leonovich S. N. (2018) Algorithm of Plastic Concrete Crack Resistance is Calculation under Capillary Shrinkage Using Generalizing Criteria. *Science and Technique*. 17 (6), 502–507. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-502-507>

Алгоритм расчета трещиностойкости бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке по обобщенному критерию

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Разработан метод расчета трещиностойкости бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке с использованием подходов механики разрушения, который опирается на концепцию накопления дефектов в структуре в виде

Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220014, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-96-76
leonovichsn@tut.by

Address for correspondence

Leonovich Sergey N.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-96-76
leonovichsn@tut.by

пор, капилляров и трещин до их критической концентрации C_c . При этом рассматривается процесс на двух стадиях: на первой – процесс образования и развития дефектов и на второй – процесс, непосредственно сопровождающий разрушения (фрагментацию) при критической концентрации дефектов. В качестве теоретической основы метода приняты физические представления о механизме приращения объема пустотности трещин в модели бетона, представленной как двухуровневая структура: матрица затвердевшего цементного камня с включениями и пустоты различной формы (трещины) как результат внешних воздействий, изменяющих напряженно-деформированное состояние. Установлен основной расчетный критерий метода – обобщенный суммарный параметр трещиностойкости $K_c = \sqrt{K_{lc}^2 + K_{llc}^2}$, вычисляемый на основании модельных схем развития, объединения, локализации системы трещин, их классификации по видам и относительному количеству в объеме при начальной концентрации, возрастающей до критической, что обусловлено физическими процессами капиллярной усадки. Базируясь на рассмотренных закономерностях процесса разрушения бетона, предложено разделить все дефекты структуры, как исходные, так и развившиеся в результате силовых и несиловых воздействий, на пять основных типов. Содержание пор и трещин первых четырех типов зависит от пористости бетона, а типа V – и от объемного содержания зерен мелкого или крупного заполнителя. Каждому виду повреждений соответствует свой коэффициент интенсивности напряжений, степень влияния и величина которого на общую трещиностойкость материала зависят от количества данного вида пор и трещин в объеме бетона. Предложен новый научно обоснованный алгоритм расчета трещиностойкости при усадке бетона в раннем возрасте по обобщенному критерию, содержащий последовательность операций расчета как для целей подбора состава с учетом влияющих на капиллярное давление факторов и по характеристикам свойств компонентов бетона, его технологическим параметрам, так и для определения остаточного ресурса бетона по его составу и свойствам, а также по образцам, отобранным из конструкций в раннем возрасте.

Ключевые слова: алгоритм, расчет, трещиностойкость, пластический бетон (в раннем возрасте), капиллярная усадка, обобщенный критерий, коэффициент интенсивности напряжений

Для цитирования: Леонович, С. Н. Алгоритм расчета трещиностойкости бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке по обобщенному критерию / С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 502–507. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-502-507>

Definition of the main crack-resistance characteristics of concrete at any level of its hierarchical structure

Stress intensity factor in top of defect in material, which structure contains others micro and macrodamages, reflect in the numerical value influence of these damages on the intense deformed state as around defect, and all volume of material. It is possible to consider this total influence, having considered everything micro and macrodefects at all levels of a hierarchical structure of a composite. Each of pores and cracks in concrete creates a certain field of tension around itself. If to consider, that this pores and cracks settle down in volume of concrete with some frequency, fields of tension and deformations are imposed at each other that creates the difficult intense deformed state. Being based on [1–10] regularities of process of destruction of concrete considered above, we will divide all defects of structure, both initial, and developed as a result of power and not power influences, into five main types:

1 – roundish emptiness – pores with the submicrocracks, coming to their borders formed as a result of concentration of tension around a circular opening;

2 – ellipse emptiness – pores with the microcracks coming to their borders;

3 – mezocracks in a concrete body (type 1);

4 – regional cracks (type II);

5 – radial and contact cracks around grains and inclusions (types III and IV).

Content of emptiness – pores and cracks of types 1–4 depends on porosity of concrete, and 5 – and on the volume content of grains of small or coarse aggregate, and these cracks on border of a cement stone and grains of filler characterize meso- and the macro-level of consideration of concrete structure. The volume amount of each type of emptiness – pores and cracks depending on porosity of material and volume content of filler is defined experimentally. To each type of damages there corresponds the value of stress intensity factor, extent of influence and which value on the general crack resistance of material depends on quantity of this type of pores and cracks in concrete volume. Applying the principle of independence of action of forces and considering, that emptiness – pores and cracks are distributed evenly on all volume of material, it is possible to write down:

– for submicro, micro and mesolevels

$$K_I = n_1 K_I^1 + n_2 K_I^2 + n_3 K_I^3 + (1 - n_1 - n_2 - n_3) K_I^4, \quad (1)$$

where $K_I^1, K_I^2, K_I^3, K_I^4$ – stress intensity factor respectively in tops of microdefects 1, 2, 3 and 4; n_1, n_2, n_3 – content of microdefects of 2 and 3 types in total of microdamages;

– for meso- and macrolevels

$$K_I = n_1 K_I^1 + n_2 K_I^2 + n_3 K_I^3 + n_4 K_I^4 + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) K_I^5, \quad (2)$$

K_I^5 – stress intensity factor in tops of radial and contact cracks on border with grains of small and coarse aggregate; n_4 – the amount of regional cracks in total of damages.

Sizes $K_I^1 - K_I^5$ are calculated according to tab. 1, depending on the content of emptiness – pores and cracks of this type in total of damages. Then it is final:

– for submicro, micro and mesolevels

$$K_I = p\sqrt{\pi} \left\{ n_1 A \sqrt{L_1 \left(1 + R / (R + L_1) \right)} + n_2 B \sqrt{a + L_2} + n_3 C \sqrt{L_3} + (1 - n_1 - n_2 - n_3) D \sqrt{L_4} \right\}, \quad (3)$$

where $R = 5 \cdot 10^{-7}$ m; $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$ m; $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ m; $L_3 = 5 \cdot 10^{-5}$ m; $L_4 = 5 \cdot 10^{-5}$ m; $a = 5 \cdot 10^{-6}$ m; $L_1 - L_4$ – semi-length (length) of defects or emptiness – pores; A, B, C, D – coefficients, specified in tab. 1 over line;

– for meso- and macrolevels

$$K_I = p\sqrt{\pi} \left\{ n_1 A \sqrt{L_1 \left(1 + R / (R + L_1) \right)} + \right.$$

$$\left. + n_2 B \sqrt{a + L_2} + n_3 C \sqrt{L_3} + n_4 D \sqrt{L_4} + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) E \sqrt{L_5 / 2} \right\}, \quad (4)$$

$R = 5 \cdot 10^{-7}$ m; $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$ m; $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ m; $L_3 = 5 \cdot 10^{-5}$ m; $L_4 = 5 \cdot 10^{-5}$ m; $L_5 = D_{\max}^{ag}$; $a = 5 \cdot 10^{-6}$ m; $D_{\max}^{ag}$ – maximum diameter of grain of small or coarse aggregate in a concrete matrix; L_5 – length of a radial crack; E – coefficient, specified in tab. 1 over line.

The size K_{II} can be determined on coefficients of C, D and E , provided in tab. 1 below the line. We will note, that shift tension in tops of emptiness – pores of types 1 and 2 doesn't arise. Then:

– on submicro, micro and mesolevels

$$K_{II} = n_3 K_{II}^3 + (1 - n_3) K_{II}^4; \quad (5)$$

– on meso- and macrolevels

$$K_{II} = n_3 K_{II}^3 + n_4 K_{II}^4 + (1 - n_3 - n_4) K_{II}^5, \quad (6)$$

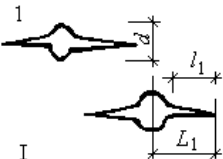
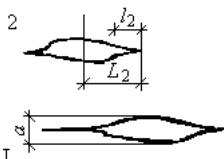
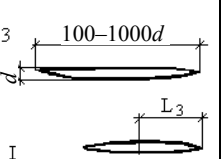
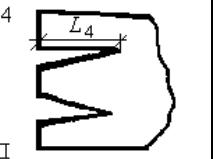
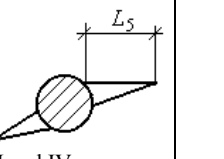
where the characteristic sizes of cracks 3–5 are accepted for each of consideration levels according to (1) and (2).

We determine a material constant K_C by a formula

$$K_C = \sqrt{\sum K_I^2 + \sum K_{II}^2}. \quad (7)$$

Table 1

Stress intensity factors taking into account the content of emptiness, capillaries, cracks in a cement stone

Amount of pores $n_1 - n_5$, %	1	2	3	4	5
					
	$K_{IC} = \sigma_b \sqrt{\pi l_1 (1 + d / L_1)}$	$K_{IC} = \sigma_b \sqrt{\pi l_2 (1 + d / L_2)}$	$K_{IC} = \sigma_b \sqrt{\pi L_3}$ $K_{IIC} = C \tau \sqrt{\pi L_3}$	$K_{IC} = \sigma_b \sqrt{\pi L_4}$ $K_{IIC} = D \tau \sqrt{\pi L_4}$	$K_I = \sigma_b \sqrt{\pi L_5 / 2}$ $K_{IIC} = E \tau \sqrt{\pi L_5 / 2}$
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
5	1.733	1.0550	1.0122/1.0205	0.2303/0.2004	0.643/0.060
10	1.912	1.1003	1.0212/1.0417	0.3116/0.1997	0.651/0.061
15	2.067	1.2794	1.0480/1.0630	0.3992/0.1901	0.657/0.063
20	2.235	1.4212	1.0647/1.0890	0.4570/0.1762	0.682/0.068
25	2.506	1.6517	1.1010/1.1812	0.5640/0.1592	0.701/0.072
30	2.973	1.8432	1.1535/1.2810	0.6810/0.1446	0.793/0.081
35	3.084	2.0020	1.4032/1.4216	0.7632/0.1410	0.854/0.087
40	3.512	2.1760	1.5547/1.5732	0.8720/0.1337	0.892/0.092

An algorithm of concrete crack-resistance calculation at early age at capillary shrinkage by the generalized criterion

The method of calculation of early age concrete crack-resistance is developed at capillary shrinkage with use of approaches of fracture mechanics, which is guided by the concept of accumulation of defects in structure in the form of pores, capillaries and cracks to their critical concentration of C_c . At the same time process at two stages is considered: on the first – process of formation growth of defects and on the second – the process, which is directly accompanying destructions (fragmentation) at critical concentration of defects.

As a theoretical basis of a method physical ideas of the increment volume mechanism of hollowness of cracks in the model of concrete, presented as two-level structure are accepted: a matrix of the hardening cement stone with inclusions and emptiness of various form (crack) as result of the external influences, changing the intense deformed state.

The main criterion of a method – the generalized total parameter of crack resistance of $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$ calculated on the basis of model schemes of growth, association, localization of system of cracks, their classification by types and relative quantity in volume at the initial concentration, increasing to critical, that is caused by capillary shrinkage is established.

The algorithm of crack-resistance calculation at shrinkage contains the sequence of operations as for selection of structure for the known factors and characteristics of concrete components proper-

ties, their technological parameters, influencing capillary pressure in early age, and for definition of a residual resource of concrete on the samples, which are selected from structures at early age in the conditions of curing.

The algorithm includes.

1. Basic data about design parameters of external influences: power (N, M, Q) and not power (t, W, P) influences; about components concrete characteristics cement (R_c), filler (R_a), chemical additives.

2. Data on concrete properties, its durability of R_b and R_{bt} , elasticity of E_b , crack resistance of R_{crc}^0 and R_{crc}^v at early age.

3. Operations on calculation of concrete porosity (the general, capillary, gel, content).

4. Operations on calculation of K_{Ii}^b, K_{IIi}^b in tops of defects of the I-V types at capillary shrinkage.

5. Operations on calculation of criterion of SIF at shrinkage (temperature and moist influences), taking into account distribution of pores and capillaries in total of defects.

6. Calculation of the KIN limit value for this structure.

7. Calculation of the module of elasticity E_b for this structure.

8. Calculation of crack-resistance of concrete, taking into account shrinkage (thermo-moist influences).

9. Operations of assessment of result and correction of structure.

The algorithm of calculation of durability is presented in fig. 1.

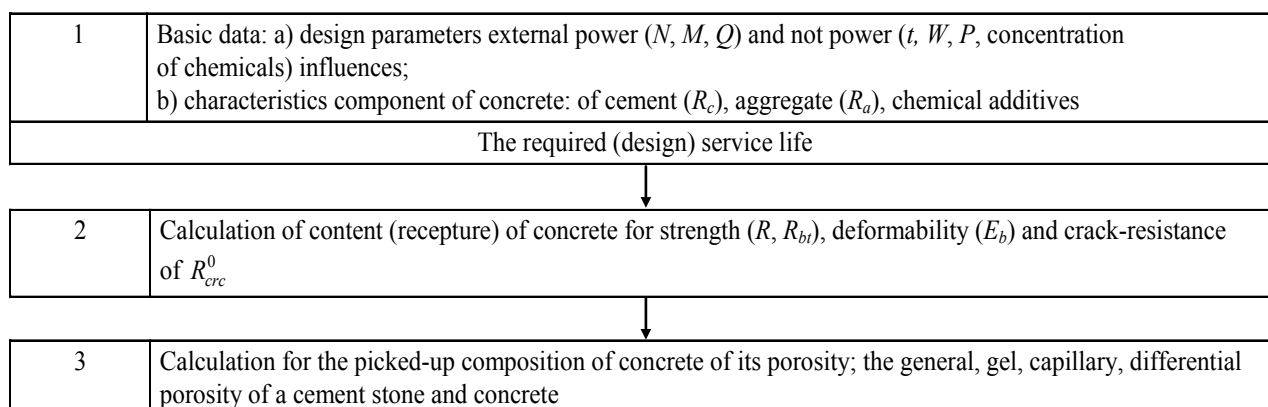


Fig. 1. An algorithm of calculation of crack resistance of early age concrete at capillary shrinkage (see also p. 506)

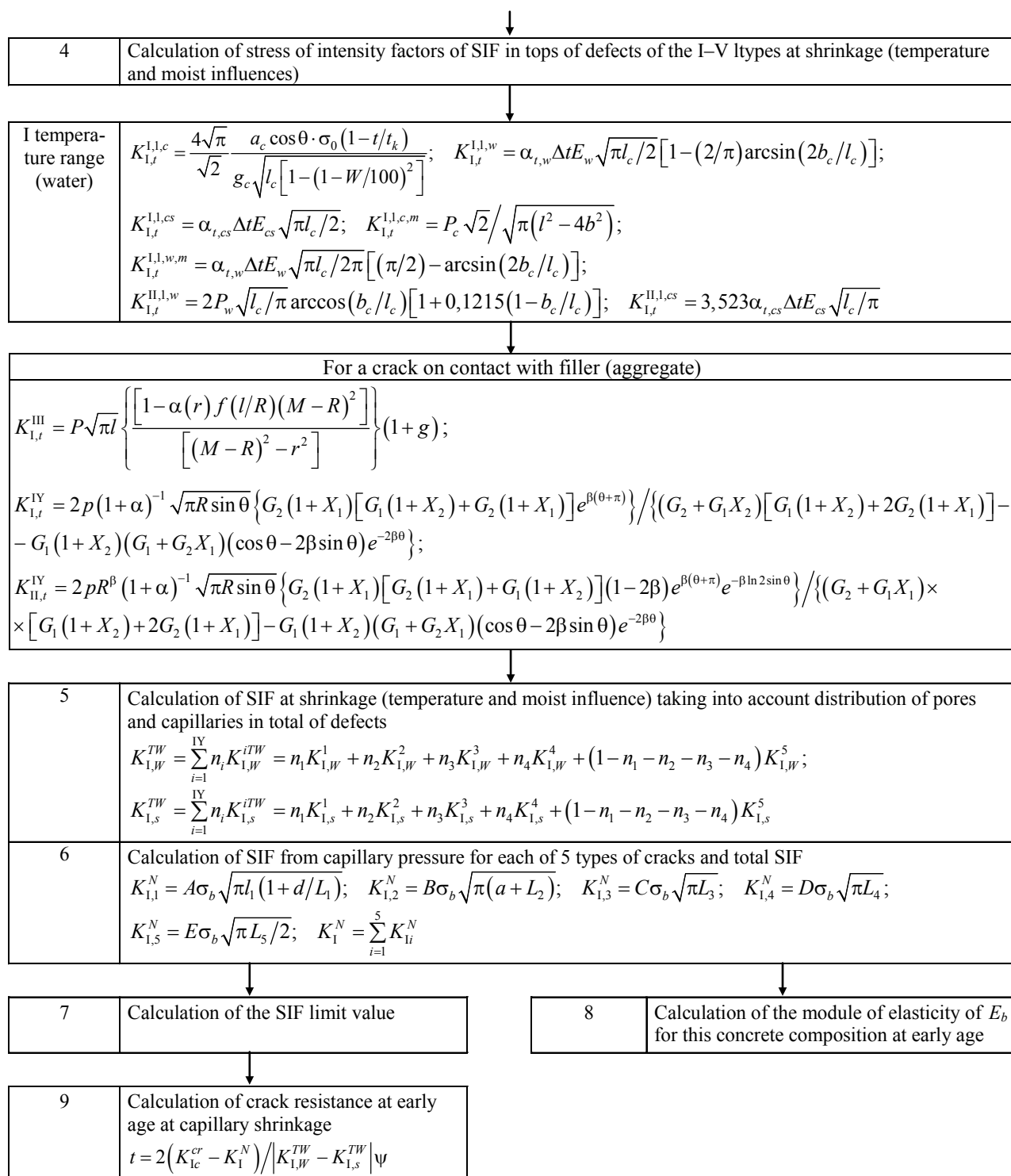


Fig. 1. Engding

CONCLUSIONS

1. At theoretical justification of a method of crack-resistance calculation at capillary shrinkage of early age concrete with use of approaches of fracture mechanics by the generalized criterion the main assumptions are formulated.

