

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Серия 2. Строительство
Серия 3. Электронные системы

Издается с января 2002 года

Периодичность издания – один раз в два месяца

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет



Science and Technique V. 19, No 5 (2020)

International
Scientific and Technical Journal

Series 2. Civil and Industrial Engineering
Series 3. Electronic Systems

Published from January 2002

Publication frequency – bimonthly

Founder

Belarusian National
Technical University

Журнал включен в базы данных:

Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:

Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Строительство

Давыдов Е. Ю., Бондарович А. И. К расчету угловых сварных швов	367
Босаков С. В., Скачэк П. Д. Действие сосредоточенной силы на 1/8 однородного изотропного пространства ...	372
Далидовская А. А., Пастушков В. Г. Защитные мероприятия при строительстве наземных сооружений над существующими подземными	377
Богославчик П. М., Евдокимов В. А. Расход твердого стока при размыве низового откоса грунтовой плотины	384
Козунова О. В. Развитие теории расчета шарнирно соединенных балок на упругом основании	389
Молодод А. С. Экспериментальные исследования технологии усиления железобетонных колонн углеродными волокнами	395
Жолудь Н. И. Стратегии трансформации планировочной структуры городов-спутников Минской агломерации	400

CONTENTS

Civil and Industrial Engineering

Davydov E. Yu., Bondarovich A. I. To Calculation of Fillet Welds	367
Bosakov S. V., Skachok P. D. Concentrated Force Action on 1/8 Homogeneous Isotropic Space.	372
Dalidovskaya A. A., Pastushkov V. G. Protective Measures during Construction of Ground Structures over Existing Underground Structures	377
Bohaslauchyk P. M., Evdokimov V. A. Consumption of Solid Runoff during Erosion of Bottom Slope of Soil Dam	384
Kozunova O. V. Development of Calculation Theory for Hinged-Connected Beams on Elastic Base	389
Molodid O. S. Experimental Research of Technology for Strengthening Reinforced Concrete Columns with Carbon Fibers	395
Zholud' N. I. Planning Structure Transformation Strategies for Satellite Cities of the Minsk Agglomeration	400

Михайлов В. И., Мысливчик Е. Ю. Картографическая экстраполяция как метод прогнозирования природных явлений и процессов	407
Коликов А. О., Пастушков Г. П. Конструкция одноуровневого станционного комплекса для применения технологии сквозной проходки	413

Электронные системы

Makarych M. V., Popova Yu. B., Shved M. O. Electronic Lexicography: Traditional and Modern Approaches (Макарич М. В., Попова Ю. Б., Швед М. О. Компьютерная лексикография: традиционные и современные методологии)	421
Старосотников Н. О., Подскребкин И. В., Фёдорцев Р. В. Методика определения элементов внутреннего ориентирования многоматричных оптико-электронных аппаратов	428
Гулай А. В., Зайцев В. М. Интеллектуальная модель потенциальных рисков возникновения техногенной катастрофы	437

Mikhailov V. I., Myslivchik E. Yu. Cartographic Extrapolation as Method for Forecasting Natural Phenomena and Processes	407
Kolikov A. O., Pastushkov G. P. Single-Level Station Complex Structure for Application of Through Driving Construction Method	413

Electronic Systems

Makarych M. V., Popova Y. B., Shved M. O. Electronic Lexicography: Traditional and Modern Approaches	421
Starasotnikau M. A., Padscrebkin I. V., Feodortsau R. V. Method for Determining Elements of Internal Orientation Calibration in Multi-Matrix Optoelectronic Devices	428
Gulay A. V., Zaitsev V. M. Intelligent Model of Potential Risks in Emergence of Man-Made Disaster	437

**Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv**

Редакционная коллегия

- В. В. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
С. В. БОСАКОВ (Республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», Минск, Республика Беларусь),
Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
О. Г. ДЕВОЙНО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
К. В. ДОБРЕГО (Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь),

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

Editorial Board

- V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical University, 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 University, 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),
O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
K. V. DOBREGO (Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

- 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 государственный технологический 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),
- О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
- 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 State Technological 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),
- O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

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

С. А. ЧИЖИК (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

А. Н. ЧИЧКО (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 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)

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

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

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>

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 29.09.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,75. 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, 2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-367-371>

УДК 624.014

К расчету угловых сварных швов

Докт. техн. наук, проф. Е. Ю. Давыдов¹⁾, канд. техн. наук А. И. Бондарович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. При выполнении сварных соединений не всегда удается плотно прижать соединяемые элементы перед наплавкой сварного шва. В нормативных документах по сварным соединениям допустимый зазор между соединяемыми элементами может достигать: 3 мм – при сварке покрытым электродом; 2 мм – при сварке в защитных газах. В то же время в нормативах по расчету сварных соединений наличие зазора не учитывается. Для определения влияния зазора на несущую способность сварного шва проведены экспериментальные исследования. На Минском заводе технологических металлоконструкций были изготовлены образцы со сварными соединениями двух типов – для работы на сдвиг и отрыв. С целью сопоставления половину образцов изготовили без зазоров, а другую половину – с зазорами между соединяемыми элементами. Испытания проводили в научно-исследовательской лаборатории БНТУ. По результатам опытов сделаны выводы, что зазоры между соединяемыми элементами существенно снижают несущую способность сварных швов. Кроме того, осмотр поверхностей разрыва показал, что при наличии зазора поверхности среза сварного шва проходят по границе сплавления основного и наплавленного металлов. Экспериментально установлено, что имеющийся зазор приводит к некоторому увеличению глубины проплавления. Однако последний фактор не компенсирует снижение несущей способности сварного шва, обусловленное наличием зазора между соединяемыми элементами.

Ключевые слова: сварной шов, зазор, образец, катет, глубина проплавления

Для цитирования: Давыдов, Е. Ю. К расчету угловых сварных швов / Е. Ю. Давыдов, А. И. Бондарович // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 367–371. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-367-371>

To Calculation of Fillet Welds

E. Yu. Davydov¹⁾, A. I. Bondarovich¹⁾

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

Abstract. When making welded joints, it is not always possible to press tightly elements to be joined before surfacing the weld. In normative documents on welded joints, the allowable gap between the elements to be connected can reach 3 mm when welding with a covered electrode and 2 mm when welding in shielded gases. At the same time the presence of a gap is not taken into account in the standards for calculation of welded joints. Experimental studies have been carried out to determine effect of the gap on the bearing capacity of the weld. Specimens have been made with welded joints of two types: for work in shear and pull-out. For the purpose of comparison, half of the specimens have been made without gaps, and the other half with gaps between the elements to be joined. The specimens have been made at the Minsk plant of technological metal structures, and their tests have been carried out in a research laboratory of the Belarusian National Technical University. Based on the results of the experiments, it has been concluded that the gaps between the elements to be joined significantly reduce the bearing capacity of the welded joints. In addition, inspection of fracture surfaces have shown that, in the presence of a gap,

Адрес для переписки

Давыдов Евгений Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25/1,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-96-97
davydov@bntu.by

Address for correspondence

Davydov Eygeney Yu.
Belarusian National Technical University
25/1, F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-96-97
davydov@bntu.by

the cut surfaces of the weld pass along the fusion boundary of the base and deposited metals. It has been experimentally established that the existing gap leads to a slight increase in the penetration depth. However, the latter factor does not compensate for the decrease in the bearing capacity of the welded joint due to the presence of a gap between the elements to be joined.

Keywords: welded joint, gap, specimen, cathetus/leg, penetration depth

For citation: Davydov Y. Yu., Bondarovich A. I. (2020) To Calculation of Fillet Welds. *Science and Technique*. 19 (5). 367–371. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-367-371> (in Russian)

Введение

При изготовлении стальных конструкций в процессе сварки, как правило, не всегда удается обеспечить плотное касание элементов в тавровых, нахлесточных и угловых соединениях. На рис. 1 приведена схема расчетных сечений сварного соединения с угловым швом [1, 2]. Сечение по наплавленному металлу обозначено символом f , сечение по границе сплавления – z , зазор – символом δ . Сечение по наплавленному металлу направлено перпендикулярно гипотенузе прямоугольного треугольника, вписанного во внешнюю часть сварного шва, а сечение по границе сплавления проходит через точки пересечения сварным швом поверхностей соединяемого элемента.

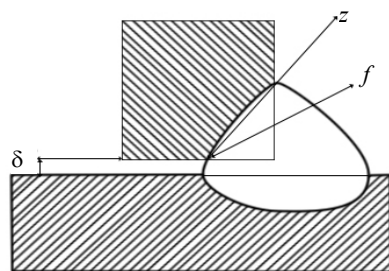


Рис. 1. Поперечное сечение углового шва в тавровом соединении

Fig. 1. Cross-section of fillet weld in T-joint

Определение катета сварного шва осуществляется по формулам [1, 2]:

$$K_f \geq N / \beta_f l_w R_{wf}; \quad K_f = N / \beta_z l_w R_{wz}, \quad (1)$$

где β_f , β_z – принимаются в зависимости от вида сварки, положения при сварке и значения катета, которое на этом этапе расчета предварительно берется в интервале $K_{fmin} - K_{fmax}$; l_w – рас-

четная длина сварного шва; R_{wf} , R_{wz} – расчетное сопротивление срезу по металлу шва и металлу границы сплавления.

Как видно из (1), зазор между соединяемыми элементами (δ) не учитывается. Согласно действующим нормативным документам по сварным соединениям [3–8], зазор между соединяемыми элементами может достигать: 3 мм – при сварке покрытым электродом; 2 мм – при сварке в защитных газах. В то же время наименьшее значение катета: всего 4 мм – при ручной; 3 мм – при механизированной сварке [2]. При толщинах соединяемых элементов 15 мм и более наибольшее значение зазора (3 мм) и наименьшее значение катета (4 мм) могут оказаться в одном сварном соединении.

С целью определения влияния зазора между соединяемыми элементами на несущую способность сварного шва проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования

Для проведения исследований были изготовлены образцы двух типов, где соединяемые элементы воспринимали сдвигающие и отрывающие усилия. На рис. 2 представлены образцы, предназначенные для восприятия сдвигающих усилий. Образцы каждого типа выполняли в двух вариантах: без зазора ($\delta = 0$) (рис. 2а) и с зазором ($\delta = 2-3$ мм) (рис. 2б). Фактически зазоры в этих образцах получились равными 2,5 и 2,9 мм, а катеты сварных швов находились в пределах от 4,0 до 5,7 мм. Катеты замерялись как катеты прямоугольных треугольников, вписанных во внешнюю часть наплавленного металла.

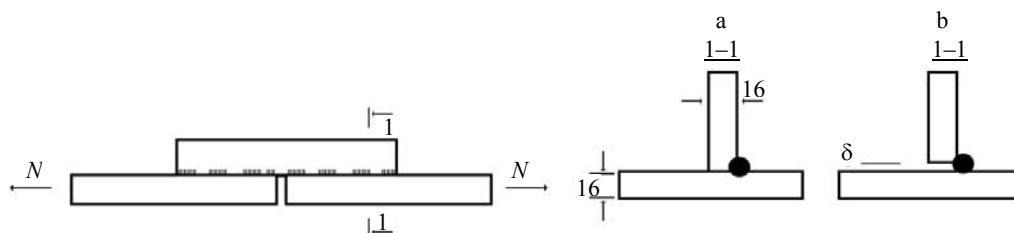


Рис. 2. Образцы для испытаний на сдвиг

Fig. 2. Shear test specimens

На рис. 3 представлены образцы, предназначенные для восприятия отрывающих усилий. Фактически зазоры в этих образцах получились равными 2,1 и 2,9 мм, а катеты сварных швов находились в пределах от 2,7 до 8,4 мм.

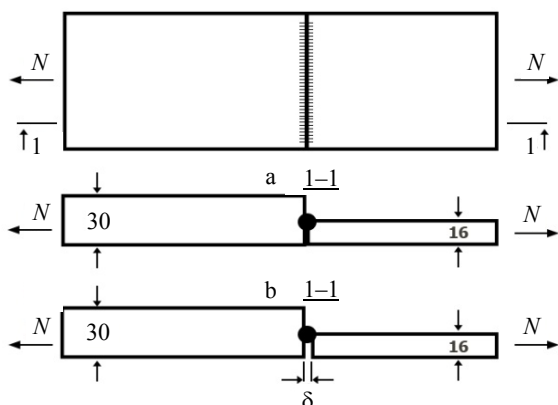


Рис. 3. Образцы для испытаний на отрыв

Fig. 3. Pull-out test specimens

В образцах для испытаний на сдвиг толщины соединяемых пластин принимались 16 мм, а на отрыв – 16 и 30 мм. Материал пластин – сталь С245. Полная длина сварного шва в каждом образце составляла 100 мм. Сварные швы наплавлялись полуавтоматом. Использовалась сварочная проволока Св 08Г2С диаметром 2 мм. Сварка выполнялась в нижнем положении в среде защитного газа (аргона). Образцы изготавливались на Минском заводе технологических металлоконструкций.

Сечения сварных швов в образцах, испытанных на сдвиг без зазора и с зазором, приведены на рис. 4, на отрыв – на рис. 5.

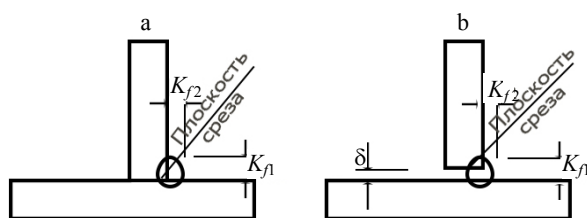


Рис. 4. Сечения сварных швов в образцах, испытанных на сдвиг, без зазора (а) и с зазором (б)

Fig. 4. Sections of welded joints in shear test specimens, without gap (a) and with gap (b)

Эксцентриситет, обусловленный формой образцов, приведенных на рис. 4, 5, вызывает появление незначительных нормальных напряжений. В зоне сварного шва эти напряжения не

превышали 3 кН/см^2 . При сопоставлении несущих способностей сварных соединений, которые определяются значениями касательных напряжений, влияние нормальных напряжений не учитывалось.

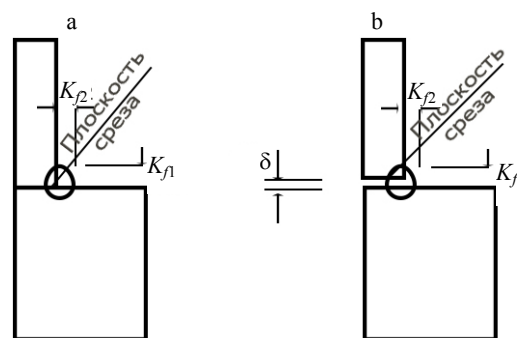


Рис. 5. Сечения сварных швов в образцах, испытанных на отрыв, без зазора (а) и с зазором (б)

Fig. 5. Sections of welded joints in pull-out test specimens, without gap (a) and with gap (b)

Испытания образцов проводились в научно-исследовательской лаборатории бетона и строительных материалов БНТУ на универсальной гидравлической машине WAW-1000 (рис. 6) с диапазоном измерения нагрузки 1000 кН (свидетельство о калибровке БелГИМ ВУ 01 № 1402-47 до 12.12.2019).



Рис. 6. Испытание образца на машине WAW-1000

Fig. 6. Specimen testing on WAW-1000 machine

Результаты исследований

Осмотр плоскостей среза сварных швов показал, что в сварных швах без зазора плоскость среза проходила по наплавленному металлу, в то время как в сварных швах с зазором – по

границе сплавления основного и наплавленного металлов (рис. 4, 5).

При обработке результатов эксперимента для сопоставления несущих способностей использовались усредненные значения катета (K_{cp}), которые определялись как для сварного шва с одинаковыми катетами ($K_{j1} = K_{j2}$) из условия равенства высоты треугольника с катетами K_{j1} и K_{j2} и высоты равностороннего треугольника с K_{jcp} . Значения фактических и усредненных катетов приведены в табл. 1, 2, где образцы без зазора обозначены М1, М2, М5 и М6, а с зазором – М3, М4, М7 и М8. В табл. 1, 2 h – это глубина проплавления. Следует отметить, что глубина проплавления не была постоянной вдоль сварного шва. В табл. 1, 2 приведены средние значения этого параметра.