2. The developed model is the hierarchical system, suitable for the description of processes of destruction (destruction) of early age concrete at any levels of consideration of its structure. Having entered the corresponding characteristics for materials of filler and cement and sand solution, it is

possible to receive deformative, strength characteristics, parameters of the concrete cracks in case of change of its humidity and temperature (at shrinkage).

3. Being based on the considered regularities of concrete destruction process, it is offered to divide all defects of structure, both initial, and developed as a result of power and not power influences, into 5 main types. The amount of pores and cracks of the first four types depends on concrete porosity, and type V – and on the volume content of grains of small or coarse aggregate. To each type of damages, there corresponds the stress intensity factor, extent of influence and which value on the general crack resistance of material depend on quantity of this type of pores and cracks in concrete volume.

4. The new evidence-based algorithm of crack-resistance calculation at shrinkage of early age concrete by the generalized criterion, which contains the sequence of operations of calculation as for selection of structure, taking into account the factors, influencing capillary pressure and according to characteristics of properties of concrete components, its technological parameters, and for definition of concrete residual resource on its structure and properties and also on the samples, which are selected from structures at early age is offered.

REFERENCES

1. Leonovich S. N. (2018) Modeling of Capillary Shrinkage and Crack Formation of Concrete at Early Age. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (4), 265–277. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-265-277>.
2. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. (2016) *Strength, Crack Resistance and Durability of Constructional Concrete at Corrosive and Temperature Attacks*. 2 Volumes. Minsk, Belarusian National Technical University (in Russian).
3. Leonovich S., Shalyi E., Falaleeva N., Kim L. (2016) The Influence of Carbon Dioxide on the Durability of Offshore Concrete. *26 International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE-2016, Rhodes, Greece, June 26 – July 1, 2016*.
4. Leonovich S., Zaitsev Yu., Tsuprik V., Kim L. (2016) Frost Destruction and Fracture Mechanics of Concrete. *Polyarnaya Mekhanika: Materialy Tret'ei Mezhdunar. Konf., 27–30 Sent. 2016, Vladivostok* [Polar Mechanics: Materials of Third International Conference, September 27–30, 2016, Vladivostok]. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 687–693.
5. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N. (2016) *Monitoring of Built and Operated Reinforced Concrete Structures by Nondestructive Methods*. Minsk, Belarusian National Technical University. 330 (in Russian).
6. Snezhkov D. Yu., Becker A. T., Leonovich S. N., Kim L. V. (2016) *Control of Steel Concrete Constructions by Nondestructive Methods*. Vladivostok, Far Eastern Federal University. CD-ROM (in Russian).
7. Zaytsev Yu. V., Leonovich S. N., Schneider U. (2011) *Structure, Durability and Fracture Mechanics of Concrete at Two-Axis and Three-Axis Compression*. Minsk, Belarusian National Technical University. 381 (in Russian).
8. Eberhardsteiner Y., Leonovich S., Zaytsev Yu. V. N. (2013) *Strength, Crack-Resistance and Durability of Constructional Construction Materials at Difficult Tension*. Minsk, Belarusian National Technical University. 522 (in Russian).
9. Leonovich S. N., Litvinovsky D. A., Kim L. V. (2015) *Strength, Crack Resistance and Durability of Constructional Concrete at Influence of High Temperatures*. Vladivostok, Far Eastern Federal University. 148 (in Russian).
10. Zemlyakov G. V., Knyazev M. A., Trofimenko E. E., Leonovich S. N. (2012) Two-Soliton Solution of Task about Destruction of Core. *Doklady Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 56 (3), 87–91 (in Russian).

Received: 10.03.2017

Accepted: 05.05.2017

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-508-514>

УДК 621.6.07

Гидравлический расчет медных трубопроводов систем отопления и внутреннего газоснабжения

Канд. техн. наук М. А. Рутковский¹⁾, А. С. Шибeko¹⁾, К. И. Галыня¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. При конструировании современных систем отопления, водо- и газоснабжения жилых зданий широко применяются медные трубопроводы, имеющие ряд преимуществ перед стальными и пластиковыми. Главной причиной ограниченности использования медных труб является их стоимость (практически в два раза большая, чем стальных, и в четыре раза, чем полипропиленовых). Современные нормы проектирования в Беларуси не содержат конкретных методов расчета медных трубопроводов. Поэтому был рассмотрен и проанализирован гидравлический расчет систем отопления на основании норм Российской Федерации. Недостатком приведенных в российских нормах теоретических выкладок является их отвлеченность от общих законов механики жидкости и газа. Ввиду этого рассмотрены теоретические основы гидравлического расчета трубопроводов, приведены выражения для определения потерь давления на трение и в местных сопротивлениях. Для определения линейных потерь рассмотрены основные режимы течения сред на основании опытов И. Никурадзе и представлены зависимости для определения коэффициента сопротивления трению в ламинарном, переходном и турбулентном режимах. Для расчета потерь давления приведены значения коэффициентов местного сопротивления для основных элементов трубопроводов, а также показано определение величины ζ с учетом пропускной способности оборудования. Проведен анализ номограмм, представленных в российских нормах и исследованиях, выявлены недостатки и найдены пути их совершенствования. С учетом приведенных в статье зависимостей построены номограммы для расчета удельных потерь давления в системах отопления и внутреннего газоснабжения на основе природного газа и пропана. Для расчета внутридомового газоснабжения построены номограммы для нахождения эквивалентной длины единичного местного сопротивления.

Ключевые слова: газоснабжение, коэффициент трения, коэффициент местного сопротивления, номограмма, отопление, потери давления, режимы течения, трубопровод, число Рейнольдса

Для цитирования: Рутковский, М. А. Гидравлический расчет медных трубопроводов систем отопления и внутреннего газоснабжения / М. А. Рутковский, А. С. Шибeko, К. И. Галыня // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 508–514. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-508-514>

Hydraulic Calculation of Copper Pipelines for Heating and Internal Gas Supply Systems

М. А. Rutkowski¹⁾, А. S. Shybeko¹⁾, К. I. Halynia¹⁾

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

Abstract. Copper pipelines are widely used while designing modern heating systems, water and gas supply of residential buildings and these pipelines have a number of advantages in comparison with steel and plastic pipelines. The main reason for limited use of copper pipes is their cost which is practically twice as much as cost of steel pipes, and four times higher than

Адрес для переписки

Шибeko Александр Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-29
fgv_fes@bntu.by

Address for correspondence

Shybeko Alexander S.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-29
fgv_fes@bntu.by

the coat of polypropylene pipes. Modern design standards in Belarus do not contain specific requirements for calculation of copper pipelines. Therefore hydraulic calculation of heating systems has been considered and analyzed on the basis of norms of Russian Federation. The drawback of all theoretical calculations presented in Russian standards is their abstraction from general laws of fluid and gas mechanics. For this reason theoretical foundations of hydraulic calculations for all pipelines have been considered and expressions have been given for determination of pressure loss due to friction and in local loss. Main flow regimes have been considered on the basis of I. Nikuradze's experiments in order to determine linear losses and dependences for determination of friction coefficient in laminar, transient and turbulent modes have been presented in the paper. Values of local loss coefficient for main pipeline elements are given for calculation of pressure loss and the paper also shows determination of value ζ with due account of equipment capacity. An analysis of nomograms presented in Russian norms and researches has been carried out; shortcomings have been revealed and the ways directed on their perfection have been found. Nomograms for calculation of specific pressure losses in heating systems and internal gas supply have been constructed on the basis of natural gas and propane with due account of dependences presented in the paper. Nomograms for finding equivalent length of a single local loss have been constructed for calculation of internal gas supply systems.

Keywords: gas supply, friction coefficient, local loss coefficient, nomogram, heating, pressure loss, flow regime, pipeline, Reynolds number

For citation: Rutkowski M. A., Shybeka A. S., Halynia K. I. (2018) Hydraulic Calculation of Copper Pipelines for Heating and Internal Gas Supply Systems. *Science and Technique*. 17 (6), 508–514. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-508-514> (in Russian)

В последнее время медные трубопроводы широко применяются при проектировании систем отопления, внутреннего водо- и газоснабжения индивидуальных жилых домов и коттеджей, а также в системах холодоснабжения в качестве холодопроводов. Возможность использования данных труб объясняется рядом положительных качеств, которые им присущи вследствие особенностей физико-химических свойств сплавов на основе меди. Среди достоинств можно выделить:

- 1) пластичность, которая позволяет выдерживать давление, возникающее при замерзании воды в системе отопления;
- 2) коррозионностойкость;
- 3) герметичность;
- 4) малую шероховатость стенок (1,5–10,0 мкм [1, 2]);
- 5) бактерицидность [3];
- 6) длительный срок службы (стальные трубы – 20–25 лет, медные – более 50 лет);
- 7) небольшой коэффициент линейного расширения (медь – $17 \cdot 10^{-6}$ 1/К, сталь – $12 \cdot 10^{-6}$ 1/К, полипропилен – $150 \cdot 10^{-6}$ 1/К);
- 8) скорость и легкость монтажа при помощи фитингов, в то же время при использовании пайки длительность и трудность монтажа являются недостатками.

Основной недостаток медных труб – стоимость: 1 м стальной водогазопроводной трубы DN 20 стоит 2,5 белор. руб., медной 22,0×1,0 – 4,62 белор. руб., полипропиленовой 25,0×3,5 –

1–2 белор. руб. Еще одним недостатком является усиление коррозии стальных и алюминиевых деталей при их контакте с медью в водной среде, что устраняется при использовании переходников из бронзы или нержавеющей стали. Высокая теплопроводность меди (практически в семь раз больше, чем стали, и в 1700 раз больше, чем полипропилена) в различных случаях может быть как достоинством, так и недостатком.

На данный момент особые требования по проектированию и расчету систем отопления и внутреннего газоснабжения из медных трубопроводов в нормативных документах Республики Беларусь отсутствуют. В Российской Федерации с 2005 г. действует СП 40-108–2004 [4], некоторые данные из него будем использовать в статье. Применительно к системам газоснабжения конкретные требования по расчету отсутствуют как в белорусских, так и в российских ТНПА. Теория расчета медных газопроводов приведена в [5], где представлены полученные авторами номограммы для расчета. Однако изложенный в статье материал не в достаточной мере содержит информацию, необходимую для организации расчетов. При ознакомлении с методами расчета систем отопления, внутреннего водо- и газоснабжения, изложенными в нормативной литературе, может возникнуть ложное впечатление об отличиях в расчетах, так как в документах используется собственная терминология, отличная от классической механи-

ки жидкости и газа, и формулы, являющиеся частными случаями общих выражений. Ввиду вышеперечисленного гидравлический расчет трубопроводов следует рассмотреть более подробно.

Цель гидравлического расчета трубопроводов – подбор диаметров на участках сети с последующим определением потерь давления в системе. Диаметры участков системы отопления определяются по допустимой скорости движения теплоносителя – до 2 м/с, оптимальной для длительного использования является скорость 0,25–0,50 м/с [4]. В системах газоснабжения диаметры участков задаются, причем на ответвлениях к газовому оборудованию диаметр должен быть не менее диаметра присоединительного штуцера прибора. Проверка соответствия подобранных диаметров производится сравнением потерь давления в системе с расчетными потерями давления, которые составляют не более 600 Па [6, 7]. С учетом степени шума, создаваемого движущимся газом, скорость рекомендуется принимать не более 7 м/с [6, 7].

В общем случае снижение давления транспортируемой среды на участке сети $\Delta p_{\text{уч}}$, Па, находится как сумма потерь на трение о стенки трубопровода $\Delta p_{\text{тр}}$ и в местных сопротивлениях $\Delta p_{\text{м.с.}}$. Линейные потери давления на участке длиной l , м, определяются по формуле Дарси – Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{тр}} = Rl = \frac{\lambda}{d_{\text{вн}}} p_{\text{д}} l,$$

где $R = \lambda p_{\text{д}} / d_{\text{вн}}$ – удельные потери давления, Па/м, которые могут быть рассчитаны по выражениям:

– для системы отопления

$$R = \frac{\lambda G^2}{1,62 \cdot 10^6 \rho_{\text{в}} \pi^2 d_{\text{вн}}^5}; \quad (1)$$

– для систем газоснабжения

$$R = \frac{\lambda \rho_{\text{г}} V_0^2}{1,62 \cdot 10^6 \pi^2 d_{\text{вн}}^5}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент сопротивления трения; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, м; $p_{\text{д}} = \rho_{\text{в(г)}} w^2 / 2$ –

динамическое давление перемещаемой среды, Па; w – средняя скорость потока, м/с; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа при нормальных условиях (н. у.), кг/м³; G – массовый расход воды на участке, кг/ч; V_0 – объемный расход газа на участке, приведенный к н. у., м³/ч.

В этих выражениях в качестве исходных данных использованы расходы среды, так как в большинстве случаев именно они известны на начальном этапе гидравлического расчета.

Коэффициент сопротивления трения в общем случае зависит от двух факторов:

– эквивалентной (равномерно-зернистой) шероховатости стенок трубопровода $k_{\text{экр}}$, м;

– критерия Рейнольдса Re , показывающего отношение сил инерции к силам вязкого трения; $Re = wd_{\text{вн}}/\nu$, где ν – кинематический коэффициент вязкости среды, м²/с.

После соответствующих преобразований получим следующие выражения для вычисления Re :

– для системы отопления

$$Re = \frac{G}{900 \rho_{\text{в}} \pi d_{\text{вн}} \nu}; \quad (3)$$

– для систем газоснабжения

$$Re = \frac{V_0}{900 \pi d_{\text{вн}} \nu}. \quad (4)$$

На основании опытов И. Никурадзе (1932–1933) общепринято выделять три характерных режима течения среды:

1) ламинарный ($Re < 2000$), в котором шероховатость стенок не оказывает влияния на λ . Зависимость описывается законом Хагена – Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (5)$$

2) переходный, в котором происходит переход от ламинарного к турбулентному течению ($Re = 2000–4000$). Расчет λ выполняется по формуле Р. М. Зайченко

$$\lambda = 0,0025 \sqrt[3]{Re}; \quad (6)$$

3) турбулентный, где выделяют три области:

– гидравлически гладких труб, в которой шероховатость стенок не влияет на сопротивление трению, в качестве верхней границы числа Рейнольдса различными авторами предлагаются следующие значения: $15d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$ [1], $23d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$ [7], $20d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$ [8];

– переходную;

– квадратичную, или область вполне шероховатых труб, для которой λ не зависит от критерия Рейнольдса, а определяется только относительной шероховатостью $k_{\text{эКВ}}/d_{\text{вн}}$, в качестве нижней границы принимается $\text{Re} = 560d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$ [1], $\text{Re} = 500d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$ [4].

Для всей области турбулентного движения может быть применена степенная формула А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{k_{\text{эКВ}}}{d_{\text{вн}}} \right)^{0,25} \quad (7)$$

Следует отметить, что для различных областей турбулентного режима движения предложено множество эмпирических зависимостей: П. Блазиуса, Колбрука – Уайта, Прандтля – Никурадзе, Г. А. Мурина, Б. Л. Шифринсона, Филоненко – Альтшуля, С. Черчилля и пр. [1, 2, 9]. Однако выражение (7) охватывает всю область практического применения, просто в использовании и является универсальным.

Потери давления в местных сопротивлениях рассчитываются по формуле Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{м.с}} = p_{\text{д}} \sum \zeta, \quad (8)$$

где $\sum \zeta$ – сумма коэффициентов местного сопротивления.

Для большинства местных сопротивлений величина ζ в турбулентном режиме не зависит от числа Рейнольдса ввиду незначительной величины вязкого трения по сравнению с потерями на вихреобразование. Однако для устройств с развитой поверхностью трение играет заметную роль. Для них зависимость потерь давления не будет пропорциональна квадрату скорости, и следовательно, пользоваться выражением (8) неправомерно. Потери давления в них

приводятся в виде таблиц, номограмм или с помощью аппроксимационных зависимостей.