Таблица 1

Геометрические и механические характеристики образцов, испытанных на сдвиг

Geometric and mechanical characteristics of shear test specimens

Образец	K_{j1} , мм	K_{j2} , мм	K_{cp} , мм	δ , мм	h , мм	N , кН	N/K_{cp}	h/K_{cp}
М1	4,3	4,0	4,1	0	1,7	192,0	46,80	0,410
М2	5,0	4,7	4,8	0	1,7	192,5	40,10	0,354
М3	4,4	5,7	5,0	2,5	3,0	149,8	29,90	0,600
М4	4,5	5,6	5,1	2,9	2,8	153,3	30,06	0,550

Таблица 2

Геометрические и механические характеристики образцов, испытанных на отрыв

Geometric and mechanical characteristics of pull-out test specimens

Образец	K_{j1} , мм	K_{j2} , мм	K_{cp} , мм	δ , мм	h , мм	N , кН	N/K_{cp}	h/K_{cp}
М5	5,4	3,5	4,15	0	1,6	205,0	49,4	0,385
М6	3,0	2,7	2,84	0	1,2	144,4	50,8	0,422
М7	8,4	5,5	6,50	2,9	3,0	217,0	33,5	0,460
М8	5,0	4,0	4,42	2,1	2,0	166,5	37,6	0,450

Учитывая неодинаковость объемов наплавленного металла, сопоставление несущих способностей произведено в относительных величинах в килоньютонах на миллиметр. В табл. 1 приведены сопоставления несущих способностей сварных швов в соединениях, работаю-

щих на сдвиг. Для сварных швов с зазором, испытанных на сдвиг, относительная несущая способность оказалась в 1,34–1,56 раза меньше несущей способности сварных швов без зазора.

Для сварных швов с зазором, испытанных на отрыв, относительная несущая способность оказалась в 1,35–1,47 раза меньше относительной несущей способности сварных швов без зазора. Следует отметить, что снижение несущей способности, вызванное зазором, не является прямо пропорциональным. Это обусловлено тем, что при наличии зазора несколько увеличилась глубина проплавления: для сварных швов без зазора она составила 1,4–1,7 мм, а с зазором 2–3 мм. Относительное значение глубины проплавления (h/K_{cp}) для образцов без зазора 0,36–0,49, а с зазором 0,45–0,57.

Аналитически зависимость несущей способности сварного соединения с учетом зазора между соединяемыми элементами может быть представлена следующим выражением:

$$N = N_0 \left[1 - \left(\delta / K_{cp} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где N_0 – несущая способность сварного соединения при отсутствии зазора.

Выражение (2) обеспечивает достаточно высокую точность (в пределах 5 %) при определении несущей способности сварного соединения с зазором между соединяемыми элементами.

ВЫВОДЫ

1. Зазоры между соединяемыми элементами оказывают существенное отрицательное влияние на несущую способность сварного шва. Несущая способность, приходящаяся на 1 мм катета сварного шва, в образцах с зазором оказалась на 36–24 % меньше, чем в образцах без зазора.

2. В образцах без зазора плоскости среза проходили только по наплавленному металлу сварного шва.

3. В образцах с зазором плоскости среза проходили лишь по границе сплавления основного и наплавленного металлов.

4. На основании проведенных исследований рекомендуется катеты сварных швов, вычисленные по формулам [1, 2], увеличивать на значение зазора, допускаемого по ГОСТам [3–8]:

$$K_f \geq N/\beta_f l_w R_{wf} + \delta; \quad K_z = N/\beta_z l_w R_{wz} + \delta. \quad (3)$$

5. Данная рекомендация одобрена ЦНИИСК имени Кучеренко – разработчиком СНИП II-23–81* и СП 16.13330.2017 (письмо от 15.08.2019 №3-1124) и соответствует требованиям ГОСТ 23118–2012 [9]. Увеличение катета на значение допускаемого зазора следует предусматривать при разработке рабочих чертежей в стадии КМ, так как в стадии КМД вносить изменения в рабочий проект можно только с согласия организации – разработчика чертежей КМ (п. 4.3 [10]).

6. Очевидно, что увеличение катета следует предусматривать, если в процессе изготовления стальных конструкций не представляется возможным гарантированно исключить появление зазоров между соединяемыми элементами. При этом приведенное правило должно быть внесено в нормативные документы по проектированию стальных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стальные конструкции: СНИП II-23–81*. М.: Госстрой СССР, 1991. 38 с.
2. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНИП II-23–81*: СП 16.13330.2017. М., 2017. 148 с.
3. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 5264–80. М.: Стандартинформ, 2010. 35 с.
4. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 14771–76. М.: Стандартинформ, 2007. 39 с.
5. Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 11533–75. М.: Изд-во стандартов, 1975. 39 с.
6. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 11534–75. М.: Изд-во стандартов, 1976. 23 с.
7. Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 23518–79. М.: Стандартинформ, 2011. 27 с.

8. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: ГОСТ 8713–79. М.: Стандартинформ, 2005. 39 с.
9. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия: ГОСТ 23118–2012. М.: Стандартинформ, 2013. 40 с.
10. Стальные строительные конструкции. Правила изготовления: ТКП 45-5.04-121–2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2009. 35 с.

Поступила 14.05.2020

Подписана в печать 11.08.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. SNiP [Construction Rules and Regulations] II-23–81*. *Steel Structures*. Moscow: Publishing House of USSR State Committee for Construction, 1991. 38 (in Russian).
2. SNiP [Construction Rules and Regulations] II-23–81*: СП 16.13330.2017. Revised Edition. *Steel Structures*. Moscow, 2017. 148 (in Russian).
3. State Standard 5264–80. *Manual Arc Welding. Welded Connections. Main Types, Structural Elements and Dimensions*. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 35 (in Russian).
4. State Standard 14771–76. *Arc Welding in Shielding Gas. Welded Connections. Main Types, Structural Elements and Dimensions*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 39 (in Russian).
5. State Standard 11533–75. *Automatic and Semi-Automatic Submerged Arc Welding. Welded Joints at Sharp and Obtuse Angles. Main Types, Structural Elements and Dimensions*. Moscow, Publishing House of Standards, 1975. 39 (in Russian).
6. State Standard 11534–75. *Manual Arc Welding. Welded Joints at Sharp and Obtuse Angles. Main Types, Structural Elements and Dimensions*. Moscow, Publishing House of Standards, 1976. 23 (in Russian).
7. State Standard 23518–79. *Arc Welding in Shielding Gas. Welded Joints at Sharp and obtuse Angles. Main Types, Structural Elements and Dimensions*. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 27 (in Russian).
8. State Standard 8713–79. *Submerged Arc Welding. Welded Connections. Main Types, Structural Elements and Dimensions*. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 39 (in Russian).
9. State Standard 23118–2012. *Steel Building Structures. General Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 40 (in Russian).
10. TCP [Technical and Commercial Proposal] 45-5.04-121–2009 (02250). *Steel Building Structures. Manufacturing Rules*. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2009. 35 (in Russian).

Received: 14.05.2020

Accepted: 11.08.2020

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-372-376>

УДК 539.3

Действие сосредоточенной силы на 1/8 однородного изотропного пространства

Докт. техн. наук, проф. С. В. Босаков¹⁾, асп. П. Д. Скачэк¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. На примере вертикальных перемещений показано, что, комбинируя решение задачи об определении вертикальных перемещений от действия четырех симметрично приложенных на упругое полупространство одинаковых сосредоточенных сил и двух симметрично приложенных на упругое четвертьпространство одинаковых сосредоточенных сил, можно получить решение о действии одной силы на 1/8 упругого пространства со свободными гранями. Для нахождения вертикальных перемещений в упругом полупространстве используется решение Буссинеска, а вертикальных перемещений в упругом четвертьпространстве – интегральное уравнение, полученное Я. С. Уфляндом для определения вертикальных перемещений грани однородного упругого изотропного четвертьпространства, для которого модуль деформаций и коэффициент Пуассона являются постоянными величинами. Однако интегральное уравнение Я. С. Уфлянда весьма неудобно для практического использования, поэтому в статье для нахождения вертикальных перемещений грани упругого четвертьпространства от действия сосредоточенной силы предложено приближенное выражение, записанное через элементарные функции. Для получения последнего применяется метод специальной аппроксимации. Искомое решение выражается также через элементарные функции. При этом точный расчет получается для несжимаемого материала при коэффициенте Пуассона 1/8 пространства $\nu = 0,5$. Поскольку решение получено в случае действия на 1/8 упругого пространства сосредоточенной силы, то легко найти выражение для определения вертикальных перемещений грани 1/8 упругого пространства от действия любой распределенной нагрузки путем интегрирования по участку действия данной нагрузки от функции влияния, в качестве которой берется искомое решение. Предлагаются рекомендации по повышению точности расчетов. Изложенный подход может быть также использован для определения напряженно-деформированного состояния 1/8 пространства как с шарнирно опертыми, так и со свободными гранями.

Ключевые слова: упругое полупространство, упругое четвертьпространство, 1/8 упругого пространства, метод специальной аппроксимации, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Босаков, С. В. Действие сосредоточенной силы на 1/8 однородного изотропного пространства / С. В. Босаков, П. Д. Скачэк // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 372–376. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-372-376>

Concentrated Force Action on 1/8 Homogeneous Isotropic Space

S. V. Bosakov¹⁾, P. D. Skachok¹⁾

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

Abstract. Using the example of vertical displacements, it is shown that by combining a solution to the problem of determining vertical displacements from the action of four identical concentrated forces symmetrically applied to an elastic half-space and two identical concentrated forces symmetrically applied to an elastic quarter-space, one can obtain a solution about the action of one force on 1/8 of the elastic space with free edges. To find vertical displacements in an elastic half-space, the Boussinesq solution is used, and vertical displacements in an elastic quarter-space – an integral equation obtained

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

by Ya. S. Uflyand to determine vertical displacements in the face of a homogeneous elastic isotropic quarter-space, for which a deformation modulus and Poisson's ratio are constant. However, an integral equation of Ya. S. Uflyand is very inconvenient for practical use, therefore, in the paper, an approximate expression written in terms of elementary functions is proposed to find vertical displacements in the face of an elastic quarter-space from the action of a concentrated force. To obtain the latter, a special approximation method is used. The desired solution is also expressed in terms of elementary functions. In this case, an accurate calculation is obtained for an incompressible material with Poisson's ratio $1/8$ of the space $\nu = 0.5$. Since the solution is obtained in the case of a concentrated force acting on $1/8$ of the elastic space, it is easy to find an expression for determining the vertical displacements of the edge of $1/8$ of the elastic space from the action of any distributed load by integrating over the area of action of this load from the influence function, which is taken as required decision. Recommendations for improving the accuracy of calculations are offered. The described approach can also be used to determine the stress-strain of $1/8$ of the space with both hinged supported and free edges.

Keywords: elastic half-space, elastic quarter-space, $1/8$ of elastic space, special approximation method, stress-strain state

For citation: Bosakov S. V., Skachok P. D. (2020) Concentrated Force Action on $1/8$ Homogeneous Isotropic Space. *Science and Technique*. 19 (5). 372–376. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-372-376> (in Russian)

В [1] на основании результатов Я. С. Уфлянда [2] в цилиндрических координатах получено выражение для определения вертикальных перемещений грани упругого однородного изотропного четвертьпространства с постоянными E , ν от действия сосредоточенной вертикальной силы P (рис. 1) в следующем виде:

$$W(x, y) = \frac{2P(1-\nu^2)}{\pi^3 E} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2}}{\Delta} e^{-\sigma a \text{ch} t} \times \quad (1)$$

$$\times \cos \sigma z \cos \tau t K_{it}(\sigma r) dt d\sigma d\tau,$$

где $\Delta = \text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} - \left[\tau - 2(1-2\nu) \frac{\text{th} \frac{\pi \tau}{4}}{\text{ch} 2t} \right]^2$; a – точка

приложения сосредоточенной силы; $K_{it}(\sigma r)$ – функция Бесселя мнимого аргумента [3].

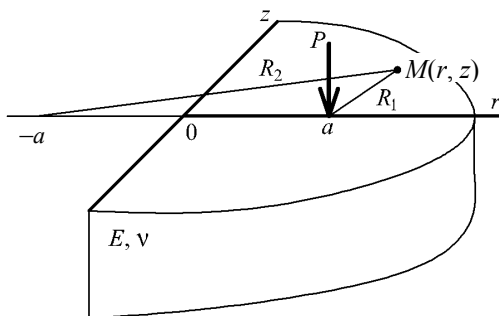


Рис. 1. Действие сосредоточенной силы на упругое четвертьпространство

Fig. 1. Action of concentrated force on elastic quarter-space

Разложим $1/\Delta$ в ряд по степеням $1-2\nu < 1$, получим

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1}{\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} - \tau^2} - 4(1-2\nu) \frac{\tau \text{th} \frac{\pi \tau}{4}}{\left(\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} - \tau^2 \right)^2 \text{ch} 2t} + \quad (2)$$

$$+ 4(1-2\nu)^2 \frac{\left(3\tau^2 + \text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} \right) \text{th}^2 \frac{\pi \tau}{4}}{\left(\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} - \tau^2 \right)^3 \text{ch} 2t} - \dots$$

Ряд (2) – знакпеременный, поэтому в дальнейшем ограничимся первым членом ряда. Представим:

$$\frac{\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2}}{\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} - \tau^2} = 2(1 + \text{ch} \pi \tau) \left(1 + \frac{\tau^2}{\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} - \tau^2} \right);$$

$$\frac{\tau^2}{\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} - \tau^2} \approx \frac{a_0 + a_1 \tau^2}{\text{ch} \pi \tau}; \quad a_0 = \frac{4}{\pi^2 - 4};$$

$$a_1 = 2, 1.$$

Относительная погрешность аппроксимации $\tau^2 / \left(\text{sh}^2 \frac{\pi \tau}{2} - \tau^2 \right)$ не превышает 10 % на интервале $0 \leq \tau \leq \infty$.

Последовательно используем интегралы [2, 3]:

$$\int_0^\infty e^{-\sigma a \text{ch} t} \cos \tau t dt = K_{it}(\sigma a);$$

$$\int_0^\infty \cos(\sigma z) K_{it}(\sigma a) K_{it}(\sigma r) d\sigma =$$

$$= \frac{\pi^2}{4 \text{ch} \pi \tau \sqrt{ar}} P_{it-1/2}(\text{ch} \mu);$$

$$\int_0^\infty \frac{\operatorname{ch} \beta \tau}{\operatorname{ch} \pi \tau} P_{i\tau-1/2}(\operatorname{ch} \mu) d\tau = \frac{1}{\sqrt{2(\operatorname{ch} \mu + \cos \beta)}};$$

$$\int_0^\infty \frac{\tau^2}{\operatorname{ch} \pi \tau} P_{i\tau-1/2}(\operatorname{ch} \mu) d\tau = \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{1}{(\operatorname{ch} \mu + 1)^{3/2}};$$

$$\int_0^\infty \frac{\operatorname{ch} \beta \tau}{\operatorname{ch}^2 \pi \tau} P_{i\tau-1/2}(\operatorname{ch} \mu) d\tau =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{\sqrt{\operatorname{ch} \mu - \cos \beta}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \mu - \cos \beta}{1 + \cos \beta}};$$

$$\int_0^\infty \frac{\tau^2}{\operatorname{ch}^2 \pi \tau} P_{i\tau-1/2}(\operatorname{ch} \mu) d\tau =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{\operatorname{ch} \mu - 1} - \frac{\sqrt{2}}{(\operatorname{ch} \mu - 1)^{3/2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \mu - 1}{2}} \right],$$

где $P_{i\tau-1/2}(\operatorname{ch} \mu)$ – функция Лежандра [3].

В итоге после интегрирования (1) можно получить удобное для инженерных приложений приближенное выражение для определения вертикальных перемещений границы четвертьпространства, на которую действует сила (рис. 1)

$$W(r, z) = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi E} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1+a_0}{R_2} + \frac{2a_0}{\pi R_1} \operatorname{arctg} \frac{R_1}{2\sqrt{ar}} + \right. \\ \left. + a_1 \frac{ar}{R_2^3} + \frac{a_1}{\pi} \left(\frac{\sqrt{ar}}{R_1^2} - \frac{2ar}{R_1^3} \operatorname{arctg} \frac{R_1}{2\sqrt{ar}} \right) \right]. \quad (3)$$

Если нагрузить поверхность упругого полупространства четырьмя симметрично расположенными вертикальными силами, то, очевидно, это будет эквивалентно нагружению 1/8 пространства с шарнирно опертой гранью $y=0$ сосредоточенной силой (рис. 2).