Значения коэффициентов местного сопротивления приводятся в справочной литературе [10–12], а также в каталогах производителей. Значения некоторых коэффициентов местных сопротивлений в зависимости от номинального диаметра DN показаны в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов местного сопротивления элементов систем отопления и газоснабжения [10–12]

Values of local loss coefficients for elements of heating and gas supply systems [10–12]

Вид местного сопротивления	Значение ζ для DN					
	15	20	25	32	40	50 и более
Внезапное изменение диаметра в пределах перехода на следующий диаметр по ГОСТ	Сужение – 0,35; расширение – 0,30. ζ относятся к скорости в сечении с меньшим диаметром					
Тройник проходной	1,0		Вне зависимости от диаметра. ζ относятся к скорости в сечении с меньшим расходом			
Тройник ответвления	1,5					
Тройник слияния	3,0					
Крестовина проходная	2,0					
Крестовина поворотная	3,0					
Отвод гнутый на 90° при $R/d = 3-4$	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3
Кран пробковый проходной	3,0	1,5	1,5	–	–	–
Кран шаровой полнопроходной	0,1–0,2					
Кран шаровой стандартного прохода	0,2–0,3					
Клапан термозапорный	2,0					
Клапан прямоточный	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,0
Задвижка	0,5 (DN 50–DN 100)					

Некоторые производители указывают не коэффициент местного сопротивления, а пропускную способность k_v , ($\text{м}^3/\text{ч}/\text{бар}^{0,5}$) (в литературе зачастую встречается единица измерения $\text{м}^3/\text{ч}$, которая не совсем соответствует физическому смыслу k_v) [11]. Величина k_v показывает объемный расход жидкости плотностью $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, проходящей через регулирующий орган или другое дросселирующее устройство,

при перепаде давлений 10^5 Па (1 бар) и определенной степени открытия (при максимальном открытии k_v называют условной пропускной способностью k_{vy} или k_{vs}). Потери давления при этом определяются по выражению

$$\Delta p_{м.с} = 10^5 \left(\frac{G}{\rho_{ж} k_v} \right)^2, \quad (9)$$

где 10^5 – переводной коэффициент из единицы измерения бар в паскаль; G – массовый расход жидкости, кг/ч.

Зная пропускную способность, рассчитаем коэффициент местного сопротивления как

$$\zeta = \frac{16,2 \cdot 10^{-5} \pi^2 (DN)^4}{k_v^2}. \quad (10)$$

При расчете внутренних газопроводов принято определять эквивалентную длину местных сопротивлений $l_{эKB}$, м, по выражению

$$l_{эKB} = l_3 \sum \zeta, \quad (11)$$

где $l_3 = d_{вн}/\lambda$ – эквивалентная длина единичного местного сопротивления, м.

В современной практике проектирования при гидравлическом расчете систем транспорта жидкостей и газов широко применяются номограммы, на которых для соответствующих диаметров трубопроводов графически связываются основные величины: расход (объемный или массовый) и удельные потери давления, при необходимости также наносятся изолинии скорости потока. Для систем отопления из медных трубопроводов в [4] приведены номограммы, называемые в документе «для приближенного гидравлического расчета». Однако они имеют ряд недостатков, основными из которых являются:

- использование зависимости от наружного диаметра без учета толщины стенки, что приводит к неточности в определении удельных потерь давления;
- крупный шаг делений шкал.

В результате исследований авторами были разработаны номограммы, построенные в логарифмических координатах, что существенно повышает их наглядность и удобство практиче-

ского применения. Номограмма для расчета систем отопления с использованием медных труб с наиболее часто применяемыми диаметрами представлена на рис. 1.

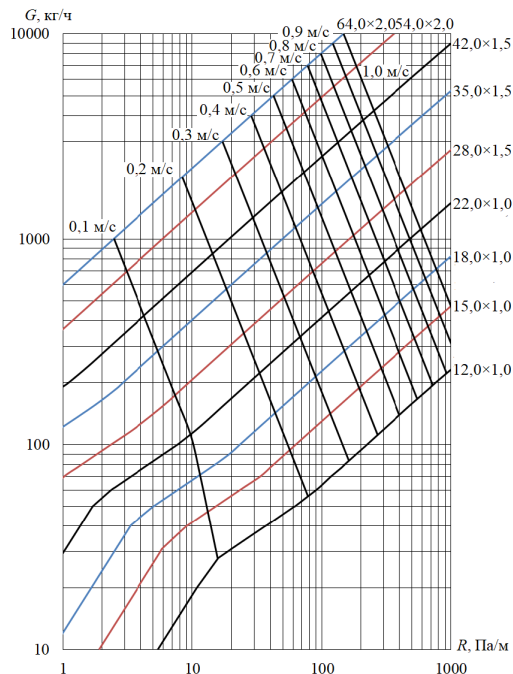


Рис. 1. Номограмма для гидравлического расчета систем отопления из медных трубопроводов ($k_{эKB} = 0,01$ мм)

Fig. 1. Nomogram for hydraulic calculation of copper pipe heating systems ($k_{eq} = 0.01$ mm)

В [5] приводятся две номограммы для расчета медных газопроводов природного газа:

- для расхода газа $V_0 = 0,01$ – $20,00$ м³/ч и удельных потерь давления на трение $R = 0,1$ – $5,0$ Па/м;
- для $V_0 = 0$ – 50 м³/ч и $R = 2$ – 40 Па/м.

Данное разделение, явившееся следствием построения номограмм в равномерной шкале, не всегда удобно. Также в [5] отсутствует номограмма для определения эквивалентной длины единичного местного сопротивления. Поэтому авторами настоящей статьи предлагаются построенные в логарифмических шкалах номограммы для определения величин R и l_3 для природного газа и пропана (рис. 2, 3). Ограничение номограмм расходом 10 м³/ч выбрано, исходя из максимальных значений реальных расходов бытовыми потребителями.

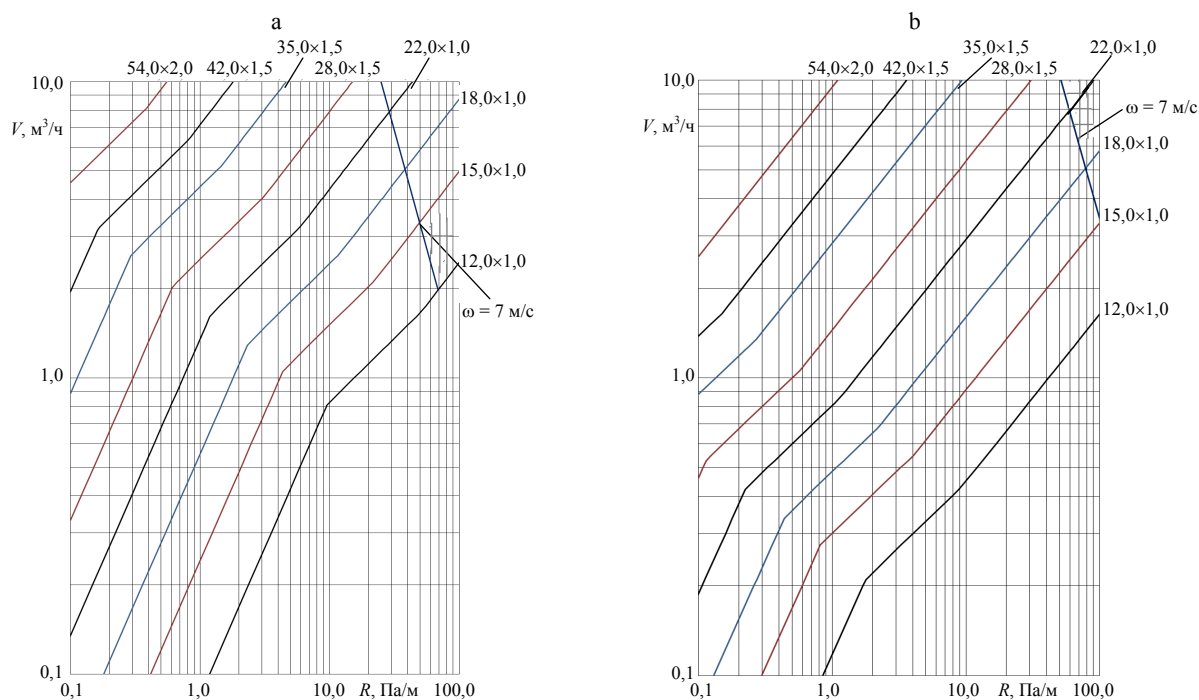


Рис. 2. Номограмма для гидравлического расчета внутренних медных газопроводов ($k_{\text{экр}} = 0,01$ мм):
а – для природного газа ($\rho_0 = 0,73$ кг/м³, $\nu = 14,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с); б – для пропана ($\rho_0 = 2,01$ кг/м³, $\nu = 3,73 \cdot 10^{-6}$ м²/с)

Fig. 2. Nomogram for hydraulic calculation of internal copper gas pipelines ($k_{\text{eq}} = 0.01$ mm):
а – for natural gas ($\rho_0 = 0.73$ kg/m³, $\nu = 14.3 \cdot 10^{-6}$ m²/s); б – for propane ($\rho_0 = 2.01$ kg/m³, $\nu = 3.73 \cdot 10^{-6}$ m²/s)

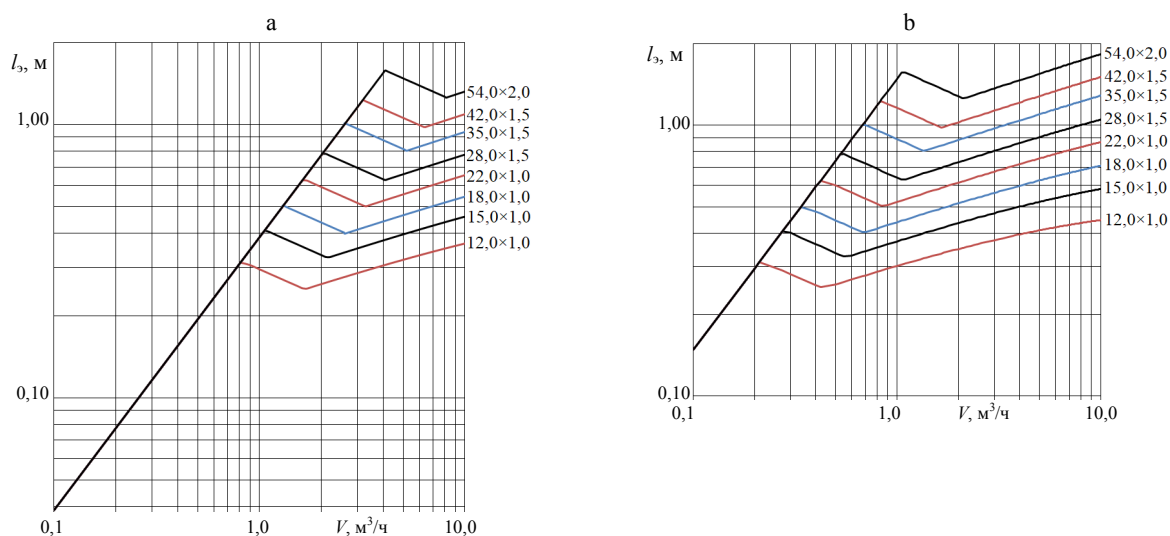


Рис. 3. Номограмма для определения эквивалентной длины единичного местного сопротивления
для медных газопроводов ($k_{\text{экр}} = 0,01$ мм): а – для природного газа ($\rho_0 = 0,73$ кг/м³, $\nu = 14,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с);
б – для пропана ($\rho_0 = 2,01$ кг/м³, $\nu = 3,73 \cdot 10^{-6}$ м²/с)

Fig. 3. Nomogram for determination of equivalent length of single local loss
for copper gas pipelines ($k_{\text{eq}} = 0.01$ mm): а – for natural gas ($\rho_0 = 0.73$ kg/m³, $\nu = 14.3 \cdot 10^{-6}$ m²/s);
б – for propane ($\rho_0 = 2.01$ kg/m³, $\nu = 3.73 \cdot 10^{-6}$ m²/s)

ВЫВОДЫ

1. Достоинства, присущие медным трубопроводам, способствуют их постепенно увели-

чивающемуся распространению во внутренних санитарно-технических системах и во внутридомовом газоснабжении, особенно для индивидуальных жилых домов и коттеджей.

2. Требования по проектированию и методу гидравлического расчета систем из медных трубопроводов в нормах Республики Беларусь отсутствуют. Ввиду этого необходима разработка соответствующих ТНПА.

3. На основании законов механики жидкости и газа разработаны отличающиеся от существующих номограммы, использование которых позволит упростить и ускорить расчет систем отопления и внутреннего газоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

- Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
- 2009 ASHRAE Handbook. Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009. 880 p.
- Hydraulic Services Design Guide. EN 1057. 1st Ed. Australia: International Copper Association Australia, 2014. 21 p.
- Проектирование и монтаж внутренних систем водоснабжения и отопления зданий из медных труб: СП 40-108-2004. Введ. 01.11.2005. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 23 с.
- Авласевич, А. И. Гидравлический расчет внутренних газопроводов из медных труб / А. И. Авласевич, И. Б. Оленев // Фундаментальные исследования. 2017. № 9 (Ч. 1). С. 9–13.
- Газораспределение и газопотребление. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.03-267-2012* (02250). Взамен СНБ 4.03.01-98. Введ. 01.12.2012. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 102 с.
- Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб: СП 42-101-2003. Взамен СП 42-104-97. Введ. 08.07.2003. М.: ЗАО «Полимергаз», 2006. 182 с.
- Борисов, С. Н. Гидравлические расчеты газопроводов / С. Н. Борисов, В. В. Даточный. М.: Недра, 1972. 108 с.
- Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие / С. С. Кутателадзе. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
- Внутренние санитарно-технические устройства: в 3 ч. / В. Н. Богословский [и др.]; под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. М.: Стройиздат, 1990. Ч. 1: Отопление. 344 с.
- Покотилов, В. В. Пособие по расчету систем отопления / В. В. Покотилов. Вена: HERZ Armaturen, 2006. 144 с.
- Ионин, А. А. Газоснабжение / А. А. Ионин. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 439 с.
- Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия: ГОСТ 617-2006.

Взамен ГОСТ 617-90. Введ. 01.11.2007. Минск: Госстандарт, 2007. 34 с.

Поступила 26.04.2018

Подписана в печать 11.07.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

- Idelchik I. E., Shteinberg M. O. (ed.) (1992) *Handbook of Hydraulic Resistances*. 3rd ed. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 672 (in Russian).
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2009) *2009 ASHRAE Handbook. Fundamentals*. 880.
- Hydraulic Services Design Guide. EN 1057*. 1st ed. Australia, International Copper Association Australia, 2014. 21.
- SP [Construction Rules] 40-108-2004. *Designing and Installation of internal Systems for Water Supply Andheating of Buildings while Using Copper Pipes*. Moscow, Federal State Unitary Enterprise Centre of Design Products, 2005. 23 (in Russian).
- Avlasevich A. I., Olenov I. B. (2017) Hydraulic Calculation of Internal Gas-Supply Lines Made of Copper Pipes. *Fundamentalnye Issledovaniya = Fundamental Research*, (9), 9–13 (in Russian).
- TKP [Technical code of Common Practice] 45-4.03-267-2012* (02250). *Gas Distribution and Gas Consumption. Construction Design Norms*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2015. 102 (in Russian).
- SP [Construction Rules] 42-101-2003. *General Provisions on Designing and Construction of Gas-Distribution Systems Made of Metallic and Polyethylene Pipes*. Moscow, CJSC "Polymergaz", 2006. 182 (in Russian).
- Borisov S. N., Datochny V. V. (1972) Hydraulic Calculations of Gas Pipelines. Moscow, Nedra Publ. 108 (in Russian).
- Kutateladze S. S. (1990) *Heat transfer and Hydrodynamic Resistance*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 367 (in Russian).
- Bogoslovskii V. N., Krupnova B. A., Skanavi A. N., Egiazarov A. G., Mikhailov L. M., Nevskii V. V., Moor L. F., Shil'krot E. O., Naumov A. L., Finkel'shtein S. M., Kharchenko N. V., Vasil'ev S. S., Ivyanskii A. Z., Staroverova N. I., Varfolomeeva A. P., Shiller Yu. I. (1990) *Internal Sanitary and Technical Devices: Part 1. Heating*. Moscow, Stroyizdat Publ. 344 (in Russian).
- Pokotilov V. V. (2006) *Textbook for Calculation of Heating Systems*. Vienna, HERZ Armaturen. 144 (in Russian).
- Ionin A. A. (1989) *Gas Supply*. 4th ed. Moscow, Stroyizdat Publ. 439 (in Russian).
- State Standard 617-2006. *Copper and Brass Pipes of Circular Section for General Purpose. Technic Specifications*. Minsk, Gosstandart Publ. 34 (in Russian).

Received: 26.04.2018

Accepted: 11.07.2018

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-515-520>

УДК 539.3

Условие равновесия нетонкого винтового клиновидного двойника, находящегося вдали от поверхности недеформируемого кристалла

Докт. физ.-мат. наук, проф. Ю. В. Василевич¹⁾, канд. физ.-мат. наук, доц. О. М. Остриков²⁾

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

²⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Получено условие равновесия нетонкого винтового клиновидного двойника, находящегося вдали от поверхности кристалла. Рассмотрен случай недеформируемого твердого тела. Установлено, что при таких условиях винтовой двойник существовать не может. Результат находится в полном соответствии с общеизвестными результатами для дислокационных стенок из винтовых дислокаций. В методике вывода условия равновесия использовалось приближение непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах. Форма двойниковых границ описывалась функциями, зависящими от плотности двойникующих дислокаций на двойниковых границах. Принималось равенство нулю сил, действующих на двойниковые границы со стороны дислокаций двойника. Для двойникующих дислокаций предполагалась одна степень свободы вдоль направления двойникования. В модели эффекты переползания дислокаций исключены. Расчет полей напряжений двойника велся в рамках теории упругости. При этом рассматривалась суперпозиция напряжений от каждой двойниковой границы. Решение уравнений искали в виде полинома. Детально рассмотрено линейное приближение такого решения. Полученное условие равновесия выполняется при двух равных нулю значениях – длины двойника и его ширины у устья. Результат имеет большое значение в области механики двойникующихся материалов, материалов с эффектом памяти формы, а также в разработке методик прогнозирования разрушения и функционирования двойникующихся материалов.