В этом случае в декартовых координатах вертикальные перемещения точки $M(x, y)$ грани 1/8 пространства с шарнирно опертыми двумя гранями, где приложена сила, будут равны

$$W_0(x, y) = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi E} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right). \quad (4)$$

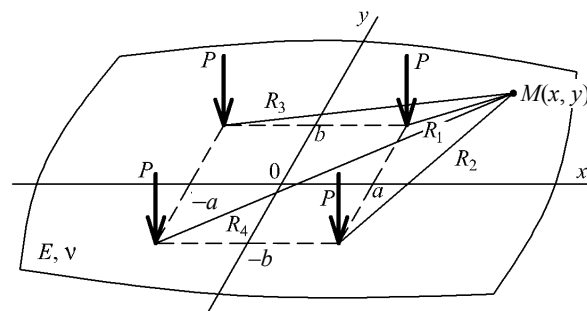


Рис. 2. Действие симметрично расположенных четырех сил на упругое полупространство

Fig. 2. Action of symmetrically located four forces on elastic half-space

Нагрузим четвертьпространство двумя симметрично приложенными силами P (рис. 3). Такое нагружение соответствует действию сосредоточенной силы P на 1/8 пространства с шарнирно опертой гранью $y=0$. В этом случае на основании (3) вертикальные перемещения грани 1/8 пространства с одной шарнирно опертой гранью $y=0$ выражаются формулой

$$W_1(x, y) = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi E} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + (a_0 + 1) \times \right. \\ \times \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) + \frac{2a_0}{\pi} \left(\frac{\operatorname{arctg} \frac{R_1}{2\sqrt{ax}}}{R_1} + \frac{\operatorname{arctg} \frac{R_2}{2\sqrt{ax}}}{R_2} \right) + \\ \left. + a_1 \left(\frac{ax}{R_3^3} + \frac{ax}{R_4^3} \right) + \frac{a_1}{\pi} \left(\frac{\sqrt{ax}}{R_1^2} + \frac{\sqrt{ax}}{R_2^2} - \right. \right. \\ \left. \left. - 2ax \frac{\operatorname{arctg} \frac{R_1}{2\sqrt{ax}}}{R_1^3} - 2ax \frac{\operatorname{arctg} \frac{R_2}{2\sqrt{ax}}}{R_2^3} \right) \right]. \quad (5)$$

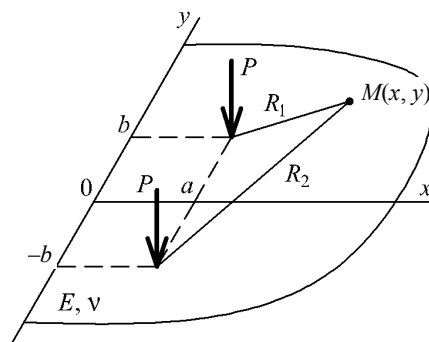


Рис. 3. Действие симметрично расположенных двух сил на упругое четвертьпространство

Fig. 3. Action of symmetrically located two forces on elastic quarter-space

Сопоставляя (4) и (5), можно сделать вывод, что удаление связей по оси $x = 0$ 1/8 пространства с шарнирно опертыми гранями увеличивает вертикальные перемещения на

$$W_1(x, y) - W_0(x, y). \quad (6)$$

Рассуждая подобным образом, можно заключить, что удаление связей по оси $y = 0$ 1/8 пространства с шарнирно опертыми гранями увеличивает вертикальные перемещения на

$$W_2(x, y) - W_0(x, y), \quad (7)$$

где

$$W_2(x, y) = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi E} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + (a_0 + 1) \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) + \frac{2a_0}{\pi} \left(\frac{\arctg \frac{R_1}{2\sqrt{by}}}{R_1} + \frac{\arctg \frac{R_3}{2\sqrt{by}}}{R_3} \right) + a_1 \left(\frac{by}{R_2^3} + \frac{by}{R_4^3} \right) + a_1 \left(\frac{\sqrt{by}}{R_1^2} + \frac{\sqrt{by}}{R_3^2} - 2by \frac{\arctg \frac{R_1}{2\sqrt{by}}}{R_1^3} - 2by \frac{\arctg \frac{R_3}{2\sqrt{by}}}{R_3^3} \right) \right]. \quad (8)$$

Суммируя (4), (6) и (7), получаем окончательное выражение для определения вертикальных перемещений точки $M(x, y)$ нагруженной грани 1/8 пространства со свободными гранями от действия сосредоточенной силы, приложенной к той же грани (рис. 4)

$$W(x, y) = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi E} \left[\frac{1}{R_1} + (a_0 + 1) \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + \frac{2a_0 + 1}{R_4} + a_0 f_1 + a_1 f_2 + a_1 \left(\frac{ax}{R_3^3} + \frac{ax + by}{R_4^3} + \frac{by}{R_2^3} \right) \right], \quad (9)$$

где

$$f_1 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\arctg \frac{R_1}{2\sqrt{ax}}}{R_1} + \frac{\arctg \frac{R_2}{2\sqrt{ax}}}{R_2} + \frac{\arctg \frac{R_1}{2\sqrt{by}}}{R_1} + \frac{\arctg \frac{R_3}{2\sqrt{by}}}{R_3} \right);$$

$$f_2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sqrt{ax}}{R_1^2} + \frac{\sqrt{ax}}{R_2^2} - 2ax \frac{\arctg \frac{R_1}{2\sqrt{ax}}}{R_1^3} - \right.$$

$$\left. - 2ax \frac{\arctg \frac{R_2}{2\sqrt{ax}}}{R_2^3} + \frac{\sqrt{by}}{R_1^2} + \frac{\sqrt{by}}{R_3^2} - 2by \frac{\arctg \frac{R_1}{2\sqrt{by}}}{R_1^3} - 2by \frac{\arctg \frac{R_3}{2\sqrt{by}}}{R_3^3} \right).$$

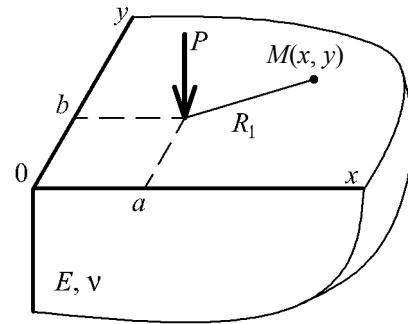


Рис. 4. Действие силы на 1/8 упругого пространства

Fig. 4. Force action on 1/8 elastic space

Анализ (9) показывает, что перемещения W на ребрах и в вершине 1/8 пространства ограничены. Также в (9) соблюдается теорема о взаимности перемещений. На рис. 5 показана поверхность перемещений верхней грани 1/8 пространства от сосредоточенной силы при $a = l$, $b = 2l$, где l – некоторый линейный размер в долях от $\frac{P(1-\nu^2)}{\pi E l}$.

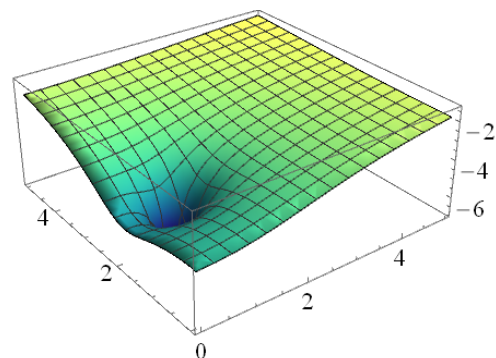


Рис. 5. Поверхность перемещений верхней грани 1/8 пространства от действия сосредоточенной силы

Fig. 5. Displacement surface of upper edge 1/8 of space from action of concentrated force

ВЫВОДЫ

1. Наибольшую точность формула (9) дает для коэффициента Пуассона $\nu = 0,5$, т. е. для клина из несжимаемого материала [4]. Чтобы увеличить точность расчета по (9), необходимо

более точно вычислить (1). Для этого, подобно указанию [2], можно строить искомое решение по степеням малого параметра $\varepsilon = 1 - 2\nu$, что выполнено для четвертьпространства в [5, 6]. Можно повысить точность приближенного решения для произвольного коэффициента Пуассона, если в (2) использовать приближенное значение интеграла

$$\int_0^{\infty} e^{-\sigma a \operatorname{ch} t} \frac{\cos \tau t}{\operatorname{ch} 2t} dt \approx \int_0^{\infty} e^{-\sigma a \operatorname{ch} t} \cos \tau t dt \int_0^{\infty} \frac{dt}{\operatorname{ch} 2t} = \frac{\pi}{4} K_{it}(\sigma a)$$

и аппроксимацию

$$\frac{\tau \operatorname{sh}^2 \frac{\pi}{2} \tau \operatorname{th} \frac{\pi}{4} \tau}{\left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi}{2} \tau - \tau^2 \right)^2} \approx \frac{b_0 + b_1 \tau^2}{\operatorname{ch} \pi \tau}.$$

2. Равнодействующая усилий в отбрасываемых связях $1/8$ пространства с двумя шарнирно опертыми гранями равна 0, и, согласно принципу Сен-Венана [7], перемещения от них быстро затухают по мере удаления от ребер. Этот факт отмечен Хетени [8] при построении решения для четвертьпространства со свободными гранями итерационным методом наложения.

3. Выражения (5), (9) можно применять для решения контактных задач для $1/8$ упругого пространства с одной шарнирно опертой гранью и со свободными гранями.

4. Изложенный подход также может быть использован для определения напряженно-деформированного состояния $1/8$ пространства с шарнирно опертыми или со свободными гранями.

5. Применяя полученное решение в качестве функции влияния, достаточно просто получить выражение для определения вертикальных перемещений грани $1/8$ упругого пространства от действия равномерно распределенной нагрузки путем интегрирования данной функции влияния по области действия любой распределенной нагрузки [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Босаков, С. В. Действие сосредоточенной силы на упругое четвертьпространство / С. В. Босаков // Теоретическая и прикладная механика: Междунар. науч.-техн. сб. / БПИ. Минск: Вышэйш. шк., 1988. Вып. 15. С. 100–108.
2. Уфлянд, Я. С. Некоторые пространственные задачи теории упругости для клина / Я. С. Уфлянд // Механика сплошной среды и родственные проблемы анализа. М.: Наука, 1972. С. 549–553.
3. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. И. Рыжик. М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.

4. Развитие теории контактных задач в СССР / Академия наук СССР, Ин-т проблем механики; отв. ред. Л. А. Галин. М.: Наука, 1976. 496 с.
5. Ефимов, А. Б. Сосредоточенное воздействие на упругий несжимаемый клин / А. Б. Ефимов, Д. Г. Ефимов // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1986. № 6. С. 89–92.
6. Александров, В. М. Действие полосового штампа на упругий пространственный клин / В. М. Александров, Д. А. Пожарский // Прикладная механика. 1992. Т. 28, № 1. С. 49–54.
7. Сен-Венан, Б. Мемуар о кручении призм. Мемуар об изгибе призм / Б. Сен-Венан. М.: Из-во физ.-матем. лит., 1961. 518 с.
8. Hete'nyi, M. A General Solution for the Elastic Quarter-space / M. Hete'nyi // Journal of Applied Mechanics. 1970. Vol. 37, No 1. P. 75–80. <https://doi.org/10.1115/1.3408492>.
9. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 680 с.
10. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчетов фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицын. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Госстройиздат, 1962. 240 с.

Поступила 14.05.2020

Подписана в печать 28.07.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Bosakov S. V. (1988) The Action of a Concentrated Force on an Elastic Quarter-Space. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Mekhanika: Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Sb.* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ., 15, 100–108 (in Russian).
2. Uflyand Ya. S. (1972) Some Spatial Problems of Elasticity Theory for a Wedge. *Continuum Mechanics and Related Problems of Analysis*. Moscow, Nauka Publ., 549–553 (in Russian).
3. Gradsteyn I. S., Ryzhik I. I. (1963) *Tables of Integrals, Series and Products*. Moscow, Fizmatgiz Publ. 1100 (in Russian).
4. Galin L. A. (1976) (ed.) *Development of the Theory of Contact Problems in the USSR / Academy of Sciences of the USSR, Institute of Problems of Mechanics*. Moscow, Nauka Publ. 496 (in Russian).
5. Efimov A. B., Efimov D. G. (1986) Concentrated Action on an Elastic Incompressible Wedge. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika Tverdogo Tela = Mechanics of Solids*, (6), 89–92 (in Russian).
6. Alexandrov V. M., Pozharskii D. A. (1992) Action of a Band Stamp on a Three-Dimensional Elastic Wedge. *International Applied Mechanics*, 28 (1), 49–54. <https://doi.org/10.1007/bf00847329>.
7. Saint-Venant B. (1961) *Memoir on Prism Torsion. Memoir on Prism Bending*. Moscow, Fizmatlit Publ. 518 (in Russian).
8. Hete'nyi M. (1970) A General Solution for the Elastic Quarterspace. *Journal of Applied Mechanics*, 37 (1), 75–80. <https://doi.org/10.1115/1.3408492>.
9. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on an Elastic Base*. Moscow, Stroyizdat Publ. 680 (in Russian).
10. Zhemochkin B. N., Sinitsyn A. P. (1962) *Practical Methods of Calculations of Foundation Beams and Slabs on an Elastic Base*. Moscow, Gosstroyizdat Publ. 240 (in Russian).

Received: 14.05.2020

Accepted: 28.07.2020

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-377-383>

УДК 624.19.059.3

Защитные мероприятия при строительстве наземных сооружений над существующими подземными

Асп. А. А. Далидовская¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. Г. Пастушков¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Сегодня остро стоит вопрос по обеспечению безопасной эксплуатации зданий и сооружений, находящихся в непосредственной близости от нового строительства. Процесс производства работ по устройству несущих конструкций сооружений и дальнейшая их эксплуатация могут оказывать негативное влияние на уже существующие объекты. В связи с этим весьма актуальна задача разработки инновационных методов и инструментов обеспечения безопасной эксплуатации таких сооружений, как перегонные тоннели метрополитена. Для ее решения необходимы достоверный прогноз дополнительных деформаций и назначение комплекса защитных мероприятий. Кроме того, большое внимание следует уделять численному моделированию системы «наземные сооружения – защитные мероприятия – подземные сооружения». Как пример оценки влияния нового строительства на существующие подземные можно привести строительство транспортной развязки на пересечении проспекта Независимости с улицей Филимонова. В качестве защитных мероприятий здесь использовался защитный экран на буронабивных сваях, который позволил значительно минимизировать динамические и статические воздействия на обделку тоннелей и другие подземные сооружения метрополитена. Эффективность применения защиты подтверждается результатами мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций перегонных тоннелей на всех стадиях строительства транспортной развязки. Защитные мероприятия и непрерывный мониторинг за напряженно-деформированным состоянием конструкций помогают избежать аварийных ситуаций в ходе строительства и дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: транспортные сооружения, зона влияния, негативное воздействие, анализ, расчетная схема, грунт, деформации, напряжения, надежность, обследование

Для цитирования: Далидовская, А. А. Защитные мероприятия при строительстве наземных сооружений над существующими подземными / А. А. Далидовская, В. Г. Пастушков // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 377–383. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-377-383>

Protective Measures during Construction of Ground Structures over Existing Underground Structures

A. A. Dalidovskaya¹⁾, V. G. Pastushkov¹⁾

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

Abstract. Today, there is an acute issue of ensuring the safe operation of buildings and structures located in the immediate vicinity of new construction. The process of performing works on the installation of load-bearing structures and their further operation can have a negative impact on already existing facilities. In this regard, the task of developing innovative methods and tools to ensure the safe operation of such structures as subway running tunnels is very urgent. To solve it, a reliable forecast of additional deformation and appointment of a complex of protective measures are required. In addition, much attention should be paid to the numerical modeling of the system “surface structures – protective measures – underground structures”. As an example of assessing the impact of new construction, namely, the erection of surface structures over existing underground ones, one can cite the construction of a transport interchange at the intersection of Nezavisimosty Avenue with

Адрес для переписки

Далидовская Александра Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 146а,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-94-77
ftk@bntu.by

Address for correspondence

Dalidovskaya Alexandra A.
Belarusian National Technical University
146a, Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-94-77
ftk@bntu.by

Filimonov Street. As protective measures, a protective screen on bored piles has been used here, which made it possible to minimize significantly dynamic and static effects on the lining of tunnels and other underground structures of the subway. Effectiveness of protection application is confirmed by the result of monitoring the stress-strain state of running tunnel structures at all stages of traffic intersection construction. Protective measures and continuous monitoring of the stress-strain state in structures help to avoid accidents during construction and further operation.

Keywords: transport facilities, influence zone, negative impact, analysis, design scheme, soil, deformations, stresses, reliability, inspection

For citation: Dalidovskaya A. A., Pastushkov V. G. (2020) Protective Measures during Construction of Ground Structures over Existing Underground Structures. *Science and Technique*. 19 (5), 377–383. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-377-383> (in Russian)

Введение

Сегодня строительство транспортных сооружений чаще всего приходится выполнять в городской среде с уже существующими зданиями, сооружениями и коммуникациями. Разработка котлованов, воздействие машин и механизмов, устройство несущих конструкций нового сооружения могут оказывать негативное влияние на существующие объекты. В связи с этим весьма актуальной задачей стала разработка методов и инструментов обеспечения безопасной эксплуатации существующей застройки.

Для оценки влияния возводимых транспортных сооружений необходимо провести ряд мероприятий, позволяющих выполнить прогноз возможных деформаций конструкций. Причин появления деформаций сооружений существует огромное количество, однако, зная их, можно попытаться избежать или минимизировать возможные деформации. Решение данной задачи осуществляется численным моделированием влияния нового строительства на существующие подземные сооружения. Только после его проведения может быть принято решение о необходимых защитных мероприятиях. Однако одного численного моделирования для обеспечения безопасной эксплуатации подземных сооружений недостаточно. Чтобы в зоне строительства избежать аварийной ситуации, необходим надлежащий мониторинг конструкций эксплуатируемых сооружений.

По результатам анализа исследований и публикаций [1–13] до настоящего времени не решена проблема корректного моделирования системы «наземные сооружения – защитные мероприятия – подземные сооружения», которая позволяла бы выполнять оценку влияния нового строительства на существующие соору-

жения. Расчеты носят характер прогноза, и определение напряженно-деформируемого состояния не корректируется по ходу строительно-монтажных работ вследствие отсутствия фактических данных [5]. Зачастую проектная группа напрямую не связана с организацией, выполняющей строительство объекта и осуществляющей геодезический контроль. Исследования по определению фактического состояния объектов во многих случаях практически не ведутся или выполняются в недостаточном объеме.

Вопрос по обеспечению безопасной эксплуатации зданий и сооружений, находящихся в непосредственной близости от нового строительства, решается на этапе проектирования объекта. Первостепенными задачами являются определение инженерно-геологических условий строительной площадки и оценка технического состояния существующих зданий и сооружений, находящихся в непосредственной близости от проектируемого объекта. В составе работ по предварительному обследованию необходимо выполнить сбор информации о конструктивном решении существующих сооружений, поиск и изучение архивной документации инженерно-геологических изысканий, анализ ранее проведенных обследований, визуальное обследование с составлением планов и разрезов, изучение дефектных ведомостей с фотофиксацией дефектов со схемами их положения. По результатам предварительного обследования должна быть установлена категория технического состояния здания или сооружения [14].

Следующий этап – определение зоны влияния нового строительства расчетным путем с учетом фактического технического состояния существующей застройки и результатов инженерно-геологических изысканий. Для линейных

объектов следует определять характерный размер (площадь) зоны влияния строительства, а для компактных – ее радиус. В пределах зоны влияния выделяют размеры области интенсивных деформаций. Допустимо принимать плановые размеры зоны интенсивных деформаций соответствующими размерам области, в которой осадки грунтового массива, вызванные новым строительством, превышают 10 мм [14].

Только на основании перечисленного комплекса работ может быть принято решение о необходимости создания защитных мероприятий. Следует обратить внимание на то, что защитные мероприятия выполняются не только с целью обеспечения безопасной эксплуатации существующих сооружений, но и для защиты нового объекта строительства от негативного влияния существующей застройки.

При назначении защитных мероприятий необходимо определить факторы, которые в дальнейшем будут оказывать влияние на изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и находящихся в нем подземных сооружений. К основным факторам негативного влияния можно отнести конструктивные, технологические и климатические. Для защиты подземных сооружений от всех видов негативного воздействия, вызванного новым строительством, могут быть применены один или одновременно несколько видов защитных мероприятий: конструктивные, направленные на изменение параметров проектируемого сооружения; усиление конструкций существующих подземных сооружений; укрепление грунтового массива; устройство геотехнических экранов, которые будут рассмотрены далее в статье.

Проект защитных мероприятий должен включать выполнение целого ряда условий: обеспечивать механическую безопасность объекта строительства и существующих сооружений не только в период строительства, но и в последующей эксплуатации; минимизировать значения дополнительных деформаций; повышать несущую способность грунтового основания; выравнивать распределение деформаций основания в плане и по глубине; защищать подземные сооружения от воздействия вибрации.

Выбирая технические решения по устройству защитных мероприятий, необходимо учитывать следующие факторы: характер и степень влияния нового строительства; конструктивную схему и техническое состояние защищаемого объекта; уровень ответственности объекта; особенности инженерно-геологического строения площадки; доступ и возможность выполнения работ по устройству конструкций защитных мероприятий. Также при разработке защитных мероприятий следует учитывать влияние эксплуатации существующих сооружений на строящиеся.

При решении поставленной задачи нужно очень внимательно относиться к численному моделированию системы «наземные сооружения – защитные мероприятия – подземные сооружения». Ее следует рассматривать в единой расчетной модели и учитывать не только влияние нового строительства на существующие сооружения, но и наоборот. По различным причинам проектировщики большое внимание уделяют моделированию непосредственно конструкций новых сооружений, а их взаимодействие с грунтовым массивом, а тем более защитные мероприятия, рассматривают упрощенно или не рассматривают вообще.

Как пример оценки влияния нового строительства на существующие подземные и выбора защитных мероприятий – это строительство транспортной развязки на пересечении пр. Независимости с ул. Филимонова. В зону влияния строительства путепровода попадали тоннели метрополитена на перегоне станций метро «Московская» – «Восток», проходка которых осуществлялась закрытым способом, а также вентсбойка и венткамера, выполненные открытым способом.

Несущими конструкциями тоннелей являются чугунная тубинговая и железобетонная блочная обделки, состоящие из отдельных колец шириной 1,0 м. Перегонные тоннели конструктивно отделены друг от друга вентсбойкой. Железобетонная обделка тоннелей выполнена с применением колец, состоящих из ребристых железобетонных блоков. Вверху каждого кольца обделки установлены ключевые вкладыши (блоки), кольца соединены между собой с помощью болтов в продольном и поперечном направлениях. Несущие конст-

рукции вентсбойки – сборно-монолитное днище, монолитные железобетонные рамы, сборные и монолитные стены. Покрытие состоит из сборных железобетонных плит и монолитных участков.

Над тоннелем метрополитена был запроектирован городской автодорожный путепровод. Мост выполнен с пролетами по схеме $24,0 + 21,0$ м, ширина его 37,5 м (рис. 1). Путепровод запроектирован под нагрузки А14, НК-112 с учетом толпы на тротуарах. Опоры – железобетонные монолитные, по специальному проекту, на буронабивных сваях диаметром 1,2 м и длиной 14,0 м. Промежуточная монолитная опора моста – столбчатого типа с монолитным разрезным ригелем. Крайние опоры путепровода выполнены в виде подпорных стен с горизонтальными монолитными анкерными креплениями в грунте насыпи.



Рис. 1. Общий вид транспортной развязки по проспекту Независимости над эксплуатируемыми тоннелями метрополитена

Fig. 1. General view of traffic intersection on Nezavisimosty Avenue over exploited subway tunnels

На участке проектируемого строительства поверхность была спланирована насыпными грунтами в ходе строительства тоннелей метрополитена, зданий, проспекта Независимости, улиц Филимонова и Скорины, прокладки подземных коммуникаций. В геологическом строении участка проектируемого строительства участвовали:

- техногенные образования, представленные насыпными грунтами, состоящими из песков с примесью супесей и супесей с примесью песка, содержат включения гравия, гальки, валунов, отходов строительного производства;
- аллювиально-озерно-болотные отложения, представленные пылеватými песками средней прочности, суглинками, сильно заторфованным грунтом, мергелем;
- флювиогляциальные надморенные отложения, представленные песками (от пылеватых

до гравелистых) и гравийным грунтом средней прочности;

- моренные отложения могилевского подгоризонта, представленные прочными и очень прочными супесями;

- флювиогляциальные внутриморенные отложения сожского и межморенные днепровско-сожского горизонтов, представленные пылеватými песками (мелкими и средней прочности).

Гидрогеологические условия характеризуются наличием подземных озерно-болотных вод на глубине 19,8–21,3 м (абс. отм. 193,7–195,7 м) и флювиогляциальных надморенных отложений, водоносного комплекса внутриморенных и межморенных вод днепровско-сожского горизонта и вод спорадического распространения, горизонт напорный.

Необходимость выполнения защитных мероприятий обуславливалась тем, что опоры путепровода располагались в непосредственной близости от действующих тоннелей метрополитена, а также предусматривалась срезка грунта над тоннелями, что могло вызвать появление и развитие деформаций конструкций тоннелей в зоне ведения работ. Если на стадии разработки котлована не выполнять защитных мероприятий, то может произойти поднятие дна котлована и соответственно тоннелей на 10–11 мм, вызванное упругими деформациями при разгрузке залегающих ниже грунтов.

С целью стабилизации деформаций грунтового массива над перегонными тоннелями было предусмотрено выполнение защитного экрана (рис. 2), состоящего из монолитной железобетонной плиты на буронабивных сваях диаметрами 0,63 и 0,80 м. Толщина засыпки между сводами тоннелей и низом плиты защитного экрана варьировалась от 2 до 3 м. Длина буронабивных свай защитного экрана в зоне тоннелей составляла 14 м, у вентсбойки 22 м. Толщина плиты защитного экрана над тоннелями 0,5 м, над вентсбойкой 0,1 м [15].

Выполнение данного комплекса защитных мероприятий позволило значительно минимизировать динамические и статические воздействия на обделку тоннелей и другие подземные сооружения метрополитена, а также на конструкции нового сооружения.

Для реализации требований защиты тоннелей метрополитена в соответствии с проектом на участке ведения работ вдоль существующей линии метрополитена с обеих сторон каждого тоннеля выполнялись буронабивные сваи диаметрами 0,63 и 0,80 м.

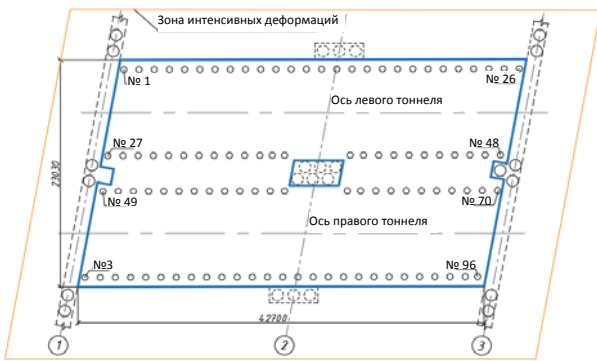


Рис. 2. План расположения плиты и свай защитного экрана

Fig. 2. Layout of slab and piles of protective shield

Для изготовления свай применяли гидравлическую бурильную машину SF-65 фирмы SOILMEC (рис. 3). Бурение скважин выполнялось с гидропригрузом из-за высокого расположения уровня грунтовых вод и риска выноса в объем скважины грунта из затрубного пространства. В связи с отсутствием в проекте указаний о величине гидропригруза его значение определялось экспериментально и корректировалось по ходу строительства.

С тем, чтобы определить возможность ведения работ по строительству путепровода транспортной развязки в круглосуточном режиме, проектом был предусмотрен пробный участок, на котором выполнялись буронабивные сваи защитного экрана и осуществлялся мониторинг технического состояния конструкций перегонных тоннелей, находящихся в зоне влияния.



Рис. 3. Работы по устройству буронабивных свай защитного экрана гидравлической бурильной машиной SF-65 фирмы SOILMEC

Fig. 3. Work on installation of bored piles for protective screen with SOILMEC SF-65 hydraulic drilling machine

По результатам мониторинга в процессе ведения строительных работ на пробном участке максимальные вертикальные деформации составили 4,0 мм, изменение напряжений в чугунных тубингах обделки 1,5–2,5 МПа (рис. 4). Напряжения и деформации при устройстве буронабивных свай постоянно растут и изменяются с небольшой скоростью, о чем свидетельствует зависимость напряжения от температуры на рис. 4.

Геодезический мониторинг свидетельствовал о вертикальных перемещениях геодезических марок, закрепленных на обделке тоннеля, равных 1,5–2,0 мм, что находится в рамках погрешности прибора. На основе полученных данных результатов электронного и геодезического мониторинга были сделаны выводы о возможности устройства буронабивных свай в три смены.

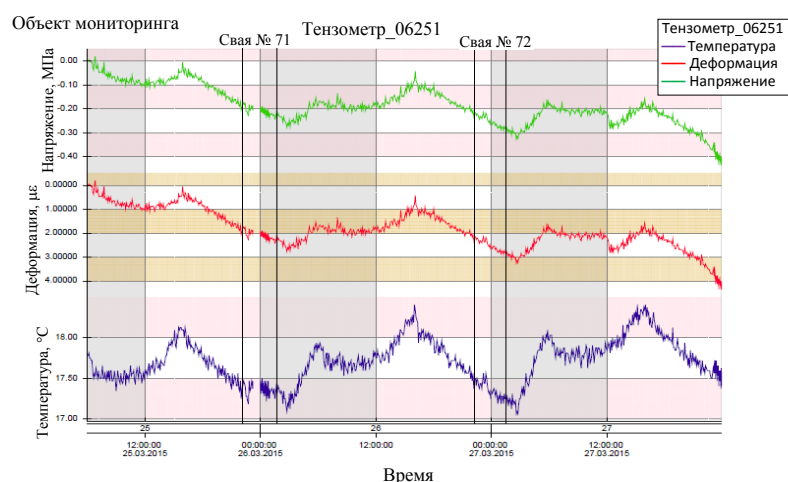


Рис. 4. Графики изменения температуры, напряжений и деформаций в чугунных тубингах тоннеля в период бурения пробных свай

Fig. 4. Graphs of changes in temperature, stresses and deformations in cast-iron tubing of tunnel during the period of drilling test piles

Проектом разработка котлована предусматривалась в шесть этапов. Однако в процессе строительства по результатам мониторинга и корректировки расчетной модели эта последовательность была изменена.

Моделирование напряженно-деформированного состояния участка транспортной развязки и его изменений в процессе строительства выполняли с использованием программных комплексов midas GTS NX и SOFiSTiK (WinTube). Данные программы позволили определять напряженно-деформированное состояние как в грунтовом массиве, так и в конструкциях перегонных тоннелей и защитного экрана. При моделировании системы «наземные сооружения – защитные мероприятия – подземные сооружения» использовалась пространственная расчетная схема, которая создавалась с учетом поэтапной разработки с уровня существующей поверхности в зоне действующих линий метрополитена, а также оценки возможности поднятия дна котлована и соответственно тоннеля, вызванного упругими деформациями при разгрузке залегающих ниже грунтов. В этой схеме учитывались мероприятия по предупреждению опасных неравномерных деформаций обделки тоннелей путем стабилизации окружающего массива грунта для обеспечения равномерности в поднятии по всему периметру обделки с сохранением эксплуатационного габарита и уменьшением величины поднятия уровня головки рельса. Геотехническая модель строилась на основе анализа и обобщения материалов инженерно-геологических изысканий, выполненных на площадке строительства в разное время. Следует отметить, что до начала расчетов было проведено обследование подземных сооружений с учетом их фактических параметров. Выполненные расчеты соответствуют требованиям технических кодексов установившейся практики (идентичных нормам проектирования Евросоюза), а также требованиям национальных приложений к ним на проектирование мостов и труб.

Для изучения работы плиты защитного экрана в натурных условиях и проверки соответствия расчетным предпосылкам проводились статические испытания обратной засыпкой грунта на возведенный защитный экран. В качестве статической нагрузки использовался асфальтогранулят со следующими физико-механическими характеристиками: плотность $\rho = 1,7 \text{ т/м}^3$, общая масса грунта 1100 т. Основное испытательное оборудование – система мониторинга АСМК, установленная в перегонных

тоннелях линии метрополитена (рис. 5). Доступ к данным системы мониторинга осуществлялся по удаленной связи. Дополнительно использовались периодические данные маркшейдерско-геодезического контроля.



Рис. 5. Датчик системы мониторинга, установленный на чугунном тубинге

Fig. 5. Monitoring system sensor, mounted on cast iron tubing

Согласно расчетным предпосылкам, максимальное значение перемещений в обделке перегонных тоннелей с учетом выполнения защитных мероприятий составило 1,336 мм, что хорошо коррелирует с результатами испытаний, по которым этот показатель достигал 1,000 мм.

По результатам мониторинга технического состояния перегонных тоннелей после окончания строительства путепровода изменение напряжений в чугунных тубингах обделки составило 2,6–4,8 МПа, что свидетельствует о включении плиты защитного экрана в работу и распределении усилий по всему грунтовому массиву.

ВЫВОДЫ

1. Результаты мониторинга напряженно-деформированного состояния и испытаний подтвердили адекватность выбранных защитных мероприятий при строительстве транспортной развязки над действующими тоннелями метрополитена на пересечении проспекта Независимости с улицей Филимонова.

2. Своевременная и объективная оценка влияния нового строительства на существующие подземные сооружения метрополитена позволяет разработать проектные решения, препятствующие негативному влиянию строительства на эксплуатационную надежность действующих объектов метрополитена.