Ключевые слова: механическое двойникование, остаточный двойник, условие равновесия, двойникующая дислокация, винтовой двойник

Для цитирования: Василевич, Ю. В. Условие равновесия нетонкого винтового клиновидного двойника, находящегося вдали от поверхности недеформируемого кристалла / Ю. В. Василевич, О. М. Остриков // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 515–520. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-515-520>

The Equilibrium Condition of a Non-Thin Screw Wedge-Shaped Twin Located in the Distance from the Surface of an Undeformed Crystal

Yu. V. Vasilevich¹⁾, O. M. Ostrikov²⁾

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

²⁾P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The equilibrium condition for a non-thin helical wedge-shaped twin located far from the surface of the crystal is obtained. The case of an undeformed solid is considered. It is established that under such conditions a helical twin can not

Адрес для переписки

Василевич Юрий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-36
smat@bntu.by

Address for correspondence

Vasilevich Yuriy V.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel: +375 17 293-92-36
smat@bntu.by

twin can not exist under such conditions. The result is in full conformity with generally known results for dislocation walls from helical dislocations. An approximation for continuous distribution of twinning dislocations at twin boundaries has been used in methodology for deriving an equilibrium condition. The shape of the twin boundaries has been described by functions that depend on density of the twinning dislocations at the twin boundaries. It has been assumed that the forces acting on the twin boundaries from the side of the twin dislocations are equal to zero. One degree of freedom along a twinning direction has been presupposed for twinning dislocations. Dislocation creeping effects have been excluded in the model. A calculation of stress fields for a twin has been carried out within the framework of an elasticity theory. In this case a superposition of stresses from each twin boundary has been considered. The solution of equations has been sought in the form of a polynomial. A linear approximation of such solution is considered in detail. The resulting equilibrium condition is satisfied for two values equal to zero that is a twin length and its width at the mouth. The result is important in the field of mechanics for twinning materials, shape memory materials, and in the development of techniques for predicting destruction and functioning of twinning materials.

Keywords: mechanical twinning, residual twin, equilibrium condition, twinning dislocation, helical twin

For citation: Vasilevich Yu. V., Ostrikov O. M. (2018) The Equilibrium Condition of a Non-Thin Screw Wedge-Shaped Twin Located in the Distance from the Surface of an Undeformed Crystal. *Science and Technique*. 17 (6), 515–520. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-515-520> (in Russian)

Введение

Возможность зарождения и существования механических двойников вдали от поверхности кристалла экспериментально была показана еще в первой половине прошлого века [1]. Существует теория тонких двойников, находящихся вдали от поверхности [2–5]. В [6–8] развивается теория остаточных нетонких механических двойников. Эта теория требует дальнейшего развития, так как границы нетонких двойников являются концентраторами больших внутренних напряжений, способствующих зарождению трещин [9, 10].

Целью данной работы стал вывод условия равновесия винтового клиновидного двойника, находящегося вдали от поверхности твердого тела, в приближении непрерывного распределения двойнивающих дислокаций на двойниковых границах.

Постановка задачи

Контур клиновидного двойника в плоскости, перпендикулярной плоскости двойникова-ния, схематически представлен на рис. 1.

Форму границ двойникового клина будем описывать функциями $f_1(\xi)$ и $f_2(\xi)$, где ξ – текущая координата точки на границе двойника (рис. 1). В данной работе не будем учитывать напряжения дислокаций устья двойника, форма которого на рис. 1 описана функцией $f_3(\xi)$. Также зададимся вопросом о равновесной форме двойника без учета напряжений их концентратора (рис. 1), у которого зародился двойник. Пусть двойнивающими дислокациями не будут

препятствовать силы трения, или величина этих сил пусть будет пренебрежимо малой. Тогда для равновесия двойника необходимо выполнение условий:

$$\vec{F}_1 = 0; \quad (1)$$

$$\vec{F}_2 = 0, \quad (2)$$

где $\vec{F}_1$ – сила, действующая в точке на границе 1 двойника со стороны поля напряжений двойнивающих дислокаций на границах 1 и 2; $\vec{F}_2$ – то же, действующая в точке на границе 2 двойника со стороны поля напряжений двойнивающих дислокаций на границах 1 и 2.

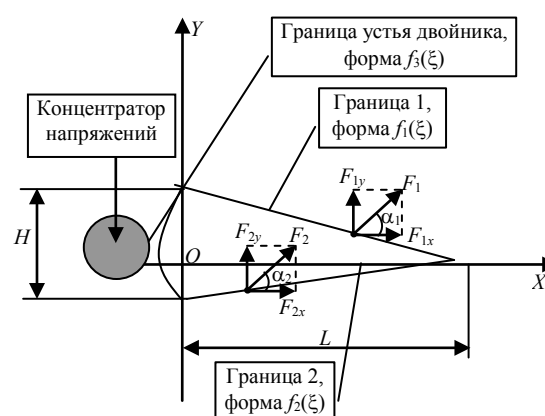


Рис. 1. Схематическое изображение клиновидного двойника, находящегося вдали от поверхности кристалла

Fig. 1. Schematic diagram of wedge-shaped twin located at distance from crystal surface

Введем запрет на перемещение двойнивающих дислокаций вдоль оси OY , т. е. исключим процесс переползания дислокаций. Тогда из (1) и (2) получим:

$$F_{1x} = F_{11x} + F_{21x} = 0; \quad (3)$$

$$F_{2x} = F_{22x} + F_{12x} = 0, \quad (4)$$

где F_{11x} – проекция на ось OX (рис. 1) силы, действующей на двойникующие дислокации на границе 1 со стороны поля напряжений, созданного дислокациями этой же границы; F_{21x} – то же на ось OX силы, действующей на двойникующие дислокации на границе 1 со стороны поля напряжений, созданного двойникующими дислокациями границы 2; F_{22x} – компонента силы, действующей на двойникующие дислокации на границе 2 со стороны поля напряжений, созданного дислокациями этой же границы; F_{12x} – то же силы, действующей на двойникующие дислокации на границе 2 со стороны поля напряжений, созданного двойникующими дислокациями границы 1.

Согласно [11], проекции сил (3) и (4) могут быть найдены с использованием соотношения

$$F_x = b_s \sigma_{yz}, \quad (5)$$

где b_s – модуль винтовой составляющей вектора Бюргера двойникующей дислокации; σ_{yz} – сдвиговая компонента тензора напряжений, созданных дислокациями границ двойника.

В рамках теории упругости справедливо соотношение

$$\sigma_{yz}(x, y) = \sigma_{yz}^{(1)}(x, y) + \sigma_{yz}^{(2)}(x, y), \quad (6)$$

где $\sigma_{yz}^{(1)}(x, y)$, $\sigma_{yz}^{(2)}(x, y)$ – напряжение, обусловленное первой и второй границами двойника соответственно.

Как было показано в [8], напряжения (6) рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{yz}^{(1)}(x, y) = \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) \sigma_{yz}^{(1,0)}(x, y, \xi, f_1(\xi)) d\xi; \quad (7)$$

$$\sigma_{yz}^{(2)}(x, y) = \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) \sigma_{yz}^{(2,0)}(x, y, \xi, f_2(\xi)) d\xi, \quad (8)$$

где

$$\sigma_{yz}^{(1,0)}(x, y, \xi, f_1(\xi)) = \frac{\mu b_s}{2\pi} \frac{x - \xi}{(x - \xi)^2 + (y - f_1(\xi))^2}; \quad (9)$$

$$\sigma_{yz}^{(2,0)}(x, y, \xi, f_2(\xi)) = \frac{\mu b_s}{2\pi} \frac{x - \xi}{(x - \xi)^2 + (y - f_2(\xi))^2}; \quad (10)$$

L – величина проекции на ось OX границ двойника (рис. 1); $\rho_1(\xi)$, $\rho_2(\xi)$ – плотность двойникующих дислокаций на первой и второй двойниковых границах; μ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона.

Формулы (9) и (10) использованы для двойника, находящегося вдали от поверхности кристалла [1].

С учетом (7)–(10) в (3) и (4) можно принять:

$$F_{11x} = b_s \int_0^L \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) \sigma_{yz}^{(1,0)} \times \times (\zeta, f_1(\zeta), \xi, f_1(\xi)) d\xi d\zeta; \quad (11)$$

$$F_{21x} = b_s \int_0^L \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) \sigma_{yz}^{(2,0)} \times \times (\zeta, f_1(\zeta), \xi, f_2(\xi)) d\xi d\zeta; \quad (12)$$

$$F_{22x} = b_s \int_0^L \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) \sigma_{yz}^{(2,0)} \times \times (\zeta, f_2(\zeta), \xi, f_2(\xi)) d\xi d\zeta; \quad (13)$$

$$F_{12x} = b_s \int_0^L \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) \sigma_{yz}^{(1,0)} \times \times (\zeta, f_2(\zeta), \xi, f_1(\xi)) d\xi d\zeta, \quad (14)$$

где ζ – параметр интегрирования;

$$\sigma_{yz}^{(1,0)}(\zeta, f_1(\zeta), \xi, f_1(\xi)) = \frac{\mu b_s}{2\pi} \frac{\zeta - \xi}{(\zeta - \xi)^2 + (f_1(\zeta) - f_1(\xi))^2}; \quad (15)$$

$$\sigma_{yz}^{(2,0)}(\zeta, f_1(\zeta), \xi, f_2(\xi)) = \frac{\mu b_s}{2\pi} \frac{\zeta - \xi}{(\zeta - \xi)^2 + (f_1(\zeta) - f_2(\xi))^2}; \quad (16)$$

$$\sigma_{yz}^{(2,0)}(\zeta, f_2(\zeta), \xi, f_2(\xi)) = \frac{\mu b_b}{2\pi} \cdot \frac{\zeta - \xi}{(\zeta - \xi)^2 + (f_2(\zeta) - f_2(\xi))^2}; \quad (17)$$

$$\sigma_{yz}^{(1,0)}(\zeta, f_2(\zeta), \xi, f_1(\xi)) = \frac{\mu b_b}{2\pi} \cdot \frac{\zeta - \xi}{(\zeta - \xi)^2 + (f_2(\zeta) - f_1(\xi))^2}. \quad (18)$$

Подставим (11)–(14) в (3) и (4). В результате получим:

$$\begin{aligned} & \int_0^L \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) \sigma_{yz}^{(1,0)}(\zeta, f_1(\zeta), \xi, f_1(\xi)) d\xi d\zeta + \\ & + \int_0^L \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) \sigma_{yz}^{(2,0)} \times \\ & \times (\zeta, f_1(\zeta), \xi, f_2(\xi)) d\xi d\zeta = 0; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^L \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(\xi))^2} \rho_2(\xi) \sigma_{yz}^{(2,0)}(\zeta, f_2(\zeta), \xi, f_2(\xi)) d\xi d\zeta + \\ & + \int_0^L \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(\xi))^2} \rho_1(\xi) \sigma_{yz}^{(1,0)} \times \\ & \times (\zeta, f_2(\zeta), \xi, f_1(\xi)) d\xi d\zeta = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Решение данных уравнений будем искать в виде полиномов [12, 13]:

$$f_1(\xi) = a_0 \xi^0 + a_1 \xi^1 + \dots + a_{n-1} \xi^{n-1} + \dots + a_n \xi^n; \quad (21)$$

$$f_1(\zeta) = a_0 \zeta^0 + a_1 \zeta^1 + \dots + a_{n-1} \zeta^{n-1} + \dots + a_n \zeta^n; \quad (22)$$

$$f_2(\xi) = b_0 \xi^0 + b_1 \xi^1 + \dots + b_{m-1} \xi^{m-1} + \dots + b_m \xi^m; \quad (23)$$

$$f_2(\zeta) = b_0 \zeta^0 + b_1 \zeta^1 + \dots + b_{m-1} \zeta^{m-1} + \dots + b_m \zeta^m, \quad (24)$$

где a_i, b_j – коэффициенты ($i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, m$).

При этом для (19) и (20) учтем соотношения:

$$\rho_1(\xi) = \frac{1}{c} \frac{df_1(\xi)}{d\xi}; \quad (25)$$

$$\rho_2(\xi) = \frac{1}{c} \frac{df_2(\xi)}{d\xi}, \quad (26)$$

где c – межплоскостное расстояние в плоскости, перпендикулярной плоскости двойникования.

В первом приближении (при $n = 1$ и $m = 1$) из (21)–(24) получим:

$$f_1(\xi) = a_0 + a_1 \xi, \quad f_1(\zeta) = a_0 + a_1 \zeta; \quad (27)$$

$$f_2(\xi) = b_0 + b_1 \xi, \quad f_2(\zeta) = b_0 + b_1 \zeta; \quad (28)$$

$$\begin{aligned} f_1'(\xi) &= a_0, \quad f_2'(\xi) = b_0, \\ \rho_1(\xi) &= \frac{a_0}{c}, \quad \rho_2(\xi) = \frac{b_0}{c}; \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} f_1(\zeta) - f_1(\xi) &= a_1(\zeta - \xi), \quad f_1(\zeta) - f_2(\xi) = \\ &= (a_0 - b_0) + (a_1 \zeta - b_1 \xi); \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} f_2(\zeta) - f_2(\xi) &= b_1(\zeta - \xi), \quad f_2(\zeta) - f_1(\xi) = \\ &= (b_0 - a_0) + (b_1 \zeta - a_1 \xi). \end{aligned} \quad (31)$$

Далее соотношения (15)–(18) преобразуются в:

$$\sigma_{yz}^{(1,0)}(\zeta, f_1(\zeta), \xi, f_1(\xi)) = \frac{\mu b_b}{2\pi(1 + a_1^2)} \frac{1}{\zeta - \xi}; \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yz}^{(2,0)}(\zeta, f_1(\zeta), \xi, f_2(\xi)) &= \\ &= \frac{\mu b_b}{2\pi} \cdot \frac{\zeta - \xi}{(\zeta - \xi)^2 + ((a_0 - b_0) + (a_1 \zeta - b_1 \xi))^2}; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\sigma_{yz}^{(2,0)}(\zeta, f_2(\zeta), \xi, f_2(\xi)) = \frac{\mu b_b}{2\pi(1 + b_1^2)} \frac{1}{\zeta - \xi}; \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yz}^{(1,0)}(\zeta, f_2(\zeta), \xi, f_1(\xi)) &= \\ &= \frac{\mu b_b}{2\pi} \cdot \frac{\zeta - \xi}{(\zeta - \xi)^2 + ((b_0 - a_0) + (b_1 \zeta - a_1 \xi))^2}, \end{aligned} \quad (35)$$

а соотношения (19) и (20) в:

$$\begin{aligned} & \frac{a_0 \sqrt{1 + a_0^2}}{c(1 + a_1^2)} \int_0^L \int_0^L \frac{1}{\zeta - \xi} d\xi d\zeta + \frac{b_0 \sqrt{1 + b_0^2}}{c} \times \\ & \times \int_0^L \int_0^L \frac{\zeta - \xi}{(\zeta - \xi)^2 + ((a_0 - b_0) + (a_1 \zeta - b_1 \xi))^2} d\xi d\zeta = 0; \end{aligned} \quad (36)$$

$$\frac{b_0\sqrt{1+b_0^2}}{c(1+b_1^2)}\int_0^L\int_0^L\frac{1}{\zeta-\xi}d\xi d\zeta + \frac{a_0\sqrt{1+a_0^2}}{c}\times$$

$$\times\int_0^L\int_0^L\frac{\zeta-\xi}{(\zeta-\xi)^2+((b_0-a_0)+(b_1\zeta-a_1\xi))^2}d\xi d\zeta=0. \quad (37)$$

Из (36) и (37) после несложных преобразований получим условие равновесия рассматриваемого винтового двойника в твердом теле после снятия нагрузок и при допущении о нулевой силе трения для двойникоующих дислокаций

$$\frac{b_0\sqrt{1+b_0^2}(1+a_1^2)}{a_0\sqrt{1+a_0^2}}\times$$

$$\times\int_0^L\int_0^L\frac{\zeta-\xi}{(\zeta-\xi)^2+((a_0-b_0)+(a_1\zeta-b_1\xi))^2}d\xi d\zeta -$$

$$-\frac{a_0\sqrt{1+a_0^2}(1+b_1^2)}{b_0\sqrt{1+b_0^2}}\times$$

$$\times\int_0^L\int_0^L\frac{\zeta-\xi}{(\zeta-\xi)^2+((b_0-a_0)+(b_1\zeta-a_1\xi))^2}d\xi d\zeta=0. \quad (38)$$

Принимаем:

$$a_0=\frac{H}{2}; a_1=-\frac{H}{2L}; b_0=-\frac{H}{2}; b_1=\frac{H}{2L}, \quad (39)$$

где H – ширина двойника у устья (рис. 1).

Тогда для функций, описывающих форму границ двойника, получим:

$$f_1(\xi)=\frac{H}{2}\left(1-\frac{\xi}{L}\right); f_1(\zeta)=\frac{H}{2}\left(1-\frac{\zeta}{L}\right); \quad (40)$$

$$f_2(\xi)=-\frac{H}{2}\left(1-\frac{\xi}{L}\right); f_2(\zeta)=-\frac{H}{2}\left(1-\frac{\zeta}{L}\right). \quad (41)$$

В данном случае (38) примет вид

$$\int_0^L\int_0^L\left(\frac{\zeta-\xi}{(\zeta-\xi)^2+H^2\left(1-\frac{\zeta+\xi}{2L}\right)^2}-\right.$$

$$\left.-\frac{\zeta-\xi}{(\zeta-\xi)^2+H^2\left(\frac{\zeta+\xi}{2L}-1\right)^2}\right)d\xi d\zeta=0. \quad (42)$$

Это условие выполняется при $L=0$, что соответствует расположению двойникоующих дислокаций в стенку. Однако известно [11], что такое расположение винтовых дислокаций неустойчиво. Учитывая второе значение, при котором выполняется условие (42), это $H=0$, стенка винтовых дислокаций стремится к захлопыванию. В связи с этим можно заключить, что устойчивое равновесие нетонкого клиновидного винтового двойника, находящегося вдали от поверхности недеформируемого твердого тела, отсутствует.