3. Правильный подход к выбору и назначению защитных мероприятий, а также ведение непрерывного мониторинга за напряженно-деформированным состоянием конструкций помогают избежать аварийных ситуаций в ходе строительства сооружений и дальнейшей их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990–2011 (02250). Введ. 07.07.2012. Минск: Минстройархитектуры, 2012. 70 с.
2. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1–6. Общие воздействия. Воздействия при производстве строительных работ: ТКП EN 1991-1-6–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 32 с.
3. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Ч. 1–7. Общие воздействия. Особые воздействия: ТКП EN 1991-1-7–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 64 с.
4. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Ч. 2. Транспортные нагрузки на мосты: ТКП EN 1991-2–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 158 с.
5. Винников, Ю. Л. Моделирование напряженно-деформированного состояния системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание» / Ю. Л. Винников, А. В. Суходуб, О. В. Кичаева // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2015. № 2. С. 50–63.
6. Тоннели метрополитенов. Устройство, эксплуатация и ремонт / Ю. И. Сушкевич [и др.]. М.: Метро и тоннели, 2009. 463 с.
7. Hemphill, G. B. *Practical Tunnel Construction* / G. B. Hemphill. USA: Wiley, 2013. 434 p. <https://doi.org/10.1002/9781118350270>.
8. Lunardi, P. *Design and Construction of Tunnels* / P. Lunardi. Milano: Rocksoil SPA, 2008. 587 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73875-6>.
9. Пастушков, В. Г. Научное сопровождение проектирования и строительства трехуровневой транспортной развязки в г. Минске / В. Г. Пастушков, И. Л. Бойко, Г. П. Пастушков // Автомобильные дороги и мосты. 2015. № 2. С. 11–17.
10. Пастушков, Г. П. О переходе европейские нормы проектирования мостовых конструкций в Республике Беларусь / Г. П. Пастушков, В. Г. Пастушков // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2. С. 113–121.
11. Пастушков, Г. П. Основные требования к проектированию мостовых конструкций в соответствии с европейскими нормами / Г. П. Пастушков, В. Г. Пастушков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Пермь, 25–27 апреля 2013 г. Пермь, 2013. Т. 3. С. 368–375.
12. Skolnik, D. A. *Instrumentation for Structural Health Monitoring: Measuring Interstory Drift* [Electronic Resource] / D. A. Skolnik, W. J. Kaiser, J. W. Wallace // The 14 World Conference on Earthquake Engineering. China: Beijing, 2008. Mode of access: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_11-0089.PDF.
13. *Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control* / Edited by V. Guglielmetti [et al.]. London: ImprintCRC Press, 2007. 528 p. <https://doi.org/10.1201/9780203938515>.
14. Здания и сооружения. Защитные мероприятия в зоне влияния строительства подземных объектов: СП 361.1325800.2017. Введ. 15.05.2018. М.: Минстрой, 2018. 56 с.
15. Бульчев, Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н. С. Бульчев. М.: Недра, 1989. 270 с.

Поступила 18.10.2019

Подписана в печать 14.01.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. TCP [Technical and Commercial Proposal] EN 1990–2011 (02250). *Eurocode. Structural Design Basics*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2012. 70 (in Russian).
2. TCP [Technical and Commercial Proposal] EN 1991-1-6–2009 (02250). *Eurocode 1. Effects on Structures. Parts 1–6. General Influences. Impacts during Construction Works*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2009. 32 (in Russian).
3. TCP [Technical and Commercial Proposal] EN 1991-1-7–2009 (02250). *Eurocode 1. Effects on Structures. Parts 1–7. General Influences. Special Effects*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 64 (in Russian).
4. TCP [Technical and Commercial Proposal] EN 1991-2–2009 (02250). *Eurocode 1. Effects on Structures. Part 2. Transport Loads on Bridges*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 158 (in Russian).
5. Vinnikov Yu. L., Sukhodub A. V., Kichaeva O. V. (2015) Modeling the Stress-Strain State of the “Reconstructed Building – Foundations – Foundation” System. *Vestnik PNIPIU. Stroitel'stvo i Arkhitektura = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*, (2), 50–63 (in Russian).
6. Sushkevich Yu. I., Babushkin N. F., Ivanov V. F., Kozin E. G., Rasulov A. R. (2009) *Subway Tunnels. Device, Operation and Repair*. Moscow, Metro i Tonneli Publ. 463 (in Russian).
7. Hemphill G. B. (2013) *Practical Tunnel Construction*. USA, Wiley. 434. <https://doi.org/10.1002/9781118350270>.
8. Lunardi P. (2008) *Design and Construction of Tunnels*. Milano, Rocksoil SPA. 587. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73875-6>.
9. Pastushkov V. G., Boyko I. L., Pastushkov G. P. (2015) Scientific Support for the Design and Construction of a Three-Level Transport Interchange in Minsk. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], (2), 11–17 (in Russian).
10. Pastushkov G. P., Pastushkov V. G. (2011) On Transition to European Standards for the Design of Bridge Structures in the Republic of Belarus. *Vestnik Permskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Okhrana Okruzhayushchei Sredy, Transport, Bezopasnost' Zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin PNIPIU. Protection of the Environment, Transport, Life Safety], (2), 113–121 (in Russian).
11. Pastushkov G. P., Pastushkov V. G. (2013) Basic Requirements for the Design of Bridge Structures in Accordance with European Standards. *Modernizatsiya i Nauchnye Issledovaniya v Transportnom Komplekse: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Perm', 25–27 Aprelya 2013 g.* T. 3 [Modernization and Scientific Research in the Transport Complex. Materials of the International Scientific and Practical Conference, Perm, April 25–27, 2013. Vol. 3]. Perm, 368–375 (in Russian).
12. Skolnik D. A., Kaiser W. J., Wallace J. W. (2008) Instrumentation for Structural Health Monitoring: Measuring Interstory Drift. *The 14 World Conference on Earthquake Engineering*. China, Beijing. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_11-0089.PDF.
13. Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S. (2007) *Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control*. London, ImprintCRC Press. 528. <https://doi.org/10.1201/9780203938515>.
14. SP [Set of Rules] 361.1325800.2017. *Buildings and Constructions. Protective Measures in the Zone of Influence for Construction of Underground Facilities*. Moscow, Minstroj Publ., 2018. 56 (in Russian).
15. Bulychiev N. S. (1989) *Mechanics of Underground Structures in Example and Problems*. Moscow, Nedra Publ. 270 (in Russian).

Received: 18.10.2019

Accepted: 14.01.2020

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-384-388>

УДК 627.824

Расход твердого стока при размыве низового откоса грунтовой плотины

Канд. техн. наук, доц. П. М. Богославчик¹⁾, В. А. Евдокимов¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В соответствии с принятой расчетной схемой размыв грунтовой плотины при переливе разделен на две стадии. В статье рассмотрена первая стадия, когда происходит размыв низовой упорной призмы. Ключевым фактором при расчете деформаций размыва является выбор формулы расхода твердого стока. Исследования показывают, что механизм формирования и транспортирования твердого стока при размыве моделей плотин из песчаных грунтов весьма схож с ранее описанным многими авторами для условий размыва речных русел. Особенность процесса в том, что размыв происходит при больших скоростях, поэтому твердый сток практически сразу переходит во взвешенное состояние. Для выбора искомой формулы проведены эксперименты на моделях плотин из песчаных грунтов различного гранулометрического состава. Установлено, что при больших скоростях, имеющих место в рассмотренных условиях, значение расхода твердого стока зависит исключительно от гидравлических характеристик потока. Влияние же физико-механических свойств размываемого грунта на величину расхода твердого стока незначительно, и они могут не учитываться. Выполнены расчеты по известным из речной гидравлики формулам, которые показали, что ни одна из них не дает достаточной сходимости с опытными данными. На основе анализа большого числа экспериментальных данных получена формула расхода твердого стока для условий размыва моделей плотин при переливе. При этом учитывался тот факт, что размыв плотины переливом имеет высокую степень стохастичности и трудно поддается теоретическому описанию. Особенно это проявляется в условиях пространственного размыва, когда одновременно с классическим размывом дна периодически происходит обрушение бортов размываемого прорана, что трудно учесть при расчетах.

Ключевые слова: перелив через гребень, уравнения деформации, размыв, расход твердого стока, песчаный грунт

Для цитирования: Богославчик, П. М. Расход твердого стока при размыве низового откоса грунтовой плотины / П. М. Богославчик, В. А. Евдокимов // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 384–388. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-384-388>

Consumption of Solid Runoff during Erosion of Bottom Slope of Soil Dam

P. M. Bohaslauchyk¹⁾, V. A. Evdokimov¹⁾

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

Abstract. Erosion is divided into two stages in accordance with the accepted design scheme for erosion of a soil dam during overflow. The paper deals with the first stage, when the downstream thrust prism is washed out. The key factor in calculating erosion deformations is the choice of the solid flow rate formula. Studies show that the mechanism of formation and transportation of solid runoff during erosion of dam models from sandy soils is very similar to that previously described by many authors for the condition of river channel erosion. The peculiarity of the process is that the erosion occurs at high speeds. Therefore, solid runoff almost immediately goes into a suspended state. To select the required formula, experiments have been carried out on models of dams made of sandy soils having various granulometric composition. It has been established that at high velocities under the considered conditions, the value of the solid waste flow rate depends solely on hydraulic characteristics of the flow. The influence of physical and mechanical properties of the eroded soil on the value of the flow rate of solid runoff is insignificant, and they may not be taken into account. Calculations have been carried out using formulas known from river hydraulics, which show that none of them gives sufficient convergence with experimental data. Based on the analysis of a large number of experimental data, a formula for the discharge of solid runoff for erosion conditions of dam models during overflow has been obtained in the paper. This has taken into account the fact that the dam erosion by the overflow has a high degree of stochasticity and is difficult to describe theoretically. This is especially evident in conditions of spatial erosion, when, simultaneously with the classical erosion of the bottom, the sides of the eroded hole periodically collapse, which is difficult to take into account in the calculations.

Keywords: ridge overflow, deformation equations, erosion, solid runoff flow rate, sandy soil

For citation: Bohaslauchyk P. M., Evdokimov V. A. (2020) Consumption of Solid Runoff during Erosion of Bottom Slope of Soil Dam. *Science and Technique*. 19 (5), 384–388. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-384-388> (in Russian)

Адрес для переписки

Богославчик Петр Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-06-79
pmih@tut.by

Address for correspondence

Bohaslauchyk Petr M.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-06-79
pmih@tut.by

Введение

Ключевым фактором при расчете деформаций размыва является выбор формулы расхода твердого стока. Ранее установлено [1], что размыв грунтовой плотины при переливе можно условно разделить на две стадии. Размыв начинается со стороны низового откоса, и на первой стадии отметка гребня размываемого водослива со стороны верхового откоса остается постоянной до полного размыва низовой призмы плотины. Данные экспериментальных исследований показывают, что механизм формирования и транспортирования твердого стока при размыве моделей плотин из песчаных грунтов весьма схож с ранее описанным многими авторами для условий размыва речных русел. Особенность процесса в том, что размыв происходит при больших скоростях, поэтому твердый сток практически сразу переходит во взвешенное состояние. Существует достаточно большое количество формул расхода твердого стока, которые в соответствии с характером перемещения частиц грунта в потоке подразделяются в основном на два типа: формулы расхода донных (влекомых) наносов и формулы расхода взвешенных наносов. Задачей проведенных авторами статьи исследований являлся выбор формулы расхода твердого стока для расчета деформации низового откоса при переливе воды через гребень грунтовой плотины.

Основная часть

Удельный расход твердого стока равен произведению концентрации грунта в потоке (мутности) на удельный расход воды

$$q_s = Sq. \quad (1)$$

Известно, что средняя весовая концентрация частиц грунта в потоке S зависит от следующих величин: плотности воды ρ и частиц грунта ρ_s , гравитационного ускорения g , вязкости воды μ , гранулометрического состава транспортируемого грунта (в большинстве случаев обходятся средним диаметром частиц d), динамической скорости v_* :

$$S = f(\rho, \rho_s, g, \mu, d, v_*). \quad (2)$$

К. В. Гришанин [2] отмечал, что в области развитого транспорта наносов, т. е. при скоростях, значительно превышающих неразмываемые, картина транспорта существенно упрощается. Здесь независимо от диаметра частиц вязкого подслоя на дне нет и, следовательно, вязкость воды влияет на процесс размыва лишь

в той мере, в какой она влияет на гидравлическую крупность частиц. То же самое можно сказать о величинах ρ_s , g , d . Эти параметры вместе определяют гидравлическую крупность. Кроме того, поскольку в практических расчетах оперировать динамической скоростью сложно, введем в (2) вместо v_* определяющие ее величины, а именно: среднюю скорость потока u , глубину h , гидравлическую крупность w и диаметр d , как количественную характеристику шероховатости песчаного дна. Таким образом, уравнение (2) преобразуется к следующему виду:

$$S = f(u, w, h, d). \quad (3)$$

Удельный расход твердого стока

$$q_s = qf(u, w, h, d). \quad (4)$$

Имеющиеся формулы расхода твердого стока в том или ином виде содержат аргументы, фигурирующие в (4). Кроме того, уравнения расхода взвешенных наносов, несмотря на их большое количество, разнообразием не отличаются, и практически многие из них приводятся к следующему виду:

$$q_s = D \frac{u^m}{w^n h^k} q. \quad (5)$$

Диаметр частиц грунта в отдельных формулах включен с каким-либо показателем степени, или же определяет величину параметра D .

С целью выбора формулы транспортирующей способности потока для условий размыва грунтовых плотин переливом проведен ряд экспериментов на моделях из песчаных грунтов и выполнены расчеты по известным формулам. Опыты проводились в лотке со стеклянными стенками. В верхний бьеф подавался определенный расход. При переполнении верхнего бьефа происходили перелив через гребень и последующий размыв модели. Процесс размыва фиксировался с помощью фотосъемки через определенные промежутки времени или видеосъемки. Опыты проводились с песчаными грунтами различного гранулометрического состава. Далее представлены результаты по четырем сериям опытов.

Серия 1. Диаметр частиц $d = 0,1-0,5$ мм; средний диаметр $d_{50} = 0,30$ мм; средневзвешенная гидравлическая крупность $w = 0,030$ м/с; плотность $\rho_0 = 1,65$ г/см³; коэффициент неоднородности $d_{60}/d_{10} = 3,3$.

Серия 2. $d = 0,5-1,0$ мм; $d_{50} = 0,75$ мм; $w = 0,078$ м/с; $\rho_0 = 1,59$ г/см³.

Серия 3. $d = 0,25-0,5$ мм; $d_{50} = 0,35$ мм; $w = 0,037$ м/с; $\rho_0 = 1,61$ г/см³.

Серия 4. $d = 0,1-1,0$ мм; $d_{50} = 0,38$ мм; $w = 0,0745$ м/с; $\rho_0 = 1,74$ г/см³; $d_{60}/d_{10} = 3,4$.

Опыты проводились в лотках шириной 0,10 м и 0,32 м. Размеры моделей: высота 0,4 м, ширина по гребню от 0,2 до 0,3 м, заложение верхового откоса 1:2,0, низового в опыте – от 1:2,0 до 1:3,0. Расход воды, поступающей в верхний бьеф (приточность), от 2,0 до 6,2 л/с.

На рис. 1 представлена фотография модели размываемой плотины, на рис. 2 показан процесс размыва по одному из опытов в виде зафиксированных в отдельные моменты профилей плотины и кривой свободной поверхности.

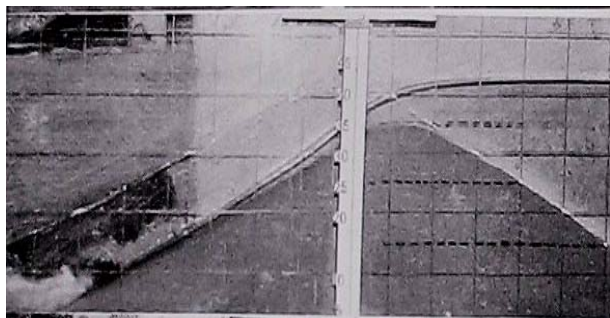


Рис. 1. Экспериментальная модель

Fig. 1. Experimental model

Зафиксирована следующая картина. Размыв происходит примерно параллельными низовому откосу слоями. До полного размыва низовой призмы отметка гребня водослива остается постоянной. Транспорт размываемого грунта на этой стадии происходит во взвешенном состоянии. Опытные значения расхода твердого стока определялись по величине деформаций (рис. 3) по следующей формуле:

$$q_s^{\text{оп}} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \rho_0, \quad (6)$$

где ΔV – объем смытого за расчетный интервал времени $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ грунта; ρ_0 – плотность грунта тела плотины.