ВЫВОД

На основании дислокационной модели двойника в приближении непрерывного распределения двойникоующих дислокаций на двойниковых границах получено условие равновесия нетонкого клиновидного винтового двойника, находящегося вдали от поверхности кристалла. Установлено, что такой двойник в недеформируемом твердом теле не имеет устойчивой равной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якутович, М. В. Форма механического двойника и причины, ее обуславливающие / М. В. Якутович, Э. С. Яковлева // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1939. Т. 9, № 7. С. 882–888.
2. Косевич, А. М. Дислокации в теории упругости / А. М. Косевич. Киев: Наук. думка, 1978. 220 с.
3. Косевич, А. М. Дислокационная теория упругого двойникоования кристаллов / А. М. Косевич, В. С. Бойко // Успехи физических наук. 1971. Т. 104, № 2. С. 201–254. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0104.197106b.0201>.
4. Косевич, А. М. О дислокационной модели двойникоования / А. М. Косевич, Л. А. Пастур // Физика твердого тела. 1961. Т. 3, № 4. С. 1291–1297.
5. Классен-Неклюдова, М. В. Механическое двойникоование кристаллов / М. В. Классен-Неклюдова. М.: АН СССР, 1960. 262 с.
6. Василевич, Ю. В. Условие равновесия остаточного краевого клиновидного нанодвойника в постдеформированном твердом теле / Ю. В. Василевич, О. М. Остриков // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 4. С. 335–342. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-335-342>.
7. Василевич, Ю. В. Выполнение условия равновесия твердого тела с нетонким остаточным двойником в случае плосконапряженного состояния / Ю. В. Василевич, О. М. Остриков // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. трудов. Минск: БНТУ, 2017. Вып. 30. С. 195–199.

8. Остриков, О. М. Механика двойникования твердых тел / О. М. Остриков. Гомель: Гомельский госуд. техн. ун-т имени П. О. Сухого, 2008. 301 с.
9. Влияние двойников на зарождение трещин в Fe + 3,25 % Si при интенсивном сопутствующем скольжении / В. М. Финкель [и др.] // Физика металлов и металловедение. 1979. Т. 48, № 2. С. 415–423.
10. Финкель, В. М. Разрушение кристаллов при механическом двойниковании / В. М. Финкель, В. А. Федоров, А. П. Королев. Ростов н/Д., 1990. 172 с.
11. Миркин, Л. И. Физические основы пластической деформации / Л. И. Миркин. М.: МГУ, 1968. 538 с.
12. Воднев, В. Т. Основные математические формулы / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, Н. Ф. Наумович. Минск: Вышэйш. шк., 1988. 269 с.
13. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука, 1974. 832 с.

Поступила 02.04.2018

Подписана в печать 11.07.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Yakutovich M. V., Yakovleva E. S. (1939) Shape of Mechanical Twin and its Conditioning Factors. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 9 (7), 882–888 (in Russian).
2. Kosevich A. M. (1978) *Dislocation in Elastic Theory*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 220 (in Russian).
3. Kosevich A. M., Boyko V. S. (1971) Dislocation Theory of Elastic Twinning for Crystals. *Soviet Physics Uspekhi*, 14 (2), 286–316. <https://doi.org/10.1070/pu1971v014n03abeh004704>.
4. Kosevich A. M., Pastur L. A. (1961) On Dislocation Twinning Model. *Fizika Tviordogo Tela = Physics of the Solid State*, 3 (4), 1291–1297 (in Russian).

5. Klassen-Neklyudova M. V. (1960) *Mechanical Twinning of Crystals*. Moscow: Publishing House of USSR Academy of Sciences. 262 (in Russian).
6. Vasilevich Yu. V., Ostrikov O. M. (2017) Requirement for Equilibrium of Residual Edge Wedge-Shape Nanotwin in Post-Deformed Solid Body. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (4), 335–342. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-335-342>.
7. Vasilevich Yu. V., Ostrikov O. M. (2017) Fulfilment of Equilibrium Requirement for Solid Body with Non-Thin Residual Twin in Case of Planar Stressed State. *Mashinostroenie: Respublikanskii Mezhvedomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Mechanical Engineering. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, BNTU, 30, 195–199 (in Russian).
8. Ostrikov O. M. (2008) *Mechanics in Twinning of Solid Bodies*. Gomel, P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. 301 (in Russian).
9. Finkel V. M., Korolev A. P., Savel'ev A. M., Fedorov V. A. (1979) Influence of Twins on Crack Initiation in Fe + 3,25 % Si During Intensive Concomitant Sliding. *Fizika Metallov i Metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 48 (2), 415–423 (in Russian).
10. Finkel V. M., Fedorov V. A., Koroliov A. P. (1990) *Destruction of Crystals During Mechanical Twinning*. Rostov-on-Don, Publishing House of Rostov University. 172 (in Russian).
11. Mirkin L. I. (1968) *Physical Fundamentals of Plastic Deformation*. Moscow, Publishing House of Moscow State University. 538 (in Russian).
12. Vodnev V. T., Naumovich A. F., Naumovich N. F. (1988) *Basic Mathematical Formula*. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 269 (in Russian).
13. Korn G., Korn T. (1974) *Mathematics Reference Book*. Moscow, Nauka Publ. 832 (in Russian).

Received: 02.04.2018

Accepted: 11.07.2018

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-521-527>

УДК 541.182:546.824-31

О фотокаталитической активности систем типа диоксид титана/Fe(II, III) в водных суспензиях

Кандидаты хим. наук, доценты В. А. Горбунова¹⁾, Л. М. Слепнева¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Экспериментальным методом проведено сравнение фотокаталитической активности трех систем, перспективных для технологий химической водоочистки, на основе комбинации диоксид титана/Fe(II, III) применительно к модельной реакции окисления органического красителя метилоранжа в водной среде. Изучены фотокаталитические системы на основе: гидрозоля диоксида титана, полученного гидролизом изобутилата титана; аналогичного гидрозоля с добавлением ионов Fe(III); водной суспензии порошка природного титансодержащего минерала ильменита (основной компонент FeTiO₃). В результате исследования в системе с введением в исходную суспензию гидрозоля TiO₂ небольшого количества ионов железа (с получением среды с концентрацией Fe³⁺ до $3,7 \cdot 10^{-5}$ М) обнаружено увеличение скорости деструкции метилоранжа более чем в два раза. В фотокаталитической системе на основе суспензии предварительно обработанного (сульфатированием и прокаливанием) порошка ильменита зарегистрирована достаточно высокая фотокаталитическая активность (степень разложения метилоранжа до 77 %), но при большей экспозиции, чем в случае систем на основе гидрозоля TiO₂. Для фотокаталитических систем изученного типа рассмотрен возможный механизм увеличения их окислительной активности, требующий дополнительного физико-химического исследования.

Ключевые слова: химическая водоочистка, фотокатализаторы, комбинация диоксид титана/Fe(II, III), гидрозоль, суспензия, ильменит, окисление органического красителя, кинетика

Для цитирования: Горбунова, В. А. О фотокаталитической активности систем типа диоксид титана/Fe(II, III) в водных суспензиях / В. А. Горбунова, Л. М. Слепнева // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 521–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-521-527>

On Photocatalytic Activity of Titanium Dioxide/Fe (II, III)-Type Systems in Aqueous Suspensions

V. A. Gorbunova¹⁾, L. M. Sliapniova¹⁾

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

Abstract. A photocatalytic activity of three systems which are considered as rather promising for chemical water purification technologies has been experimentally compared the paper. The comparison has been based on a combination of titanium dioxide/Fe(II, III) in respect to a model oxidation reaction of methyl-orange organic dye in an aqueous medium. The paper has investigated cases of photocatalytic systems which are based on: titanium dioxide hydrosol obtained by hydrolysis of titanium isobutylate; a similar hydrosol with addition of Fe(III) ions; aqueous suspension of natural titanium-containing ilmenite (powder based on FeTiO₃). As a result of the investigations an increase of methylorange destruction rate by more than two times has been observed in the system due to introduction of a small amount of iron ions into initial suspension of TiO₂ hydrosol (while obtaining a medium with Fe³⁺ concentration up to $3.7 \cdot 10^{-5}$ M). Rather high photo-catalytic activity (degree of methyl-orange decomposition up to 77 %) has been measured in a photo-catalytic system based on the suspension of pre-treated (with sulphation and calcination) ilmenite powder but it has been at a higher exposure than for a case of systems based

Адрес для переписки

Горбунова Вера Алексеевна
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-71
chemistry@bntu.by

Address for correspondence

Gorbunova Vera A.
Belarusian National Technical University
9 B. Khmel'nitskogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel: +375 17 293-92-71
chemistry@bntu.by

on TiO_2 hydrosol. A possible mechanism of increasing oxidative activity has been briefly considered for photo-catalytic systems of the type being investigated and it requires an additional physico-chemical analysis.

Keywords: chemical water purification, photo-catalysts, combination of titanium dioxide/Fe(II, III), hydrosol, suspension, ilmenite, oxidation of organic dye, kinetics

For citation: Gorbunova V. A., Sliapniova L. M. (2018) On Photocatalytic Activity of Titanium Dioxide/Fe (II, III)-Type Systems in Aqueous Suspensions. *Science and Technique*. 17 (6), 521–527. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-521-527> (in Russian)

Введение

Благодаря химической инертности, нетоксичности, невысокой стоимости диоксид титана TiO_2 признан наиболее эффективным УФ-фотокатализатором окисления как в жидкой, так и в газовой фазах. Его фотокаталитическая активность зависит от фазового состава, удельной поверхности, размера и морфологии частиц, определяемых, как правило, методом приготовления катализатора [1]. TiO_2 существует в виде нескольких кристаллических модификаций – анатаз, рутил, брукит. Ширина запрещенной зоны для анатаза составляет 3,1–3,2 эВ, для рутила – 2,96–3,00 эВ [1–3]. В большинстве случаев анатаз проявляет более высокую каталитическую активность, чем рутил. Однако литературные данные свидетельствуют о наибольшей каталитической активности у смешанных анатаз-рутильных образцов TiO_2 [2–4].

С введением в структуру TiO_2 оптимальных количеств железа связывают перспективу получения фотокатализаторов, активных в видимом диапазоне спектра. Твердые растворы смешанных оксидов на основе диоксида титана, в частности такие, как $\text{Ti}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-x/2}$, обладают высокой степенью замещения титана на железо, что объясняется близостью радиусов катионов Ti^{4+} и Fe^{3+} . Вместе с тем анализ опубликованных данных обнаружил противоречивость сведений о влиянии допирования железом на фотокаталитические характеристики диоксида титана. Так, наряду с сообщениями о его ингибирующем влиянии было показано, что введение железа может повысить фотокаталитическую активность анатаза в реакциях окисления органических соединений в воде и даже сдвинуть ее в видимую область спектра [3, 5, 6].

Согласно [5], увеличение концентрации железа в твердых растворах $\text{Ti}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-x/2}$ приблизительно до 2 мол. % оказывает благоприятное влияние на их фотокаталитическую активность, но дальнейший рост концентрации приводит к ее падению. При этом для всех возможных значений x наблюдается смещение оптического поглощения образцов в длинноволновую область. В [2] описаны условия синтеза, оптические и фо-

токаталитические свойства нанопорошков рутила, включающего от 2,5 до 20,0 мол. % Fe; их фотокаталитическая активность проявлялась только при ультрафиолетовом облучении и снижалась с ростом концентрации железа.

В [3] прекурсорным способом получены квазиодномерные твердые растворы $\text{Ti}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-x/2}$ ($0,005 \leq x \leq 0,050$) со структурой анатаза, характеризующиеся протяженным строением агрегатов. Изучены их спектры поглощения в УФ- и видимой областях и оценена фотокаталитическая активность в реакции окисления гидрохинона в воде. Выявлено, что синтезированные твердые растворы активны как фотокатализаторы лишь при УФ-облучении, и их активность повышается с ростом концентрации Fe^{2+} -допанта. Авторами [4] показано, что скорость окислительной деструкции резко возрастает при одновременном использовании гомогенного (в присутствии ионов Fe^{3+} , Cu^{2+} , Ag^+ и др.) и гетерогенного катализа. В основе сенсibilизации в гетерогенно-гомогенной системе $\text{Fe}^{3+}/\text{TiO}_2$ лежит фотоперенос электрона в гидроксокомплекс $(\text{FeOH})^{2+}$ с образованием возбужденного кластера $(\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_2\text{OH})$, содержащего ОН-радикалы.

В ряде работ последних лет [7–16] также показано, что еще одной перспективной разновидностью фотокатализаторов для окислительного разложения вредных органических соединений в водных средах (таких как, например, 4-хлорфенол, азокрасители, пиридин и др.) и каталитической этерификации некоторых растительных масел может стать группа материалов на основе недорогой ильменитовой титан- и железосодержащей руды.

С учетом состояния исследований в данной области на модельной реакции фоторазложения метилоранжа в водном растворе нами решались следующие задачи:

1) определить фотокаталитическую активность наночастиц TiO_2 , синтезированного гидролизом изобутилата титана;

2) изучить влияние добавки ионов железа (III) на фотокаталитическую активность гидрозоля диоксида титана;

3) оценить возможность использования в качестве окислительного фотокатализатора смешанного железосодержащего оксида типа FeTiO_3 .

Экспериментальное исследование и полученные результаты

Гидрозо́ль диоксида титана синтезировали разработанным ранее методом [17] с использованием тетраоксида титана, предварительно растворенного в изобутаноле. Известно, что тетраоксид титана подвергается алкоголизу при контакте со спиртами [18]. Это позволяет предположить образование смешанного органо-неорганического титансодержащего соединения с разным соотношением хлорид- и изобутоксид-анионов в молекуле. Гидролиз как тетраоксида титана, так и органических алкоксидных титановых соединений титана приводит к образованию гидрозо́ля диоксида титана. Гидролиз спиртового раствора тетраоксида титана проводили при нагревании до 340–350 К и постоянном перемешивании. Образование зо́ля определяли визуальным появлением опалесценции. Время ее появления зависело от соотношения объемов добавляемого спиртового раствора тетраоксида титана и воды. Режим получения гидрозо́ля, устойчивого на протяжении года, был достигнут при концентрации диоксида титана, равной $1,0 \cdot 10^{-2}$ моль на 1 л суспензии. Увеличение концентрации гидрозо́ля приводило к сокращению индукционного периода его образования и одновременно к уменьшению агрегативной устойчивости зо́ля. Для изучения свойств был взят образец гидрозо́ля с концентрацией диоксида титана $1,0 \cdot 10^{-2}$ моль/л, сохраняющий устойчивость на протяжении как минимум года со дня приготовления.

Активность гидрозо́ля изучалась фотокалориметрическим методом (длина волны 490 нм) при комплексном воздействии ультрафиолетового (УФ) и видимого излучений. Как видно из данных рис. 1, каталитическая активность устойчивого в течение года гидрозо́ля TiO_2 (кривая 2) снизилась по сравнению с начальным моментом (кривая 1) незначительно. Установленные значения константы скорости целевой каталитической реакции фотокаталитического окисления метилоранжа в водной среде для всех изученных авторами каталитических систем, а также временной интервал процессов разложения красителя приведены в табл. 1.

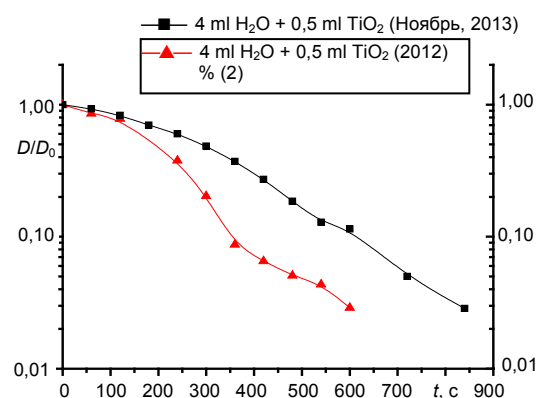


Рис. 1. Кинетические кривые фотодеструкции (УФ + видимый свет) метилоранжа в растворе гидрозо́ля TiO_2 ; обозначение кривых – по табл. 1: 1 – $\blacktriangle$; 2 – $\blacksquare$

Fig. 1. Kinetic curves of methyl-orange photo-destruction (UV + visible light) in TiO_2 hydrosol solution; curve identification – according to tab. 1: 1 – $\blacktriangle$; 2 – $\blacksquare$

С целью изучения влияния ионов железа (III) на фотокаталитическую активность полученного гидрозо́ля диоксида титана был приготовлен водный раствор сульфата железа (III) с молярной концентрацией ионов Fe^{3+} $3 \cdot 10^{-4}$ М, который использовался в качестве добавки (0,1 и 0,3 мл) к раствору гидрозо́ля TiO_2 в процессах разложения метилоранжа. Кроме этого была изучена фотодеструкция метилоранжа в водном растворе сульфата железа (III) без добавки гидрозо́ля диоксида титана. Соответствующие кинетические кривые представлены на рис. 2.