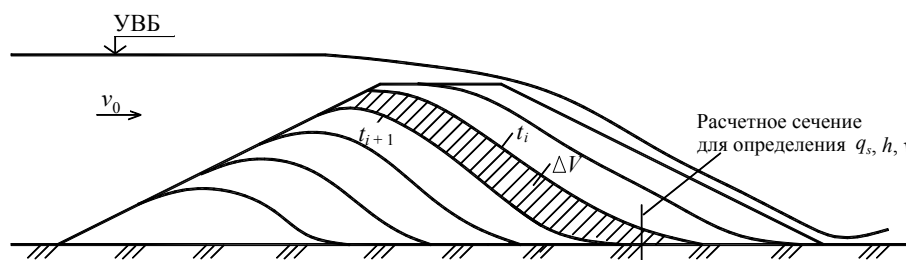


Рис. 3. Схема размыва грунтовой плотины

Fig. 3. Scheme of soil dam erosion

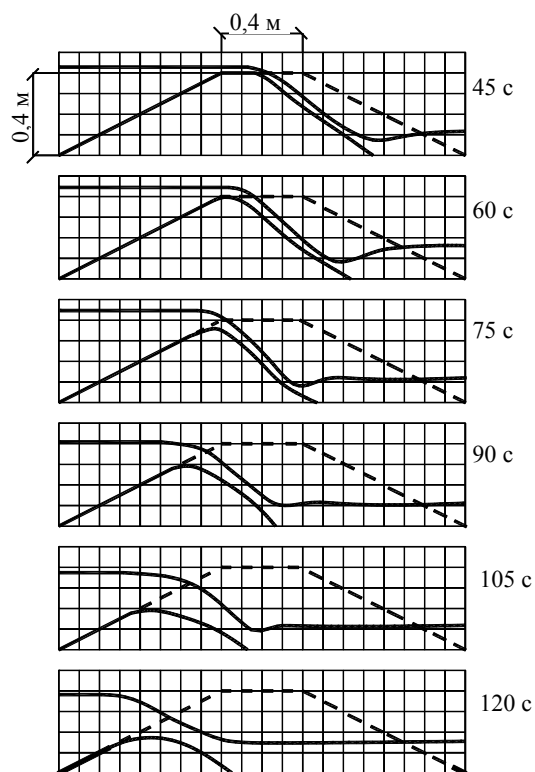


Рис. 2. Размыв модели из песка крупностью 0,1–1,0 мм в лотке шириной 0,1 м

Fig. 2. Blurring sand model with a particle size of 0.1–1.0 mm in a tray with 0.1 m width

На рис. 4 представлены графики зависимости $q_s = f(t)$ для размываемых вставок из песчаных грунтов различной крупности. Из графиков видно, что в рассмотренном диапазоне не прослеживается зависимость расхода твердого стока от крупности частиц песчаных грунтов. То есть признается правильным утверждение о незначительном влиянии характеристик грунта на расход твердого стока при скоростях, значительно превышающих неразмываемые.

С целью сравнения и последующего выбора формулы расхода твердого стока для рассматриваемого случая были выполнены расчеты по известным из речной гидравлики формулам.

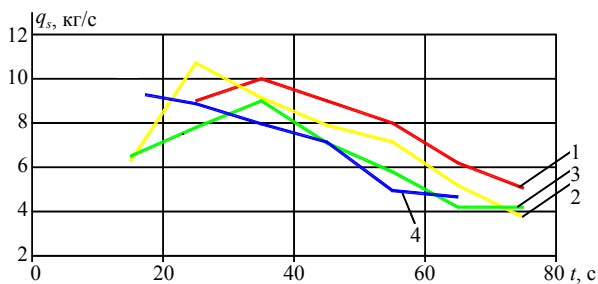


Рис. 4. Зависимость $q_s = f(t)$ для размываемых вставок из песчаных грунтов различной крупности по данным экспериментов: 1 – $d = 0,1 - 0,5$ мм; 2 – $0,5 - 1,0$ мм; 3 – $0,25 - 0,5$ мм; 4 – $d = 0,1 - 1,0$ мм

Fig. 4. Dependence $q_s = f(t)$ for eroded inserts from sand soils of various sizes according to experimental data: 1 – $d = 0.1 - 0.5$ mm; 2 – $0.5 - 1.0$ mm; 3 – $0.25 - 0.5$ mm; 4 – $d = 0.1 - 1.0$ mm

Вычисления проводили следующим образом. В каждом опыте для отдельных промежутков времени продолжительностью $\Delta t = 5 - 10$ с по данным измерений определялся расход воды через размываемую модель. За расчетное сечение для середины каждого расчетного промежутка времени принималось сечение в нижнем бьефе непосредственно за размываемой плотиной, т. е. сжатое сечение (рис. 3). Глубина в расчетном сечении измерялась по фото и для контроля определялась как средняя за время Δt

$$q = \varphi_0 h \sqrt{2g(z - h)}, \quad (7)$$

где φ_0 – коэффициент скорости, принимали 0,95; z – уровень верхнего бьефа относительно дна лотка (средний за Δt).

Скорость в расчетном сечении u определяли по удельному расходу q и глубине h : $u = q/h$.

Расчеты выполнялись по формулам, предложенным в работах: В. Л. Гончарова [3], Б. И. Студеничникова [4], В. С. Россинского (из [5]), И. И. Леви [6], А. Н. Гостунского (из [7]), С. Х. Абальянца [8], К. В. Гришанина [9]. В данной статье формулы перечисленных авторов не приводятся, так как сравнение опытных значений с расчетными показало, что ни одно из этих уравнений не дает совпадений с показателями, полученными опытным путем. Однако следует обратить внимание на две формулы:

– К. И. Россинского

$$q_s = 0,00475 \frac{u^3}{wh} q; \quad (8)$$

– С. Х. Абальянца

$$q_s = 0,018 \frac{u^3}{wh} q. \quad (9)$$

Эти два уравнения хоть и не дают численных совпадений с опытными данными, но схо-

же отражают динамику изменения расхода твердого стока во времени.

Нельзя не привести формулу, полученную А. И. Тищенко и Е. Д. Михайловым, которая представляет интерес по той причине, что получена на основании экспериментов, проведенных для условий размыва плотин [10]:

$$q_s = 186,25 \gamma_{гр} dw \left(\frac{\gamma_{гр} - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \times \left(\frac{6,3gd}{w^2 + 0,48(gd)^{0,33}} + 0,33 \right)^{3,4}. \quad (10)$$

Уравнение (10) вызывает сомнение по следующей причине. Согласно этой формуле, расход твердого стока зависит исключительно от характеристик размываемого грунта и не зависит от параметров потока (скорости и глубины), что противоречит экспериментальным данным, представленным в этой статье.

Возникает предположение, что в рассматриваемом случае транспортирующая способность потока выражается формулой (5). Физическая суть параметра D в данном уравнении в литературе толкуется по-разному. У одних авторов – это характеристика турбулентности потока [8], у других дана попытка его энергетической концепции [5]. В речной гидравлике для расчетов величина его принимается по данным экспериментов. По мнению авторов статьи, при выборе формулы твердого стока для случая размыва низовых откосов плотин переливом оправдан более упрощенный подход по следующим причинам. Процессы деформаций в речной гидравлике, из которой заимствованы все вышеприведенные формулы, имеют стабильный характер, близкий к плавно изменяющемуся. Размыв плотины при переливе – процесс стохастический, отличающийся от деформаций в речной гидравлике нестабильностью как в лабораторных условиях для плоской задачи, так и для одного и того же грунта. В пространственных условиях, кроме размыва дна, происходит обрушение откосов. Поэтому попытки найти более точные зависимости для определения расхода твердого стока не приведут к увеличению точности расчета процесса размыва в целом.

Введем в (5) новый параметр $A = D/w$. Остается подобрать величину параметра A и показателей степени m и k . Путем анализа результатов многочисленных экспериментов установлено, что наибольшую сходимость с опытными данными дает формула, в которой $A = 0,055$, $m = 3,0$ и $k = 1,25$. Таким образом, получено следующее уравнение расхода твердого стока при размыве низового откоса плотины из песчаных грунтов:

$$q_s = 0,055 \frac{u^3}{h^{1,25}} q. \quad (11)$$

На рис. 5 представлены графики зависимости $q_s = f(t)$ для размываемых моделей из песчаных грунтов с крупностью частиц $d = 0,1-1,0$ мм по данным экспериментов и по полученной формуле. Из рисунка видно следующее. Во-первых, наблюдается некоторый разброс опытных данных, хотя во всех опытах модель отсыпалась из одного и того же грунта. Во-вторых, график, построенный по предлагаемой формуле (11), хорошо вписывается в общую картину размыва, что говорит о возможности использования ее при расчете деформаций размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень.

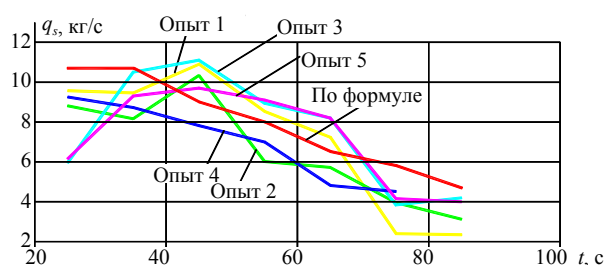


Рис. 5. Зависимость $q_s = f(t)$ для размываемых вставок из песчаных грунтов с крупностью частиц $d = 0,1-1,0$ мм по данным экспериментов и по полученной формуле

Fig. 5. Dependence $q_s = f(t)$ for eroded inserts from sand soils with a particle size of $d = 0.1-1.0$ mm according to experimental data and obtained formula

ВЫВОД

На основании экспериментальных исследований получены опытные данные по величине расхода твердого стока для условий размыва низовых откосов грунтовых плотин при переливе воды через гребень. Установлено, что при больших скоростях, имевших место в рассмотренных условиях, значение расхода твердого стока зависит исключительно от гидравлических характеристик потока. Влияние же физико-механических свойств размываемого грунта на величину расхода твердого стока незначительно, и они могут не учитываться. А это, принимая во внимание нестабильность процесса размыва, практически не повлияет на точность расчетов. Получена формула расхода твердого стока (11), которая позволит вычислять деформации размыва низовой упорной призмы грунтовых плотин при переливе воды через гребень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 4. С. 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>.

2. Гришанин, К. В. Расход русловых наносов в реках с песчаным дном / К. В. Гришанин // Русловые процессы и методы их моделирования. Л.: Энергия, 1977. С. 8–14.
3. Гончаров, В. Л. Динамика русловых потоков / В. Л. Гончаров. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 373 с.
4. Студеничников, Б. И. Размывающая способность потока и методы русловых расчетов / Б. И. Студеничников. М.: Стройиздат, 1964. 184 с.
5. Лапшенков, В. С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов / В. С. Лапшенков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 239 с.
6. Леви, И. И. Динамика русловых потоков / И. И. Леви. Л.: Госэнергоиздат, 1957. 342 с.
7. Указания по расчету заилиения водохранилищ при строительном проектировании. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 55 с.
8. Абальянц, С. Х. Движение взвесей в открытых потоках / С. Х. Абальянц // Труды САНИИРИ. Ташкент, 1958. Вып. 96. С. 3–156.
9. Гришанин, К. В. Устойчивость русел рек и каналов / К. В. Гришанин. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 144 с.
10. Тищенко, А. И. Результаты исследований транспортирующей способности потока при размыве песчаной вставки резервного водосброса / А. И. Тищенко, Е. Д. Михайлов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия, ФГБНУ «РосНИИПМ». Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. Т. 62, вып. 2. С. 140–149.

Поступила 06.11.2019

Подписана в печать 11.02.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Bogoslavchik P. M. (2018) Calculation Model of Soil Dam Wash-Away due to Overflow. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (4), 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296> (in Russian).
2. Grishanin K. V. (1977) Channel Sediment Discharge in Rivers with a Sandy Bottom. *Channel Processes and Methods of their Modeling*. Leningrad, Energiya Publ., 8–14 (in Russian).
3. Goncharov V. L. (1962) *Channel Flow Dynamics*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 373 (in Russian).
4. Studenichnikov B. I. (1964) *Flow Erosion and Channel Calculation Methods*. Moscow, Stroyizdat Publ. 184 (in Russian).
5. Lapshenkov V. S. (1979) *Forecasting of Channel Deformations in the Basins of River Waterworks*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 239 (in Russian).
6. Levi I. I. (1957) *Channel Flow Dynamics*. Leningrad, Gosenergoizdat. 342 (in Russian).
7. *Guidelines for the Calculation of Siltation of Reservoirs in Construction Design*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 55 (in Russian).
8. Abalyants S. Kh. (1958) Suspension Movement in Open Streams. *Trudy SANIIRI* [Proceedings of Central Asian Research Institute of Irrigation]. Tashkent, 96, 3–156 (in Russian).
9. Grishanin K. V. (1974) *Stability of River Bed and Canals*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 144 (in Russian).
10. Tishchenko A. I., Mikhailov E. D. (2016) The Results of Studies of the Transporting Ability of the Flow During Erosion of the Sand Insert of the Reserve Spillway. *Puti Povysheniya Effektivnosti Oroshaemogo Zemledeliya* [Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture]. Novocherkassk, Publishing House of "Russian Scientific Research Institute for Land Reclamation Problems", 62 (2), 140–149 (in Russian).

Received: 06.11.2019

Accepted: 11.02.2020

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-389-394>

УДК 624.131.5

Развитие теории расчета шарнирно соединенных балок на упругом основании

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

¹⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье в кратком изложении приводится обзор литературы по теории и методикам расчета шарнирно соединенных или шарнирно сочлененных конструкций на упругом основании. Автор ссылается на работы Б. Г. Коренева, Г. Я. Попова, И. А. Симвулиди, Р. В. Серебряного, А. Г. Юрьева, в которых с помощью различных подходов проведены исследования по расчету шарнирно соединенных балок и плит на упругом основании. Из анализа научной литературы по рассматриваемой тематике можно сделать вывод об отсутствии общего подхода к решению этой проблемы, справедливого для любых шарнирно соединенных балок и плит, лежащих на любой модели упругого основания при действии на них произвольной внешней нагрузки. Кроме того, аналогичная проблема по данному виду инженерных расчетов наблюдается и в нормативных документах. В Республике Беларусь для расчета несущих элементов дорожных покрытий для автомобильных дорог различного назначения и поперечного строения пути используется ряд отраслевых документов, в которых дорожная одежда с несущим элементом и соединение элементов между собой (шарнирное или жесткое) рассматриваются в несвязной постановке. В статье предлагается универсальный подход для расчета шарнирно соединенных балок на упругом основании, базирующийся на смешанном методе строительной механики с учетом соотношений Жемочкина для функций влияния упругой среды. В расчет принимаются следующие гипотезы и допущения: на контакте балки с основанием действуют только нормальные напряжения, для балок справедливы гипотезы теории изгиба, шарниры между балками являются цилиндрическими, распределение контактных напряжений по ширине балок – равномерное. В результате предлагаемого расчета исследуется напряженно-деформированное состояние системы из шарнирно соединенных балок на упругом основании, а именно: распределение контактных напряжений под балками, внутренние усилия в балках и шарнирных соединениях, а также осадки упругого основания под ними. Численная реализация этого подхода выполнена с использованием математического пакета Mathematica 10.4. Приведены примеры расчета для трех шарнирно соединенных балок на основании Винклера и семи – на упругом полупространстве.