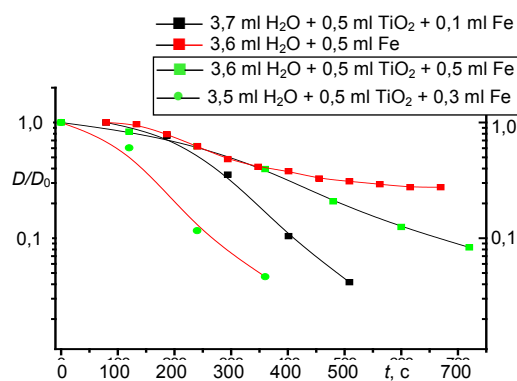


Рис. 2. Кинетические кривые фотокаталитического (УФ + видимый свет) разложения метилоранжа в системах на основе гидрозо́ля диоксида титана (выдержанного 18 мес), легированного ионами Fe^{3+} ; обозначение кривых – по табл. 1: 4 – $\blacksquare$; 5 – $\blacksquare$; 6 – $\bullet$; 7 – $\blacksquare$

Fig. 2. Kinetic curves of photo-catalytic (UV + visible light) methyl-orange decomposition in the systems based on TiO_2 hydrosol (18-month exposure period) which is alloyed by ions Fe^{3+} ; curve identification – according to tab. 1:

4 – $\blacksquare$; 5 – $\blacksquare$; 6 – $\bullet$; 7 – $\blacksquare$

Таблица 1

Кинетические параметры процесса окисления красителя (метилоранж) в водных суспензиях с различными фотокаталитическими компонентами (гидрозоля диоксида титана, порошок ильменита) при воздействии смешанного излучения (УФ-излучение + видимый свет)

Kinetic parameters of dye oxidation process (methyl-orange) in water suspension with various photo-catalytic components (TiO₂ hydrosol, ilmenite powder) from exposure to mixed radiation (UV-radiation + visible light)

№ п/п	Система	Константа скорости реакции окисления k , с ⁻¹	Диапазон параметра t , с	Степень разложения красителя
1	4 мл H ₂ O + 0,5 мл гидрозоля TiO ₂ (свежеприготовленный)	0,0064900	0–600	0,971
2	4 мл H ₂ O + 0,5 мл гидрозоля TiO ₂ (выдержанный 14 мес)	0,0044000	0–840	0,886
3	4 мл H ₂ O + 0,5 мл гидрозоля TiO ₂ (выдержанный 18 мес)	0,0036800	0–720	0,875
4	3,6 мл H ₂ O + 0,5 мл раствора Fe ³⁺	0,0023500	0–600	0,724
5	3,7 мл H ₂ O + 0,5 мл гидрозоля TiO ₂ + 0,1 мл раствора Fe ³⁺	0,0069700	0–480	≥0,958
6	3,5 мл H ₂ O + 0,5 мл гидрозоля TiO ₂ + 0,3 мл раствора Fe ³⁺	0,0090500	0–360	≥0,953
7	3,6 мл H ₂ O + 0,5 мл гидрозоля TiO ₂ + 0,5 мл раствора Fe ³⁺	0,0038700	0–840	0,949
8	Водная суспензия порошка ильменита (несульфатированного)	0,0000026	0–9000	0,021
9	Водная суспензия порошка ильменита (сульфатированного и прокаленного при $T = 420$ K)	0,0001300	0–9000	0,700
10	Водная суспензия порошка ильменита (сульфатированного и прокаленного при $T = 570$ K)	0,0001600	0–9000	0,771

Водный раствор Fe(III) без добавки гидрозоля TiO₂ демонстрирует низкую скорость деградации метилоранжа, полнота разложения красителя не достигается, по-видимому, вследствие быстрого восстановления ионов Fe³⁺ до Fe²⁺. Для смешанных систем TiO₂/Fe³⁺ наблюдается увеличение скорости фотокаталитического разложения метилоранжа даже по сравнению с раствором гидрозоля диоксида титана без добавки ионов Fe³⁺. Причем скорость реакции выше в системе с большей концентрацией ионов Fe³⁺. Полученные результаты согласуются с данными [3].

Исследование фотокаталитической активности смешанного оксиднотитанового-оксидножелезного материала – ильменита FeTiO₃

Ранее в [5–7] было показано, что обработка серной кислотой ильменитовой руды позволяет синтезировать эффективные фотокатализаторы для разложения органических соединений в воде, таких как, например, 4-хлорфенол. Сульфатированный исходный Fe–Ti–O-материал (SFT) проявляет фотокаталитическую активность в видимом свете и термически устойчив до 500 °C. Присутствие в данном материале фаз FeTiO₃, Fe₂O₃ и сульфатированно-

го Fe₂O₃–TiO₂ подтверждено рентгенофазовым анализом и инфракрасной спектроскопией диффузного отражения (DRIFT). Эксперименты по адсорбции-десорбции органических молекул в сочетании со спектрами DRIFT выявили наличие кислотных центров Бренстеда и Льюиса в образцах данного материала, прокаленных при температурах до 500 °C. Эти данные [5] демонстрируют важность присутствия железа в диоксиде титана для достижения его высокой фотокаталитической активности.

В связи с полученными ранее результатами [5–15] авторами статьи в данном исследовании был использован материал на основе смешанного оксида FeTiO₃, являющийся ильменитом техногенного происхождения (образец производства Вольногорского горно-металлургического комбината, Украина) с низкой стоимостью (150–200 дол. за 1 т этого промышленного концентрата). По результатам проведенного рентгенофазового анализа такой образец имеет следующий фазовый состав, мас. %: Fe₂O₃ – 24, TiO₂ – 64, FeO – 10, а также микропримесь SiO₂ и следы оксидов алюминия, ванадия, хрома. Фактическая брутто-формула данного материала – Fe_x⁺³Fe_{1-x}⁺²Ti⁺⁴O_{3+x/2}.

Предварительно исследуемый образец ильменита был подвергнут химической модифи-

кации путем химического сульфатирования: 10 г ильменита измельчали в ступке, смешивали с 20 г концентрированной (96 %) H_2SO_4 и выдерживали смесь в течение 2 ч при температуре 300 К. Затем к смеси добавляли 15 мл воды, что позволяло интенсифицировать процесс сульфатирования. Смесь выдерживали при перемешивании в течение 1 ч. Далее прореагировавшую смесь промывали водой и фильтровали. Полученный сульфатированный ильменит сушили при 380 К на воздухе. Затем половину образца прокаливали на воздухе при температуре 420 К, а вторую – при 570 К.

Фотокаталитическую активность сульфатированного прокаленного ильменита определяли на модельной реакции окисления метилоранжа фотоколориметрическим методом (на длине волны 490 нм) при совместном воздействии ультрафиолетового и видимого света. В раствор метилоранжа объемом 100 мл и исходной концентрацией $4 \cdot 10^{-4}$ М добавляли подготовленный ильменит до концентрации 0,035 г на 1,000 л получаемой суспензии. Облучение проводили при постоянном перемешивании раствора, пробы для определения оптической плотности раствора отбирали каждые 15 мин. Степень разложения метилоранжа в течение 2 ч составила около 70–77 %, причем наименьшая остаточная концентрация метилоранжа (23 %) наблюдалась для образца ильменита, прокаленного при 570 К. Кинетические кривые разложения метилоранжа на двух образцах исследуемого сульфатированного ильменита (прокаленных при 420 и 570 К) представлены на рис. 3.

Как было установлено, наиболее высокие значения константы скорости k реакции фотокаталитического окисления достигаются в системе на основе гидрозоля диоксида титана с оптимальной примесью ионов железа (в частности, $k = 9,05 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ для системы состава 3,5 мл H_2O + 0,5 мл гидрозоля TiO_2 + 0,3 мл раствора Fe^{3+} – табл. 1, поз. 6). Каталитические системы на основе ильменита (полученного с использованием сульфатирования), несмотря на заметно меньшие удельные скорости реакции (с $k = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, табл. 1, поз. 10), являются достаточно перспективными благодаря на порядок меньшей стоимости фотокаталитического материала (руды Fe–Ti–O-системы по сравнению с химически очищенным TiO_2).

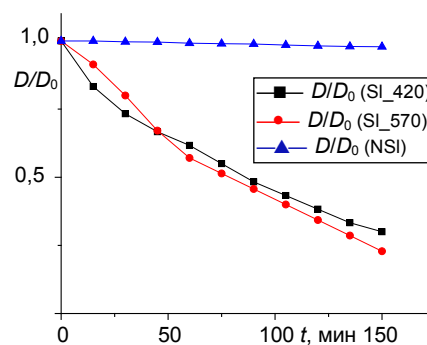


Рис. 3. Кинетические кривые фотокаталитического разложения метилоранжа в водных суспензиях сульфатированного ильменита, прокаленного при 420 К (SI_420) и при 570 К (SI_570), а также в суспензии на основе несulfатированного ильменита (NSI)

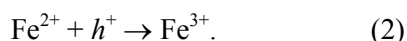
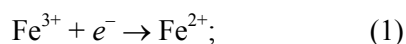
Fig. 3. Kinetic curves of photo-catalytic methyl-orange decomposition aqueous suspensions of sulfated ilmenite calcined at 420 K (SI_420) and at 570 K (SI_570) and also in suspension based on non-sulfated ilmenite (NSI)

Для интерпретации полученных данных следует учитывать результаты ряда авторов для водных суспензий на основе аналогичного каталитического материала. Так, в [5, 19] показано, что увеличение фотокаталитической активности с повышением температуры прокаливания наблюдается для образцов SFT (сульфатированного ильменита), прокаленных при 300–500 °С, на которых обнаружены кислотные центры Бренстеда и Льюиса (тогда как образцы SFT, прокаленные при температуре выше 700 °С, не проявляют кислотности).

Кислотные центры Льюиса могут взаимодействовать с водой и превращаться в кислотные центры Бренстеда, что приводит к активации воды. Это превращение способствует образованию гидроксильных радикалов на поверхности фотокатализатора, который является высокоактивным окисляющим веществом, и может объяснять повышенную фотокаталитическую активность образцов, сульфатированных и прокаленных при температуре от 300 до 500 °С. Сообщалось о сходных тенденциях увеличения фотокаталитической активности для сульфатированных и несulfатированных катализаторов [12]. Было показано, что активность железосодержащих фотокатализаторов при работе в видимом свете [5] может быть связана с переносом электронов из Fe_2O_3 . При облучении видимым светом активируется только эта фаза. Фотогенерированные электроны переходят из зоны проводимости Fe_2O_3 в диоксид титана и накапливаются в зоне про-

водимости диоксида титана, а дырки накапливаются в валентной зоне Fe_2O_3 . Фотогенерированные электроны захватываются кислородом в воде и образуют гидроксильные радикалы для разложения органического красителя. При этом фотокаталитическая деградация также дополняется тем, что фотокатализатор проявляет кислотные свойства, как упоминалось выше.

По данным [5], в каталитических образцах, содержащих железо, его роль может быть весьма важна, так как ион Fe^{3+} может быть не только медиатором межфазного переноса заряда, но и центром рекомбинации через квантовое туннелирование. Если же содержание железа слишком велико, то ионы Fe^{3+} могут становиться центрами рекомбинации, и фотокаталитическая активность может уменьшаться в результате двух реакций с участием электрона и дырки:



ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное исследование фотокаталитических свойств различных типов систем на основе комбинации диоксид титана/ Fe(II) , Fe(III) . Получены данные по их активности в модельной реакции окислительной деструкции органического красителя метилоранжа в водном растворе. Исследованы случаи систем с катализаторами на основе: гидрозоля диоксида титана, приготовленного гидролизом изобутилата титана; аналогичного гидрозоля, содержащего добавки ионов Fe(III) ; суспензии порошка минерала ильменита на основе FeTiO_3 .

2. В системе с введением в водную суспензию исходного гидрозоля TiO_2 небольшого количества ионов железа (с получением среды с концентрацией Fe^{3+} не более $3,7 \cdot 10^{-5}$ М) выявлено существенное увеличение скорости фотохимической деструкции метилоранжа (более чем в два раза).

3. При использовании низкоконтрированной суспензии предварительно обработанного (с сульфатированием и прокаливанием) ильменита достигнута достаточно высокая фотокаталитическая активность, но при большей экспозиции. Так, максимальная степень разложения метилоранжа в этой системе за 2,5 ч со-

ставляла 77 %. Рассмотрен возможный механизм увеличения окислительной активности в данных фотокаталитических окисдных системах, перспективных для дальнейшего углубленного физико-химического исследования, а также для практического применения в технологиях водоочистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемьев, Ю. М. Введение в гетерогенный фотокатализ / Ю. М. Артемьев. СПб.: Химия, 1999. 304 с.
2. Строюк, А. Л. Получение и применение в нанопотокатализе твердотельных полупроводниковых материалов с размерными эффектами / А. Л. Строюк, А. И. Крюков, С. Я. Кучмий // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2010. Т. 8, № 1. С. 1–78.
3. Электронная зонная структура, оптическое поглощение и фотокаталитическая активность допированного железом анатаза / В. Н. Красильников [и др.] // Физика твердого тела. 2013. Т. 55, вып. 9. С. 1788–1796.
4. Соболева, Н. М. Гетерогенный фотокатализ в процессах обработки воды / Н. М. Соболева, А. А. Носович, В. В. Гончарук // Химия и технология воды. 2007. Т. 29, № 2. С. 125–159.
5. Sulfated $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ Synthesized from Ilmenite Ore: a Visible Light Active Photocatalyst / Y. R. Smith [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2010. Vol. 367, is. 1–3. P. 140–147.
6. Beneficiation of Titania by Sulfuric Acid Pressure Leaching of Panzhihua Ilmenite / L. Jia [et al.] // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 150. P. 92–98.
7. Preparation of Synthetic Rutile Via Selective Sulfation of Ilmenite with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Followed by Targeted Removal of Impurities / W. Liu [et al.] // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2017. Vol. 25, is. 6. P. 821–828.
8. Characteristic of an Innovative TiO_2/FeO Composite for Treatment of Azo Dye / C. Huang [et al.] // Separation and Purification Technology. 2007. Vol. 58. P. 152–158.
9. Modified Ilmenite as Catalyst for CWPO-Photoassisted Process under LED Light / P. García-Muñoz [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 318. P. 89–94.
10. Ilmenite (FeTiO_3) as Low Cost Catalyst for Advanced Oxidation Processes / P. García-Muñoz [et al.] // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2016. Vol. 4, No 1. P. 542–548.
11. Sariman, S. Anatase TiO_2 Enrichment from Bangka Ilmenite (FeTiO_3) and its Photocatalytic Test on Degradation of Congo Red / S. Sariman, Y. Krisnandi, B. Setiawan // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 789. P. 538–544.
12. Sulphated $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ Catalysed Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel / S. Anuradha [et al.] // Indian Journal of Chemistry. 2014. Vol. 53A. P. 1493–1499.
13. Torres-Luna, J. A. Powders of Iron(III)-Doped Titanium Dioxide Obtained by Direct Way from a Natural Ilmenite / J. A. Torres-Luna, N. R. Sanabria, J. G. Carriazo // Powder Technology. 2016. Vol. 302. P. 254–260.
14. Lezner, M. Preparation and Photocatalytic Activity of Iron-Modified Titanium Dioxide Photocatalyst / M. Lezner, E. Grabowska, A. Zaleska // Physicochem. Probl. Miner. Process. 2012. Vol. 48, No 1. P. 193–200.

15. Joseph Antony Raj, K. Single-Step Synthesis and Structural Study of Mesoporous Sulfated Titania Nanopowder by a Controlled Hydrolysis Process / K. Joseph Antony Raj, B. Viswanathan // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2009. Vol. 1, is. 11. P. 2462–2469. <https://doi.org/10.1021/am900437u>.
16. Probing of Photocatalytic Surface Sites on $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ Solid Acids by in Situ FT-IR Spectroscopy and Pyridine Adsorption / X. Wang [et al.] // *J. Photochem. Photobiol.* 2006. Vol. 179, No 3. P. 339–347.
17. Получение порошка диоксида титана методом сольволиза и оценка его дисперсности / Л. М. Слепнева [и др.] // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 2015. № 1. С. 10–15.
18. Суйковская, Н. В. Химические методы получения тонких прозрачных пленок / Н. В. Суйковская. Л.: Химия, 1972. 286 с.
19. Pal, B. Preparation and Characterization of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ Binary Mixed Oxides and its Photocatalytic Properties / B. Pal, M. Sharon, G. Nogami // *Mater. Chem. Phys.*, 1999. Vol. 59, No 3. P. 254–261. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00071-1).
8. Huang C., Hsieh W., Pan J., Chang S. (2007) Characteristic of an Innovative TiO_2/FeO Composite for Treatment of Azo Dye. *Separation and Purification Technology*, 58, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.034>.
9. García-Muñoz P., Pliego G., Zazo J. A., Barbero B., Bahamonde A., Casas J. A. (2017) Modified Ilmenite as Catalyst for CWPO-Photoassisted Process under LED Light. *Chemical Engineering Journal*, 318, 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.093>.
10. García-Muñoz P., Pliego G., Zazo J. A., Bahamonde A., Casas J. A. (2016) Ilmenite (FeTiO_3) as Low Cost Catalyst for Advanced Oxidation Processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4 (1), 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.037>.
11. Sariman S., Krisnandi Y., Setiawan B. (2013) Anatase TiO_2 Enrichment from Bangka Ilmenite (FeTiO_3) and its Photocatalytic Test on Degradation of Congo Red. *Advanced Materials Research*, 789, 538–544. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.789.538>.
12. Anuradha S., Raj K., Vijayaraghavan V. R., Viswanathan B. (2014) Sulphated $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ Catalysed Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel. *Indian Journal of Chemistry*, 53A. P. 1493–1499.
13. Torres-Luna J. A., Sanabria N. R., Carriazo J. G. (2016) Powders of Iron(III)-Doped Titanium Dioxide Obtained by Direct Way from a Natural Ilmenite. *Powder Technology*, 302, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.056>.
14. Lezner M., Grabowska E., Zaleska A. (2012) Preparation and Photocatalytic Activity of Iron-Modified Titanium Dioxide Photocatalyst. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48 (1), 193–200.
15. Joseph Antony Raj K., Viswanathan B. (2009) Single-Step Synthesis and Structural Study of Mesoporous Sulfated Titania Nanopowder by a Controlled Hydrolysis Process. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1 (11), 2462–2469. <https://doi.org/10.1021/am900437u>.
16. Wang X., Yu Ji. C., Liu P., Wang X., Su W., Fu X. (2006) Probing of Photocatalytic Surface Sites on $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ Solid Acids by in Situ FT-IR Spectroscopy and Pyridine Adsorption. *Journal of Photochemistry and Photobiology. A: Chemistry*, 179 (3), 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2005.09.007>.
17. Slepneva L. M., Kuznetsova T. A., Gorbunova V. A., Slepnev G. E., Chizhik S. A. (2015) Obtaining of Titanium Dioxide Powder while Using Solvolysis Method and Estimation of its Dispersity. *Vestsi Natsyyanal'nei Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (1), 10–15 (in Russian).
18. Suykovskaya N. V. (1972) *Chemical Methods for Obtaining Thin Transparent Films*. Leningrad, Khimiya Publ. 286 (in Russian).
19. Pal B., Sharon M., Nogami G. (1999) Preparation and Characterization of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ Binary Mixed Oxides and its Photocatalytic Properties. *Materials Chemistry and Physics*, 59 (3), 254–261. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00071-1).

Поступила 03.01.2018

Подписана в печать 10.04.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Artemiev Yu. M. (1999) *Introduction in Heterogeneous Photocatalysis*. Saint-Petersburg, Khimiya Publ. 304 (in Russian).
2. Stroyuk A. L., Kriukov A. I., Kuchmiy S. Ya. (2010) Production of Solid Semiconductor Materials with Size Effects and their Application in Nanophotocatalysis. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 8 (1), 1–78 (in Russian).
3. Krasil'nikov V. N., Zhukov V. P., Pereleyeva L. A., Baklanova I. V., Shein I. R. (2013) Electronic Band Structure, Optical Absorption, and Photocatalytic Activity of Iron-Doped Anatase. *Physics of the Solid State*, 55 (9), 1903–1912. <https://doi.org/10.1134/S1063783413090199>.
4. Soboleva N. M., Nosonovich A. A., Goncharuk V. V. (2007) The Heterogenic Photocatalysis in Water Treatment Processes. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 29 (2), 72–89. <https://doi.org/10.3103/S1063455X07020038>.
5. Smith Y. R., Raj K. J. A., Vaidyanathan (Ravi) Subramanian, Viswanathan B. (2010) Sulfated $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ Synthesized from Ilmenite Ore: a Visible Light Active Photocatalyst. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 367 (1–3), 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.07.001>.
6. Jia L., Liang B., Lü L., Yuan S., Zheng L., Wang X., Li C. (2014) Beneficiation of Titania by Sulfuric Acid Pressure Leaching of Panzhihua Ilmenite. *Hydrometallurgy*, 150, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.09.016>.
7. Liu W., Wang X., Lu Z., Yue H., Liang B., Lü L., Li C. (2017) Preparation of Synthetic Rutile Via Selective Sulfation of Ilmenite with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ Followed by Targeted Removal of Impurities. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25 (6), 821–828. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.10.007>.

Received: 03.01.2018

Accepted: 10.04.2018

Published online: 30.11.2018

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-528-533>

УДК 664.012

Моделирование динамики движения пленки на агрегате по производству полимерно-пленочных материалов

Кандидаты техн. наук, доценты Г. М. Айрапетьянц¹⁾, М. М. Кожевников¹⁾, Н. И. Ульянов¹⁾

¹⁾Могилевский государственный университет продовольствия (Могилев, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Предложены новые эффективные динамические модели движения полимерной пленки, которые в отличие от известных учитывают процессы протекания деформации на агрегате по производству полимерно-пленочных материалов. Отмечено, что процесс деформации полимерной пленки в межсекционной зоне, определяемый ее натяжением, зависит от соотношения линейных скоростей секций и величин натяжений и деформаций в этих секциях. Анализ предложенных динамических моделей движения полимерной пленки показал, что снижение ее деформаций в каждой зоне агрегата может быть достигнуто как путем изменения соотношения скоростей на входе в зону и выходе из нее, так и введением компенсатора возмущающих воздействий, обусловленных деформациями пленки на входе в зону. Коррекция величины натяжения полимерной пленки в каждой зоне агрегата может быть осуществлена изменением соотношения скоростей на входе в зону и выходе из нее, а также изменением натяжения полимерной пленки на входе в зону и частичной компенсацией возмущений, обусловленных деформациями на входе в зону. Выявлены возможные каналы автоматического управления агрегатом по производству полимерно-пленочных материалов с целью улучшения качества продукции. На основе предложенных динамических моделей показано, что для эффективного управления процессом вытягивания необходимо применять системы автоматического измерения скоростей вращения секций агрегата по производству полимерно-пленочных материалов и натяжения пленки. Динамическая модель может быть эффективно использована при создании адаптивной системы управления многодвигательным электроприводом агрегата по производству полимерно-пленочных материалов с целью повышения прочности пленки и снижения ее удлинения.

Ключевые слова: полимерная пленка, деформация, динамические модели

Для цитирования: Айрапетьянц, Г. М. Моделирование динамики движения пленки на агрегате по производству полимерно-пленочных материалов / Г. М. Айрапетьянц, М. М. Кожевников, Н. И. Ульянов // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 528–533. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-528-533>

Dynamics Modelling of Film Motion at Unit for of Polymeric Film Material Production

G. M. Irapietians¹⁾, M. M. Kozhevnikov¹⁾, N. I. Uliyanov¹⁾

¹⁾Mogilev State University of Food Technologies (Mogilev, Republic of Belarus)

Abstract. New effective dynamic models for motion of polymeric film have been proposed in the paper. These models in contrast to known ones take in to account deformation processes which occur at a unit for polymer-film materials production. It has been shown that the deformation process of a polymer film in intersectional area determined by its tension depends on ratio of linear section velocities and tension and deformation values in these sections. An analysis of the proposed dynamic models of polymer film motion has shown that a decrease in its deformations in every zone of the unit can be achieved both by changing ratio of input and output velocities and introducing a compensator for perturbing influences due to deformations

Адрес для переписки

Кожевников Михаил Михайлович
Могилевский государственный университет продовольствия
пр. Шмидта, 3
212027, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 222 48-56-76
mgup@mogilev.by

Address for correspondence

Kozhevnikov Mikchail M.
Mogilev State University of Food Technologies
3 Shmidt Ave.,
212027, Mogilev, Republic of Belarus
Tel.: +375 222 48-56-76
mgup@mogilev.by

of the film at the entrance to the zone. Possible channels for automatic control of the unit for polymer-film material production have been identified with the aim of improving quality of products. While using the proposed dynamic models it has been demonstrated that it is necessary to apply systems for automatic measuring of section rotation speed and film tension in the unit for polymer-film material production in order to ensure effective control over an extrusion process. The proposed dynamic model can be efficiently used to create an adaptive system which is applied to control a multi-motor drive of the unit for of polymer-film material production.

Keywords: polymer film, deformation, dynamic models

For citation: Irapietants G. M., Kozhevnikov M. M., Ulianov N. I. (2018) Dynamics Modelling of Film Motion at Unit for of Polymeric Film Material Production. *Science and Technique*. 17 (6), 528–533. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-528-533> (in Russian)

Выпуск качественных полимерно-пленочных материалов имеет большое значение в структуре современного производства [1]. На агрегатах по производству полимерно-пленочных материалов реализуются непрерывные технологические процессы, характерной особенностью которых является наличие ряда машин, расположенных последовательно и объединенных общим процессом. При формировании пленка проходит ряд технологических участков, на которых время ее пребывания должно быть строго определенным [2]. Кроме этого, для получения требуемых физико-механических характеристик пленка находится под определенным, но различным для каждого технологического участка натяжением. В пленке макромолекулы располагаются хаотично, что обуславливает ее низкую прочность на разрыв, очень высокое удлинение и низкую упругость. При натяжении пленки происходит распределение молекул и ориентация их вдоль одной оси, в результате чего образуются межмолекулярные связи, увеличивается прочность и снижается удлинение. Обеспечение значений этих параметров пленки в допустимых пределах осуществляется с помощью механизмов непрерывного перемещения пленки [3, 4].

Различные возмущения, возникающие в системе агрегата по производству полимерно-пленочных материалов, передаются через механизмы непрерывного перемещения пленки. Происходит рассогласование скоростей валков и нарушается режим натяжения. Непостоянство натяжений в процессе формирования пленки приводит к неоднородности физических и механических свойств по ее длине [5–7]. Отсутствие системы управления за скоростным режимом работы агрегата и натяжением пленки не дает возможности своевременно выявить

дефекты и предотвратить выпуск некачественной продукции.

Анализ агрегатов по производству полимерной пленки показывает, что к ним предъявляются достаточно серьезные требования в отношении поддержания соотношения линейных скоростей между секциями в установившихся ($\pm 1\%$) и динамических ($\pm 2\%$) режимах и регулировании натяжения, особенно в процессе сушки ($\pm 5\%$). Соблюдение указанных требований возможно посредством автоматических систем управления электроприводом, построенных с учетом динамической модели движения пленки [8–10]. Поэтому в данной работе предложены новые эффективные динамические модели движения полимерной пленки, которые в отличие от известных определяют связи между линейными скоростями пленки и ее деформацией и натяжением в каждой секции агрегата. Эти модели могут быть использованы при создании адаптивной системы управления многодвигательным электроприводом агрегата по производству полимерно-пленочных материалов с целью повышения прочности пленки и снижения ее удлинения.

В процессе разработки динамических моделей движения полимерной пленки приняты следующие допущения: при деформации пленки ее поперечные сечения остаются плоскими и перпендикулярными к оси растяжения; движением частиц пленки в поперечном направлении пренебрегаем; скорость движения пленки существенно меньше скорости распространения в них упругих деформаций; пленка имеет одинаковое сечение во всех зонах деформации.

Рассмотрим малый участок Δx (вдоль которого проходит пленка) секции, расположенной между секциями A и B (рис. 1). Через плоскость, находящуюся на расстоянии x от точки A (пре-

дыдущая секция), в рассматриваемый участок Δx за единицу времени входит количество пленки $Q_{\text{вх}}$

$$Q_{\text{вх}} = S \rho v_{\text{вх}},$$

где S – площадь поперечного сечения пленки; ρ – плотность пленки; $v_{\text{вх}}$ – скорость движения пленки на входе в участок Δx .

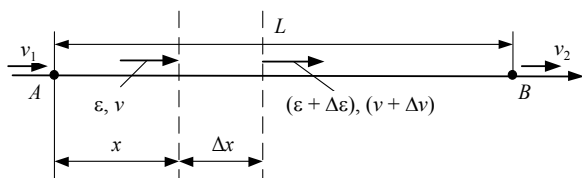


Рис. 1. Малый участок секции агрегата полимерно-пленочных материалов: v_1 – скорость пленки на выходе из секции A; v_2 – скорость пленки на входе в секцию B; v – скорость пленки в рассматриваемой секции; Δv – приращение скорости пленки в рассматриваемой секции; ϵ – деформация пленки в рассматриваемой секции; $\Delta \epsilon$ – приращение деформации пленки в рассматриваемой секции; L – расстояние между секциями A и B

Fig. 1. Small section part of unit for polymeric film materials: v_1 – film speed at section A exit; v_2 – film speed at section B entrance; v – film speed at considered section; Δv – increment of film speed at considered section; ϵ – film deformation at considered section; $\Delta \epsilon$ – increment of film deformation at considered section; L – distance between sections A and B

Примем в приближении, что в пределах малого участка секции Δx площадь поперечного сечения пленки S остается неизменной в процессе ее растяжения (усадки) между секциями A и B. Это допустимо с учетом коэффициентов Пуассона для полимерных пленок. Так, например, коэффициент Пуассона для полиэтиленов составляет 0,15–0,20. За промежуток времени Δt из зоны Δx выходит количество пленки $Q_{\text{вых}}$

$$Q_{\text{вых}} = Q_{\text{вх}} \pm \Delta Q = S(\rho v_{\text{вх}} \pm \Delta(\rho v)).$$

Следовательно, количество материала на участке Δx за счет деформации ΔQ (без учета знака) изменяется на величину

$$\Delta Q = S \Delta(\rho v).$$

По закону неразрывности среды, изменение массы вещества в единицу времени на участке Δx должно быть $\pm \Delta Q$, т. е.

$$\frac{\partial(S \rho \Delta x)}{\partial t} = \pm \Delta Q, \quad (1)$$

или

$$S \Delta x \frac{\partial \rho}{\partial t} = \pm S \Delta(\rho v). \quad (2)$$

В (1) и (2) знак «+» берется для процесса усадки, а знак «–» – для процесса растяжения. В пределе при $\Delta x \rightarrow 0$ имеем

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \pm \frac{\partial(\rho v)}{\partial x}. \quad (3)$$

Формула (3) представляет собой уравнение неразрывности среды для одномерного слоя, когда переменные зависят от одной координаты пространства и времени, при этом плотность среды в одномерном случае

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 \pm \epsilon}, \quad (4)$$

где ρ_0 – плотность недеформированной среды; ϵ – деформация (знак «+» относится к процессу растяжения, знак «–» – к процессу усадки).

Дифференцируя по t уравнение (4) и подставляя результат в (3), получим

$$-\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \pm \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = (1 \pm \epsilon) \frac{\partial v}{\partial x}.$$

Если $\epsilon \ll 1$, что справедливо для отделочных агрегатов полимерных пленок, то получим

$$-\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \pm \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x}.$$

Таким образом, распространение деформации в пленке, пространстве и во времени описывается дифференциальным уравнением в частных производных. Для его решения надо знать распределение скорости частиц материала вдоль участка растяжения. Между частицами материала существуют силы, стремящиеся передать смежным частицам такое же движение, которое приложено к материалу. Между частицами материала, к которым приложена нагрузка, и смежными частицами возникают силы, стремящиеся сообщить соседним частицам движение. Это действие сил задержи-

вается под влиянием сил инерции, действующих в направлении, противоположном движению.

Если под действием приращения силы ΔF сечение материала сместится на величину Δl , то деформация участка Δx запишется как $\varepsilon = \Delta l / \Delta x$, или при $\Delta x \rightarrow 0$

$$\varepsilon = \partial l / \partial x. \quad (5)$$

Скорость движения частиц материала в сечении x

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{\partial l}{\partial t}.$$

Поскольку смещение сечения происходит непрерывно, на основании (5) скорость деформации запишется как

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial l}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial l}{\partial t},$$

или

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (6)$$

Уравнение (6) выражает связь между деформацией и скоростью движения материала. Величина ΔF , действующая на участок Δx :

$$\Delta F = S \Delta \sigma,$$

где σ – нормальное натяжение в сечении x .

С другой стороны, ΔF должна равняться произведению массы $\Delta m = \rho_0 S \Delta x$ на ускорение $\partial v / \partial t$

$$\rho_0 S \Delta x \frac{\partial v}{\partial t} = S \Delta \sigma,$$

или при $\Delta x \rightarrow 0$

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}. \quad (7)$$

Так как связь между напряжением и деформацией однозначно определяется уравнением механического состояния для упругих и упругопластических сред, то, полагая $\sigma = \sigma(\varepsilon(t, x))$, имеем

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}. \quad (8)$$

С учетом (8) равенство (7) примет вид

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x},$$

или

$$\frac{\partial v}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x},$$

где $c = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}}$ – скорость распространения деформаций.

Из изложенного выше видно, что движение частиц в деформируемом материале описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x}; \\ \frac{\partial v}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}. \end{cases} \quad (9)$$

Для решения (9) надо знать, является ли полимерная пленка упругим, упругопластическим или более сложным материалом; являются ли деформации обратимыми или необратимыми; как влияет скорость приложения нагрузки на зависимость $\sigma = \sigma(\varepsilon(t, x))$.

Проследим изменение состояния системы в точке x оси перемещения и примем, что поток однороден, т. е. ρ и v зависят только от t . При принятых допущениях уравнение неразрывности (3) запишем в виде

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_0 v_1 - \rho v_2}{L},$$

где L – расстояние между смежными секциями.

Учитывая (4), получим

$$L \frac{d\varepsilon}{dt} = v_2 - (1 + \varepsilon) v_1,$$

или

$$\frac{L}{v_1} \frac{d\varepsilon}{dt} + \varepsilon = \frac{v_2 - v_1}{v_1}. \quad (10)$$

Если $v_2 - v_1 = \text{const}$, то решение уравнения (10) имеет вид

$$\varepsilon = (v_2 - v_1) / v_1 (1 - e^{-t/\tau}), \quad (11)$$

где $\tau = L/v_1$ – постоянная времени протекания процесса деформации в зоне.