Ключевые слова: шарнирно соединенные балки и плиты, смешанный метод, соотношения Жемочкина, упругое основание Винклера, упругое полупространство, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Козунова, О. В. Развитие теории расчета шарнирно соединенных балок на упругом основании / О. В. Козунова // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 389–394. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-389-394>

Development of Calculation Theory for Hinged-Connected Beams on Elastic Base

O. V. Kozunova¹⁾

¹⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The paper provides a brief review of the literature on the theory and methods of calculating hinged-connected or articulated structures on an elastic base. The author refers to the works of B. G. Korenev, G. Ya. Popov, I. A. Simvulidi, R. V. Serebryany, A. G. Yuriev, in which, using various approaches, studies have been carried out to calculate hinged-connected beams and slabs on an elastic base. From the analysis of scientific literature on the topic under consideration, it can be concluded that there is no general approach to solving this problem, which is valid for any hinged-connected beams and plates lying on any model of an elastic base under the action of an arbitrary external load. In addition, a similar problem for this type of engineering calculations is observed in the normative documents. In the Republic of Belarus, a number of industry documents have been used to calculate pavement bearing elements for various highways and track transverse structures, in which road pavements with a load-bearing element and the connection of elements between themselves (hinged or rigid) are considered in an incoherent formulation. The paper proposes a universal approach for calculating hinged-connected beams on an elastic foundation, based on the mixed method of structural mechanics, taking into account the Zhemochkin ratios for functions of the elastic medium effects. The following hypotheses and assumptions are taken into account: only normal stresses act on the contact of the beam with the base, hypotheses of the bending theory are valid for beams, hinges between the beams

Адрес для переписки

Козунова Оксана Васильевна
Белорусский государственный университет транспорта
ул. Кирова, 34,
246653, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 953-650
kozunova@gmail.com

Address for correspondence

Kozunova Oksana V.
Belarusian State University of Transport
34, Kirova str.,
246653, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 953-650
kozunova@gmail.com

are cylindrical, and the distribution of contact stresses along the width of the beams is uniform. As a result of the proposed calculation, the stress-strain state of a system of hinged-connected beams on an elastic foundation has been investigated, namely: distribution of contact stresses under beams, internal forces in the beams and hinged joints, as well as settlements of the elastic foundation under them. The numerical implementation of this approach has been performed using the mathematical package Mathematica 10.4. Examples of calculation are given for different versions of hinged-connected beams and an elastic base: for three hinged-connected beams based on Winkler and seven – on an elastic half-space.

Keywords: hinged-connected beams and slabs, mixed method, Zhemochkin relations, Winkler elastic base, elastic half-space, stress-strain state

For citation: Kozunova O. V. (2020) Development of Calculation Theory for Hinged-Connected Beams on Elastic Base. *Science and Technique*. 19 (5), 389–394. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-389-394> (in Russian)

Введение. Обзор литературы

Из анализа научной литературы по расчету шарнирно соединенных конструкций на упругом основании можно сделать вывод об отсутствии общего подхода к решению этой проблемы, справедливого для шарнирно соединенных балок и плит различной жесткости, лежащих на любой модели упругого основания при действии на них произвольной внешней нагрузки.

Одним из первых исследованием напряженно-деформированного состояния (НДС) шарнирно соединенных балок и плит на упругом основании в СССР занимался Б. Г. Коренев [1], который предложил использовать угловую деформацию для описания скачка в угловом перемещении слева и справа от промежуточного шарнира между соседними балками.

Г. Я. Попов [2] применил сложный математический аппарат для получения точного решения контактной задачи об изгибе шарнирно соединенных балочных плит на упругой полуплоскости, что было неприемлемо для инженерных расчетов из-за громоздкости.

Н. И. Симвулиди [3] предложил интересный метод расчета составных балок на упругом основании (автор так назвал шарнирно соединенные балки), основанный на расчленении шарнирно соединенной конструкции на отдельные элементы (простые однопролетные и консольные) при использовании прерывателей Герсванова. Однако в этом методе есть существенный недостаток, который не дал ему развиваться в универсальную методику, а именно: не учитывается взаимное влияние соседних балок и трение балок с основанием.

В [4] Н. И. Симвулиди исследует работу жестко соединенных балок на упругом основании под эксплуатационной нагрузкой в виде системы перекрестных фундаментных балок с защемленными концами и сетчатых плит. Методика этого расчета построена на многократном составлении уравнений прогибов каждой элементарной балки на упругом основании, жестко соединенной с другими. Учитывая совместность деформаций в узлах перекрестных балок, в самом общем виде получена система уравнений, куда вошли заданная нагрузка,

искомые силы и моменты, возникающие по концам балок (в заделке), и силы в узлах перекрестных балок. Методика расчета перекрестных фундаментных балок не учитывает кручение каждой балки, что упрощает инженерный расчет, но приводит к заведомо искаженным результатам и требует уточнения.

Р. В. Серебряный [5] дал решение пространственной задачи об изгибе шарнирно соединенных прямоугольных плит на упругом полупространстве и составил таблицы для облегчения инженерных расчетов. В [6] А. Г. Юрьев использовал интегральный метод Л. П. Винокурова для решения этой задачи.

Автор данной статьи предлагает универсальный подход для статического расчета шарнирно соединенных балок на упругом основании. Расчет ведется смешанным методом [7] с использованием соотношений Жемочкина [8] для балок различной длины и жесткости, на любой модели упругого основания и при действии произвольной внешней вертикальной нагрузки.

Постановка задачи. Граничные условия

В статическом расчете рассматривается система из шарнирно соединенных балок на упругом основании под действием внешней нагрузки (рис. 1). В результате расчета исследуется НДС этой системы, а именно: распределение контактных напряжений под балками, усилия в балках и шарнирных соединениях, а также осадки упругого основания под ними.

Считается [9], что на контакте балки с основанием действуют только нормальные напряжения, для балок справедливы гипотезы теории изгиба, шарниры между балками являются идеальными, цилиндрическими, без трения. Распределение контактных напряжений по ширине балок – равномерное.

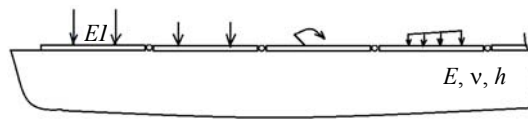


Рис. 1. Система из шарнирно соединенных балок на упругом основании

Fig. 1. System of articulated beams on elastic foundation

Алгоритм расчета

Разобьем каждую балку на участки равной длины и в центре каждого участка поставим вертикальную связь, через которую осуществляется контакт балки с упругим основанием (рис. 2). Полученную многократно статически неопределимую систему решаем смешанным методом строительной механики [7], приняв за неизвестные усилия X_k в связях Жемочкина на контакте балок и основания, линейные u_k и угловые φ_k перемещения введенного на краях балок защемления и поперечные силы Q_k в разрезанных промежуточных шарнирах (рис. 3).

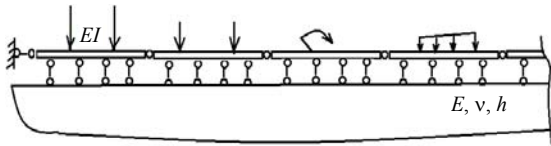


Рис. 2. Связи Жемочкина на контакте балок и основания

Fig. 2. Zhemochkin connections at the contact of beams and base

Основная система смешанного метода приведена на рис. 3.

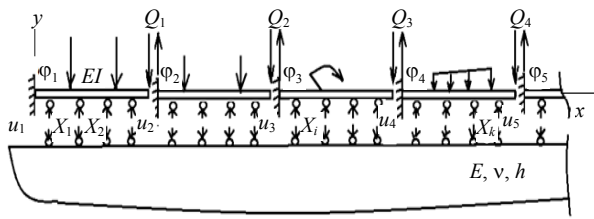


Рис. 3. Основная система смешанного метода

Fig. 3. Mixed method basic system

Система канонических уравнений смешанного метода для расчета одной балки с номером i имеет вид:

$$\begin{cases} \delta_{1,1}X_1 + \dots + \delta_{1,m}X_m + u_i - \varphi_i x_1 - \delta_{1,Q}Q_i + \Delta_{1,p} = 0; \\ \dots \\ \delta_{m,1}X_1 + \dots + \delta_{m,m}X_m + u_i - \varphi_i x_m - \delta_{m,Q}Q_i + \Delta_{m,p} = 0; \\ -\sum_{k=1}^m X_k + Q_{i,1} + R = 0; \\ \sum_{k=1}^m X_k x_k - \ell Q_{i,1} - M = 0; \\ \sum_{k=1}^m \delta_{k,Q}X_k - \delta_{i,Q}Q_i - u_i + \ell \varphi + \Delta_{Q,p} + u_{i+1} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где m – число участков Жемочкина на балке; u_i , φ_i – неизвестные линейное и угловое пере-

мещения введенного защемления на балке с номером i ; R , M – равнодействующая внешних сил и момент равнодействующей относительно введенного защемления на балке с номером i ; Q_i – поперечная сила в разрезанном шарнире по правую сторону балки с номером i ; X_k – усилие в связях Жемочкина с номером k .

Для основания Винклера:

$$\begin{aligned} \delta_{i,k} &= \frac{1}{Kbc} + \frac{\ell^2}{3EI_6} w_{i,k}, \quad i = k; \\ \delta_{i,k} &= \frac{\ell^2}{3EI_6} w_{i,k}, \quad i \neq k, \end{aligned} \quad (2)$$

где K – коэффициент постели упругого основания; EI_6 – изгибная жесткость балки.

Для упругого полупространства

$$\delta_{i,k} = \frac{1 - \mu_0^2}{\pi E_0 c} F_{i,k} + \frac{\ell^2}{3EI_6} w_{i,k}, \quad (3)$$

где E_0 , μ_0 – упругие параметры основания; $F_{i,k}$ – безразмерная функция, определяемая из соотношений [8]:

$$\begin{aligned} F_{i,i} &= 2 \frac{c}{b} \left[\ln \frac{b}{c} + \frac{b}{c} \ln \left(\frac{c}{b} + \sqrt{\frac{c^2}{b^2} + 1} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \ln \left(1 + \sqrt{\frac{c^2}{b^2} + 1} \right) \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_{i,k} = \frac{1}{|x_i - x_k|},$$

b , c – размеры участка Жемочкина на балке (b – ширина балки).

При иной модели упругого основания соотношение Жемочкина (4) меняется как для двухслойного [10], так и для комбинированного основания [11].

Прогибы балки в основной системе смешанного метода с защемлением на краю балки определяются по формулам [8]:

$$\begin{aligned} w_{i,k} &= \frac{x_i^2}{\ell^2} \left(3 \frac{x_k}{\ell} - \frac{x_i}{\ell} \right), \quad x_k > x_i; \\ w_{i,k} &= \frac{x_k^2}{\ell^2} \left(3 \frac{x_i}{\ell} - \frac{x_i}{\ell} \right), \quad x_k < x_i. \end{aligned} \quad (5)$$

Свободные члены системы (1) зависят от вида внешней нагрузки и определяются с использованием формул (5). Последнее уравнение в (1) выражает условие отсутствия взаимного

вертикального перемещения в промежуточном шарнире между соседними балками.

Если обозначить число балок через N , то общее число неизвестных усилий в связях Жемочкина, линейных и угловых перемещений введенных защемлений на балках и поперечных сил в промежуточных шарнирах для расчета рассматриваемой системы составных балок выразится формулой

$$N(m+2) + N - 1. \quad (6)$$

Структура системы разрешающих уравнений для системы балок представлена на рис. 4. Блоки по главной диагонали образованы по системе (1), побочные блоки являются нулевыми для основания Винклера. Для упругого полупространства они характеризуют взаимное влияние балок и определяются с использованием формул (4).

На рис. 4 введены следующие обозначения блоков системы разрешающих уравнений: D_{ii} – блоки по главной диагонали системы разрешающих уравнений: D_{11} – левый блок главной диагонали матрицы коэффициентов, составленный для первой слева балки, не учитывает влияние смежных балок; D_{22} – средний блок главной диагонали матрицы коэффициентов, составленный для средней балки, тоже не учитывает влияние смежных балок, и т. д.; D_{ij} – побочные блоки системы разрешающих уравнений: D_{12} – побочный блок, составленный для первой балки, но от воздействий на второй балке, т. е. учитывает влияние смежных балок, и т. д.

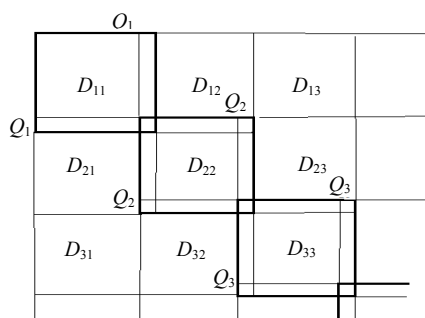


Рис. 4. Структура системы разрешающих уравнений
Fig. 4. Structure of system of resolving equations

Численные результаты

Пример 1. Рассмотрим систему из трех шарнирно соединенных жестких балок одинаковой длины l на упругом основании Винклера с $\kappa = 10 \text{ кН/м}^3$.

Собственный вес балки 20 кН. Средняя балка центрально нагружена силой 100 кН. При расчете балка разбивается на девять участков Жемочкина.

На рис. 5 показан график распределения нормальных напряжений σ на контакте шарнирно соединенных балок с упругим основанием.

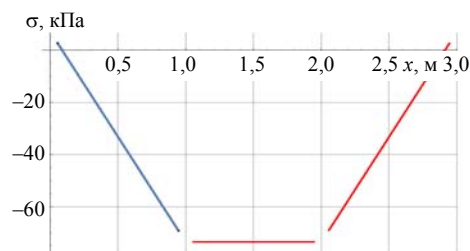


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений на контакте шарнирно соединенных балок с упругим основанием

Fig. 5. Distribution of normal stresses at the contact of articulated beams with elastic foundation

Очевидно, что график перемещений шарнирно соединенных балок на их контакте с упругим основанием получается из графика распределения нормальных напряжений (рис. 5) умножением ординат напряжений на постоянный множитель.

Поперечные силы в цилиндрических шарнирах, соединяющих соседние балки, одинаковы. Согласно расчетам, их значения равны 13,25 кН.

Пример 2. Рассчитаем систему из семи шарнирно соединенных гибких балок из металлополимерного материала, каждая из которых одинаковой длины (3,6 м), ширины (0,4 м) и высоты (0,3 м), изгибной жесткостью $EI_6 = 1000 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$ на упругом полупространстве с упругими параметрами $E_0 = 20 \text{ МПа}$, $\mu_0 = 0,3$. Балки загружены равномерно распределенной нагрузкой $q = 10 \text{ кПа}$. При расчете балка разбивалась на девять участков Жемочкина.

На рис. 6 приведен график распределения контактных напряжений σ под шарнирно соединенными гибкими балками из металлополимерного материала.

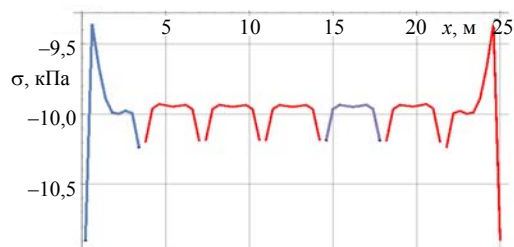


Рис. 6. Распределение контактных напряжений под шарнирно соединенными (составными) гибкими балками из металлополимерного материала

Fig. 6. Distribution of contact stresses under articulated (composite) flexible beams made of metal-polymer material

Пример 3. Рассчитаем систему из семи шарнирно соединенных гибких балок из сборного железобетона, выбранных по грузоподъемности и несущей способности в соответствии с серией 1.415.1-2 Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений «Балки фундаментные железобетонные для наружных и внутренних стен производственных зданий промышленных предприятий», выпуск 5 [12].

Графики распределения поперечных сил Q в шарнирах составных гибких балок из металлополимерного материала и их линейные перемещения u представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

Каждая из балок марки 4БФ48-5 из бетона класса С20/25 ($E_0 = 29$ ГПа) со следующими геометрическими и упругими параметрами: длина 4,68 м, переменная ступенчатая ширина: 0,52 м – верхняя полка, 0,26 м – нижняя полка, высота 0,30 м, изгибная жесткость $EI_0 = 18850$ кН·м² на упругом полупространстве с $E_0 = 20$ МПа, $\mu_0 = 0,3$. Балки загружены равномерно распределенной нагрузкой $q = 50$ кПа. При расчете балка разбивалась на девять участков Жемочкина.

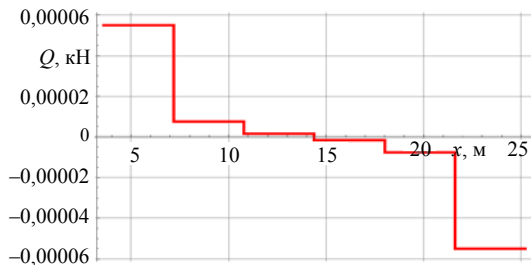


Рис. 7. Распределение поперечных сил в шарнирах составных гибких балок из металлополимерного материала

Fig. 7. Distribution of shear forces in hinges of composite flexible beams made of metal-polymer material

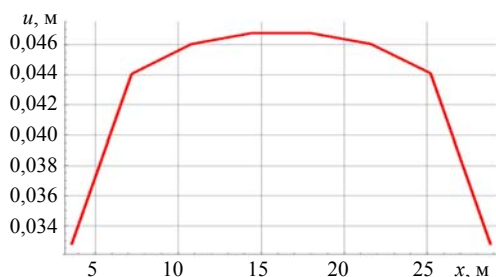


Рис. 8. Линейные перемещения шарниров составных гибких балок из металлополимерного материала

Fig. 8. Linear movements of hinges of composite flexible beams made of metal-polymer material

На рис. 9 приведены графики распределения контактных напряжений σ под шарнирно соединенными гибкими балками из сборного железобетона.