Из (11) видно, что процесс деформации материала в зоне протекает не мгновенно, а характеризуется некоторой постоянной времени τ . Изменение деформации отстает от изменения соотношения скоростей секций. Уравнения (10) и (11) являются динамической моделью межсекционной зоны при отсутствии проскальзывания перемещаемого материала в секциях.

Формула (10) справедлива при условии, что в межсекционную зону входит недеформированный материал. Однако в многосекционном агрегате часто требуется проанализировать процесс деформации материала в промежуточной зоне. В этом случае (10) примет вид

$$\frac{L}{v_1(1+\varepsilon_1)(1+\varepsilon_2)} \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt} + \varepsilon_2 = \frac{v_2(1+\varepsilon_1) - v_1}{v_1}, \quad (12)$$

где ε_1 – деформация материала, входящего в зону; ε_2 – то же в данной зоне.

Динамическая модель (12) демонстрирует, что процесс изменения деформации при скачкообразном изменении скоростей протекает с постоянной времени

$$\tau = \frac{L}{v_1(1+\varepsilon_1)(1+\varepsilon_2)} \frac{d\varepsilon_2}{dt}.$$

Как показали проведенные исследования [9, 10], на агрегатах по производству полимерных пленок не обеспечивается перемещение материала без его проскальзывания в валках под действием разности деформаций в смежных зонах. В этом случае линейная скорость валков v_b не равна скорости выхода из них материалов v . Скорость выхода материала из валков определяется по следующей зависимости:

$$v = v_b (1 + B(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)),$$

где B – коэффициент, характеризующий проскальзывание материала относительно секции.

Между деформацией ε и натяжением T существует зависимость

$$T = k\varepsilon, \quad (13)$$

где k – коэффициент, характеризующий физико-механические свойства материала.

С учетом (13) уравнение (12) запишется следующим образом:

$$\frac{Lk}{v_1(1+T_1/k)(1+T_2/k)} \frac{dT_2}{dt} + \frac{T_2}{k} = \frac{v_2(1+T_1/k) - v_1}{v_1}, \quad (14)$$

где T_1 – натяжение материала, входящего в зону; T_2 – то же в данной зоне.

Динамическая модель (14) показывает, что процесс деформации материала в межсекционной зоне, определяемый его натяжением, зависит от соотношения линейных скоростей секций и величин натяжений в зонах. Для того чтобы этим процессом управлять, в первую очередь необходимо разработать системы автоматического измерения скоростей вращения секций агрегата по производству полимерно-пленочных материалов и натяжения пленки.

ВЫВОД

Анализ предложенных динамических моделей движения полимерной пленки (10), (12), (14) позволяет сделать следующие выводы о возможных каналах управления агрегатом по производству полимерно-пленочных материалов с целью улучшения качества продукции:

– снижение деформаций ε_2 полимерной пленки в каждой зоне агрегата может быть достигнуто как путем изменения соотношения скоростей на входе в зону и выходе из нее (v_1, v_2), так и введением компенсатора возмущений, обусловленных деформациями пленки ε_1 на входе в зону;

– коррекция величины натяжения полимерной пленки T_2 в каждой зоне может быть осуществлена изменением соотношения скоростей на входе в зону и выходе из нее (v_1, v_2), а также изменением натяжения полимерной пленки T_1 на входе в зону и частичной компенсацией

возмущений, обусловленных деформациями ε_1 пленки на входе в зону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шерышев, М. А. Производство изделий из полимерных листов и пленок / М. А. Шерышев. М.: Научные основы и технологии, 2011. 556 с.
2. Евдокимов, В. В. Оборудование и механизация производства полимерных пленочных материалов и искусственных кож / В. В. Евдокимов. М.: Легпромбыт-издат, 1992. 272 с.
3. Лукач, Ю. Е. Оборудование для производства полимерных пленок / Ю. Е. Лукач, А. Д. Петухов, В. А. Сенатос. М.: Машиностроение, 1981. 222 с.
4. Крыжановский, В. К. Производство изделий из полимерных материалов / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов. СПб.: Профессия, 2008. 464 с.
5. Уайт, Д. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины / Д. Уайт, Д. Чой. СПб.: Профессия, 2006. 240 с.
6. Абдель-Бари, Е. М. Полимерные пленки. Технологии производства, деструкция и стабилизация, применение, рециклинг / Е. М. Абдель-Бари, Е. Г. Заиков. СПб.: Профессия, 2010. 352 с.
7. Лебедева, Т. М. Экструзия полимерных пленок и листов / Т. М. Лебедева. СПб.: Профессия, 2009. 216 с.
8. Айрапетьянц, Г. М. Совершенствование систем автоматического регулирования технологическими процессами / Г. М. Айрапетьянц, А. В. Акулич, Н. И. Ульянов. Могилев: Могилев. госуд. ун-т прод., 2012. 322 с.
9. Способ управления процессом получения вискозной пленочной оболочки: а. с. 712411 СССР, МКИЗ, G05 D 27/00 / Г. М. Айрапетьянц, Ю. Н. Ястремский; дата публ. 05.10.1979.
10. Разработка математической модели динамики движения полимерной пленки на агрегате полимерно-пленочных материалов / Г. М. Айрапетьянц [и др.] // Вестник МГУП. 2014. Т. 17, № 2. С. 105–110.

Поступила 08.02.2018

Подписана в печать 25.10.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Sheryshev M. A. (2011) *Production of Items From Polymer Sheets and Films*. Moscow, Nauchnye Osnovy i Tekhnologii Publ. 556 (in Russian).
2. Evdokimov V. V. (1992) *Equipment and Mechanization of Production for Polymer Film Materials and Artificial Leather*. Moscow, Legprombytizdat Publ. 272 (in Russian).
3. Lukach Yu. E., Petukhov A. D., Senatos V. A. (1981) *Equipment for Production of Polymer films*. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 222 (in Russian).
4. Kryzhanovsky V. K., Kerber M. L., Burlov V. V. (2008) *Production of Items from Polymer Materials*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 464 (in Russian).
5. White J., Choi D. (2006) *Polyethylen, Polypropylene and Other Polyolefins*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 240 (in Russian).
6. Abdel-Bary E. M., Zaikov E. G. (2010) *Polymer Films. Technologies of Production, Destruction and Stabilization, Application and Recycling*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 352 (in Russian).
7. Lebedeva T. M. (2009) *Extrusion of Polymer Films and Sheets*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 216 (in Russian).
8. Airapetiants G. M., Akulich A. V., Uliyanov N. I. (2012) *Modernization of Automatic Regulation Systems for Technological Processes*. Mogilev, Publishing House of Mogilev State University of Food Technologies. 322 (in Russian).
9. Airapetiants G. M., Yastremsky Yu. N. (1980) *Control Method for Process to Obtain Viscose Film Casing*: Inventor's Certificate 712411 USSR.
10. Airapet'yants G. M., Ul'yanov N. I., Kozhevnikov M. M., Yasnitskii V. V. (2014) *Development of Mathematical Model for Dynamics of Polymer Film Motion in Unit of Polymer-Film Materials*. *Vestnik Mogilevskogo Gosudarstvennogo Universiteta Prodovol'stviya* [Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies], 17 (2), 105–110 (in Russian).

Received: 08.02.2018

Accepted: 25.10.2018

Published online: 30.11.2018

**Перечень статей, опубликованных
в журнале «Наука и техника» в 2018 г.**

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Алексеев Ю. Г., Королёв А. Ю., Нисс В. С., Паршутто А. Э., Будницкий А. С. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов	3
Босяков М. Н., Козлов А. А. Газодинамические характеристики тлеющего разряда при ионном азотировании	5
Глебов А. В. Технологические особенности освоения месторождений твердых полезных ископаемых с использованием шарнирно-сочлененных самосвалов	3
Даньков А. М. Планетарная плавнорегулируемая передача с силовым замыканием сателлита и центрального зубчатого колеса: от идеи к конструкции	3
Дьяченко О. В., Кардаполова М. А. Параметры лазерной обработки и их влияние на трибологические характеристики покрытий на основе железа	1
Жук А. Н., Качанов И. В., Веременик В. В., Филиппик А. В. Результаты исследований по определению давления реверсивной струи на обрабатываемую плоскую поверхность	1
Zalohin M. Yu., Liubarskyi B. A., Schuklinov S. N., Mychalevych M. G., Leontiev D. N. Study of Proportional Pressure Modulator on the Basis of Electromagnetic-Type Linear Motor (Залогин М. Ю., Любарский Б. А., Шуклинов С. Н., Михалевич Н. Г., Леонтьев Д. Н. Исследование пропорционального модулятора давления на основе линейного двигателя электромагнитного типа)	5
Kalinichenko A. S., Krivosheyev Yu. K., Meshkova V. V., Devoino O. G. Calculation of Particle Flow Temperature during Plasma Spraying of Mixture Consisting of Self-Fluxing Powder and Ceramics (Калиниченко А. С., Кривошеев Ю. К., Мешкова В. В., Девоино О. Г. Расчет температуры потока частиц при плазменном напылении смеси самофлюсующегося порошка и керамики)	3
Капский Д. В., Навой Д. В., Пегин П. А. Управление в интеллектуальной транспортной системе г. Минска	5
Капский Д. В., Шуть В. Н., Пегин П. А. Графовая модель конфликтного взаимодействия транспортных средств на различных перекрестках	3
Качанов И. В., Шаталов И. М., Рубчя А. А. Моделирование процесса скоростного выдавливания биметаллических резцов для дорожных машин в среде программы DEFORM-3D	3
Киселев М. Г., Монич С. Г., Богдан П. С., Сидоров К. А. Физическое моделирование условий взаимодействия обрабатываемого материала с напылами металла, полученными на гладкой поверхности штрипсы в результате ее электроэрозионного модифицирования	3
Козерук А. С., Мальпика Д. Л., Сухоцкий А. А., Филонова М. И., Кузнецик В. О. Исследование влияния наладочных параметров станка на производительность и качество процесса одновременной двусторонней обработки линз	5
Козерук А. С., Мальпика Д. Л., Филонова М. И., Шамкалович В. И., Диас Гонсалес Р. О. Математическое моделирование рабочей зоны технологического оборудования для двусторонней обработки линз	3
Лобашов А. О., Дульфан С. Б., Прасоленко А. В., Доля К. В., Бурко Д. Л. Исследование спроса на «перехватывающие» парковки	1
Loveikin V. S., Romasevich Y. A. Optimization of Bridge Crane Movement Control (Ловейкин В. С., Ромасевич Ю. А. Оптимизация управления движением мостового крана)	5
Луговой В. П., Луговой И. В. Определение размерных параметров кольцевого концентратора ультразвуковой системы	1
Луговой В. П., Пронкевич С. А., Луговой И. В., Довнар С. С. Компьютерное моделирование и анализ колебаний кольцевого концентратора ультразвуковой системы	3

Нгиа Ле Ван Обратная связь в цепи управления автоматизированным сцеплением при трогании грузового автомобиля с места	5
Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Оковитый В. В. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой	3
Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Храпцов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., Шиманский В. И., Черенда Н. Н., Соболевский С. Б. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO ₂ слои)	1
Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Углов В. В., Шиманский В. И., Черенда Н. Н. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями	5
Протасеня О. Н., Ларченков Л. В., Протасеня М. Л. Деформационный механизм уплотнения структурного тела	1
Селюков Д. Д., Вишняков Н. В. Влияние вертикальной кривой на безопасность движения по автомобильной дороге	3
Сушкевич П. П. Трансформация мировой автомобильной промышленности	5
Шелег В. К., Латыпова Е. Ю., Цумарев Ю. А., Цумарев Е. Н. Системный подход к изготовлению неразъемных соединений	5
Шелег В. К., Шатуров Д. Г., Шатуров Г. Ф. Анализ и выбор рациональных режимов резания твердосплавным инструментом при точении валов	1
Yaryta O. A., Mychalevych M. G., Leontiev D. N., Klymenko V. I., Bogomolov V. A., Gritsuk I. V., Novikova Y. B. Features of Controlling Electropneumatic Valves of Actuator to Control its Clutch with Acceleration Valve	
(Ярита А. А., Михалевич Н. Г., Леонтьев Д. Н., Клименко В. И., Богомолов В. А., Грицук И. В., Новикова Е. Б. Особенности управления электропневматическими клапанами исполнительного механизма управления сцеплением с ускорительным клапаном)	1

СТРОИТЕЛЬСТВО

Богославчик П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе	4
Борухова Л. В., Шибeko А. С. Нормирование воздухообмена в помещениях и энергоэффективность жилых зданий	4
Босаков С. В., Зиневич С. И. Расчет прямоугольной плиты на двухслойном основании	2
Босаков С. В. Две контактные задачи о вдавливании кольцевого штампа в упругое полупространство	6
Веренько В. А., Ладышев А. В., Гатальский Р. К. Исследование усталостной долговечности асфальтобетонных, модифицированных полимерными добавками различных типов	6
Довженко О. А., Погребной В. В., Карабаш Л. В. Эффективные шпоночные соединения многопустотных плит перекрытий со стенами в современном крупнопанельном домостроении	2
Зиневич С. И. Конструкция плиты для сборных дорожных покрытий	6
Левкевич В. Е. Берегозащитные сооружения откосного типа на водохранилищах Беларуси и причины их деформаций	6
Leonovich S. N. Algorithm of Plastic Concrete Crack Resistance is Calculation under Capillary Shrinkage Using Generalizing Criteria	
(Леонович С. Н. Алгоритм расчета трещиностойкости бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке по обобщенному критерию)	6
Leonovich S. N. Modeling of Capillary Shrinkage and Cracking in Early-Age Concrete	
(Леонович С. Н. Моделирование капиллярной усадки и трещинообразование бетона в раннем возрасте)	4
Лу Гопин Особенности планировки и застройки научно-технологических парков в условиях провинций Шаньси и Ганьсу в Китайской Народной Республике	6
Мамонов К. А., Нестеренко С. Г., Штерндок Э. С., Грек М. А., Рудомыха А. В. Стейкхолдерно-интегрированный подход к оценке уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов	2
Михайлов В. И., Кононович С. И., Чиберкус Ю. Н., Воронович А. О. Изучение солигорских солейотвалов с помощью новейших геодезических технологий	4
Михневич Э. И. Методика расчета устойчивости креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия	2

Осипов С. Н., Захаренко А. В., Поздняков Д. А. Некоторые особенности ресурсосбережения в строительстве	2
Осипов С. Н., Захаренко А. В., Поздняков Д. А. О долговечности твердых строительных материалов	4
Попов О. В., Попова Ю. Б., Яцынович С. В. Определение предельного сопротивления дилатирующего грунта сдвигу при помощи искусственных нейронных сетей	6
Пшембаев М. К., Ковалев Я. Н. Оптимизация пропиточного состава для защиты бетонных покрытий автомобильных дорог	2
Пшембаев М. К., Ковалев Я. Н. Теоретические предпосылки упрочнения микроструктуры поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий с помощью коллоидного вещества	6
Рутковский М. А., Шибeko А. С., Галыня К. И. Гидравлический расчет медных трубопроводов систем отопления и внутреннего газоснабжения	6
Smilka V. A. Detection of Reflexive Signs in Town Planning Systems of Ukraine and Republic of Belarus	
(Смилка В. А. Выявление рефлексивных признаков градостроительных систем Украины и Республики Беларусь)	2
Смоляков А. В. Эффективность в цементе и цементном бетоне диспергированной гранитной породы	4
Шалый Е. Е., Ким Л. В., Леонович С. Н., Степанова А. В. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений	2
Шибeko А. С. Некоторые способы экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов	2
Юхневский П. И. Термохимия реакций взаимодействия сульфатов натрия и алюминия с компонентами гидратирующегося портландцемента	2

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Лагунович Н. Л. Усовершенствованный технологический маршрут формирования биполярного транзистора со статической индукцией	1
Старосотников Н. О., Фёдорцев Р. В. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах	1

ЭКОНОМИКА ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Близнюк О. С. Методологические подходы к исследованию понятия «конкурентоспособность»	4
Ивуть Р. Б., Попов П. В., Лапковская П. И., Емельянович И. В. Оценка влияния автотранспортной инфраструктуры на социально-экономические показатели Минской области	4
Козловский В. Н., Айдаров Д. В., Шанин С. А. Разработка и реализация подхода к определению целей в области качества автопроизводителя по результатам гарантийной эксплуатации автомобилей	4
Царенкова И. М. Экономические основы выбора направлений модернизации сети автомобильных дорог	4
Швайба Д. Н. Системный анализ показателей социально-экономической безопасности	4

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

Айрапетьянц Г. М., Кожевников М. М., Ульянов Н. И. Моделирование динамики движения пленки на агрегате по производству полимерно-пленочных материалов	6
Василевич Ю. В., Остриков О. М. Условие равновесия нетонкого винтового клиновидного двойника, находящегося вдали от поверхности недеформируемого кристалла	6
Горбунова В. А., Слепнева Л. М. О фотокаталитической активности систем типа диоксид титана/Fe(II, III) в водных суспензиях	6
Zubrzycki Ja., Karpinski R., Jaworski L., Ausiyevich A. M., Smidova N. Structural Analysis of the Pelvic Girdle before and after Hip Replacement Procedure	
(Зубжицки Я., Карпиньски Р., Яворски Л., Авсиевич А. М., Смидова Н. Структурный анализ таза до и после процедуры замены тазобедренного сустава)	2