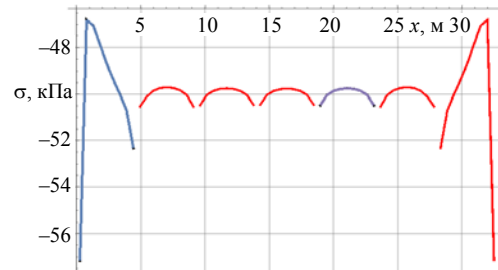


Рис. 9. Распределение контактных напряжений под шарнирно соединенными гибкими балками из сборного железобетона

Fig. 9. Distribution of contact stresses under articulated flexible beams made of precast concrete

На рис. 10, 11 приведены график поперечных сил Q в промежуточных шарнирах соединения гибких балок из сборного железобетона и их линейные перемещения соответственно.

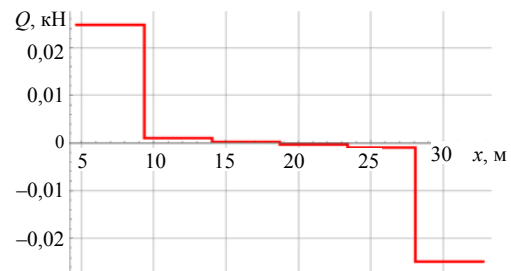


Рис. 10. Распределение поперечных сил в промежуточных шарнирах составных гибких балок из сборного железобетона

Fig. 10. Distribution of shear forces in intermediate hinges of composite flexible beams made of precast concrete

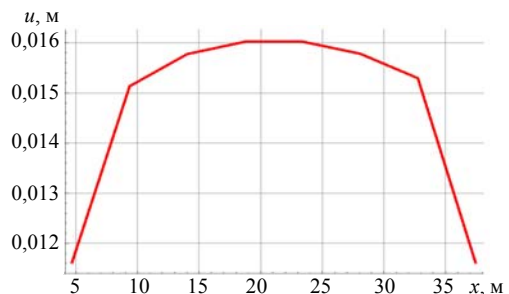


Рис. 11. Линейные перемещения промежуточных шарниров составных гибких балок из сборного железобетона

Fig. 11. Linear displacements of intermediate hinges of composite flexible beams made of precast concrete

ВЫВОДЫ

1. Предложен общий подход к статическому расчету шарнирно соединенных балок на упругом основании. Расчет ведется смешанным методом с использованием соотношений метода Жемочкина для балок различной длины и жесткости, соединенных цилиндрическими шарнирами, на любой модели упругого основания и при действии произвольной внешней вертикальной нагрузки.

2. Результаты численного расчета соответствуют гипотезам строительной механики, теории упругости и механики грунтов и позволяют полностью описать напряженно-деформированное состояние балок (внутренние усилия), их соединений (поперечные силы в шарнирах) и упругого основания (осадки), а также более корректно описать контактную зону взаимодействия балок с основанием.

3. Возможности предлагаемой методики расчета шарнирно соединенных балок на различных упругих основаниях свидетельствуют о ее универсальности и применимости при проектировании фундаментов в промышленном и гражданском строительстве, а также элементов дорожных покрытий при устройстве дорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнев, Б. Г. Вопросы расчета балок и плит на упругом основании / Б. Г. Корнев. М.: Стройиздат, 1954. 232 с.
2. Попов, Г. Я. О расчете неограниченной шарнирно разрезной балочной плиты, лежащей на упругом полупространстве / Г. Я. Попов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1959. № 3. С. 25–33.
3. Симвулиди, И. А. Составные балки на упругом основании / И. А. Симвулиди. М.: Высш. шк., 1961. 204 с.
4. Симвулиди, И. А. Расчет сложных фундаментов на упругом основании / И. А. Симвулиди. М.: Высш. шк., 1969. 51 с.
5. Серебряный, Р. В. Расчет тонких шарнирно соединенных плит на упругом основании / Р. В. Серебряный. М.: Стройиздат, 1962. 64 с.
6. Юр'єв, О. Г. Розрахунок шарнірно-з'єднаних балок на підатлізній основі із застосуванням інтегрального методу / О. Г. Юр'єв // Труды ХІВІ. 1963. Т. VII, вып. 29. С. 44–55.
7. Ржаницин, А. Р. Строительная механика / А. Р. Ржаницин. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.
8. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. М.: Стройиздат, 1962. 240 с.
9. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. М.: Стройиздат, 1984. 680 с.
10. Босаков, С. В. Расчет прямоугольной плиты на двухслойном основании / С. В. Босаков, С. И. Зиневич // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 2. С. 91–94. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-2-91-94>.

11. Босаков, С. В. Об одной модели упругого основания и ее использовании для расчета прямоугольной плиты на упругом основании / С. В. Босаков, С. И. Зиневич, О. В. Козунова // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. Т. 279, № 4. С. 2–5.
12. Балки фундаментные железобетонные для наружных и внутренних стен производственных зданий промышленных предприятий. Вып. 5: Балки без предварительного напряжения продольной арматуры для стен зданий с шагом колонн 6 м. Рабочие чертежи. Указания по применению: Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Серия 1.415.1-2. М.: Госстрой СССР, 1990. 28 с.

Поступила 06.06.2019

Подписана в печать 20.08.2019

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Korenev B. G. (1954) *Calculation Issues for Beams and Slabs on an Elastic Foundation*. Moscow, Stroyizdat Publ. 232 (in Russian).
2. Popov G. Ya. (1959) On the Calculation of an Unrestricted Hinged-Split Beam Slab Lying on an Elastic Half-Space. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo i Arkhitektura = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (3), 25–33 (in Russian).
3. Simvulidi I. A. (1961) *Elastic Split Beams*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 204 (in Russian).
4. Simvulidi I. A. (1969) *Calculation of Complex Foundations on an Elastic Foundation*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 51 (in Russian).
5. Serebryanyi R. V. Calculation of thin Hinged-Connected Plates on an Elastic Foundation. Moscow, Stroyizdat Publ. 64 (in Russian).
6. Yuriev O. G. (1963) Calculation of Hinged Beams on a Pliable Base Using the Integrated Method. *Trudy KhIbI [Trudy Proceedings of the Kharkov Civil Engineering Institute]*, VII (29), 44–55 (in Ukrainian).
7. Rzhanytsyn A. R. (1991) *Building Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 439 (in Russian).
8. Zhemochkin B. N., Sinityn A. P. (1962) *Practical Methods of Calculations of Foundation Beams and Slabs on an Elastic Base*. Moscow, Stroyizdat Publ. 240 (in Russian).
9. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. *Calculation of Structures on an Elastic Base*. Moscow, Stroyizdat Publ. 680 (in Russian).
10. Bosakov S. V., Zinevich S. I. (2018) Calculation of a Rectangular Plate on the Two-Layer Basis. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (2), 91–94 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-2-91-94>.
11. Bosakov S. V., Zinevich S. I., Kozunova O. V. (2018) About one Model of the Elastic Basis and its use for Calculation of a Rectangular Plate on the Elastic Basis. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschiot Sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 2018, 279 (4), 2–5 (in Russian).
12. Typical Constructions, Products and Units of Buildings and Structures. Series 1.415.1-2. Reinforced Concrete Foundation Beams for External and Internal Walls of Industrial Production Buildings. Issue 5. Beams without Prestressing Longitudinal Reinforcement for Building Walls with a Column Pitch of 6 m. Working Drawings. Directions for Use. Moscow, Gosstro USSR, 1990. 28 (in Russian).

Received: 06.06.2019

Accepted: 20.08.2019

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-395-399>

УДК 69.059.3

Экспериментальные исследования технологии усиления железобетонных колонн углеродными волокнами

Канд. техн. наук, доц. А. С. Молодед¹⁾

¹⁾Киевский национальный университет строительства и архитектуры (Киев, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Обычно, чтобы усилить колонну (пилон), увеличивают ее поперечное сечение за счет наращивания, инъектирования укрепляющих растворов и внешнего армирования. Наиболее прогрессивный метод усиления сегодня – внешнее армирование, суть которого состоит в наклеивании на поверхность конструкций высокопрочных полотен, пластин или полосок (ламелей) с помощью специальных клеев. Особое внимание ученые уделяют теоретическим и экспериментальным исследованиям конструктивных решений внешнего армирования вертикальных несущих конструкций. К сожалению, результатов таких исследований, например о влиянии технологии выполнения работ на эффективность усиления, фактически нет. Поэтому задача автора состояла в экспериментальных исследованиях влияния технологических факторов на эффективность усиления железобетонных конструкций, воспринимающих усилия на сжатие. Опыты выполнены шестью сериями, в которых с помощью различных технологических факторов изменялась технология проведения работ. Среди основных факторов: наличие/отсутствие острых углов, подготовка основы (грунтование поверхности), способ приклеивания армирующих материалов к конструкции. Критерием оценки эффективности технологии была разрушающая прочность на осевое сжатие усиленных образцов. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что наибольшая несущая способность достигалась на образцах колонн с округленными углами при условии нанесения клея на основу образца и на углеродное волокно (40,6 т). Прочность на сжатие таких образцов на 82,2 % больше, чем контрольных. Прочность усиленных образцов, углы которых не закругляли, оказалась наименьшей – 34,0 т. Для образца, усиленного волокном, пропитанным клеем, показатель увеличился на 74,3 % по сравнению с контрольными образцами. Прочность на сжатие образцов, усиленных углеродным волокном, приклеенным к предварительно нанесенному на основание клею, составила 38,6 т, что на 73,4 % больше, чем прочность контрольных образцов.

Ключевые слова: колонна, усиление, внешнее армирование, несущая способность, углеродное волокно, технология, углы колонны, клей, подготовка основания, технологические факторы, экспериментальные исследования

Для цитирования: Молодед, А. С. Экспериментальные исследования технологии усиления железобетонных колонн углеродными волокнами / А. С. Молодед // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 395–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-395-399>

Experimental Research of Technology for Strengthening Reinforced Concrete Columns with Carbon Fibers

O. S. Molodid¹⁾

¹⁾Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Abstract. Reinforcement of columns (piers) is usually accomplished by increasing cross-section through building-up, injecting reinforcing solutions and external reinforcement. The most and progressive method for strengthening is currently external reinforcement, its essence is to glue high-strength sheets, plates or strips (lamellas) onto structure surface with the help of special adhesives. Scientists pay special attention to theoretical and experimental studies of design solutions for external reinforcement of vertical load-bearing structures. Unfortunately, the results of such studies, for example, influence of technology for execution of works on strengthening efficiency are virtually absent. Therefore, the objective of this paper is to carry out experiments with the purpose to study influence of technological factors on efficiency in strengthening of reinforced concrete structures, which absorb compressive forces. The experimental studies have been made in six series that changed the technology of executed works while using various technological factors. Among the main factors are the following: presence/absence of acute angles; preparation of a base (surface coating); method for gluing reinforcing materials to a structure. A criterion for evaluation of technology efficiency has been breaking strength for axial compression of reinforced samples.

Адрес для переписки

Молодед Александр Станиславович
Киевский национальный университет
строительства и архитектуры
просп. Воздухофлотский, 31,
03037, г. Киев, Украина
Тел.: +380 67 306-73-59
molodid2005@ukr.net

Address for correspondence

Molodid Oleksandr S.
Kyiv National University
of Construction and Architecture
31, Povitroflotsky Ave.,
03037, Kyiv, Ukraine
Tel.: +380 67 306-73-59
molodid2005@ukr.net

Analysis on the results of experimental studies has shown that the highest load-bearing capacity is achieved while using samples of columns with rounded edges, provided that an adhesive is applied to sample base and carbon fiber (40.6 tons). The compressive strength of such samples is by 82.2 % higher than the strength of control samples. The strength of reinforced specimens with non-rounded edges has appeared to be the lowest one, namely 34.0 tons. Strengthening of the samples with fiber impregnated with an adhesive has increased the indicator by 74.3 % compared to the control samples. The compressive strength of samples reinforced with carbon fiber adhered to the adhesive which is preliminary spread on the basis is equal to 38.6 tons, which is by 73.4 % higher than the strength of the control samples.

Keywords: column, strengthening, external reinforcement, load bearing capacity, carbon fiber, technology, column edges, adhesive, preparation of base, technological factors, experimental studies

For citation: Molodid O. S. (2020) Experimental Research of Technology for Strengthening Reinforced Concrete Columns with Carbon Fibers. *Science and Technique*. 19 (5), 395–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-395-399> (in Russian)

Введение

Во время реконструкции домов и сооружений возникает потребность усиления вертикальных несущих железобетонных конструкций (колонн) из-за потери их прочности с течением времени, влияния различных внешних факторов или необходимости увеличения нагрузки (рис. 1). Для новых зданий тоже не исключена подобная необходимость, что связано с использованием некачественных строительных материалов или конструкций, несоблюдением технологии выполнения работ.



Рис. 1. Колонна, которая потеряла прочность от перегрузки и влияния внешних факторов

Fig. 1. Column having lost its strength due to overload and influence of external factors

В практике реконструкции применяют следующие методы усиления железобетонных колонн (пилонов) [1, 2]:

- 1) увеличение поперечного сечения элементов;
- 2) инъектирование укрепляющих растворов;
- 3) внешнее армирование конструкций.

Классическое усиление колонн внешним армированием заключается в устройстве металлической обоймы с предварительно напряженными накладками или стойками. Сегодня этот метод усиления набирает большую популярность, но с использованием различного рода волокон и клеев.

По мнению автора, внешнее армирование – наиболее прогрессивный метод усиления конструкций, который заключается в наклеивании с помощью специальных клеев на поверхность конструкций высокопрочных полотен, пластин

или полосок (ламель). Такие конструктивно-технологические решения позволяют увеличить несущую способность конструкции, фактически не увеличивая ее вес и не меняя сечения. При этом данная технология имеет низкие трудозатраты, короткое время выполнения работ, не нуждается в машинах и механизмах (только ручные инструменты).

Следует отметить, что отечественные и зарубежные ученые особое внимание уделяют теоретическим и экспериментальным исследованиям конструктивных решений внешнего армирования [3, 4]. В частности, иностранными учеными установлены зависимости напряженно-деформированного состояния и прочности на сжатие усиленных колонн от вида их сечения (круглого, квадратного и прямоугольного) [5], от количества приклеенных горизонтальных полос элементов усиления и мест их расположения по высоте [6–8], от прочности бетона и количества наклеенных слоев элементов усиления [9].

Предполагается, что значительное влияние на эффективность усиления конструкций внешним армированием может оказывать технология выполнения работ. Только результаты таких исследований фактически отсутствуют.

Именно поэтому задача автора – экспериментально исследовать влияние технологических факторов на эффективность усиления железобетонных конструкций, которые воспринимают усилия на сжатие.

Основная часть

Основными конструктивно-технологическими и непосредственно технологическими факторами, которые могут влиять на эффективность усиления вертикальных несущих железобетонных конструкций, являются следующие:

- 1) наличие/отсутствие острых углов на поверхности конструкции;
- 2) подготовка основания (грунтование поверхности);
- 3) способ приклеивания армирующих материалов к конструкции.

Для установления зависимости влияния технологических факторов на прочность усиленных фрагментов колонн на сжатие проведен ряд экспериментальных исследований в лаборатории ГП «НИИСП» (г. Киев).

В исследованиях были использованы железобетонные перемычки типа 2 ПБ 10-1 со следующими характеристиками: размер (длина×ширина×высота) – 1030×120×140 мм; класс бетона – С12/15. Такие балки разрезали по длине на фрагменты по 230 мм каждый.

Усиление образцов выполняли обертыванием углеродным однонаправленным волокном всех боковых поверхностей. Экспериментальные исследования производили шестью сериями.

Серия исследований № 1: образцы контрольные, поэтому с ними не выполняли никаких действий (армирование не производилось) (рис. 2).

Серия № 2: углы образцов закругляли, поверхность грунтовали, наносили слой клея, далее приклеивали углеродное волокно и наносили на него один слой клея сверху (рис. 3).

Серия № 3: углы не закругляли, поверхность грунтовали, наносили слой клея, приклеивали углеродное волокно и добавляли еще слой клея.

Серия № 4: углы образцов закругляли, наносили слой клея, приклеивали углеродное волокно и сверху на него наносили новый слой клея.

Серия № 5: углы образцов закругляли, наносили слой клея и поверх – углеродное волокно.

Серия № 6: углы закругляли и приклеивали к поверхности пропитанное клеем углеродное волокно.



Рис. 2. Общий вид неусиленного образца
Fig. 2. General view of non-reinforced specimen



Рис. 3. Общий вид усиленного образца
Fig. 3. General view of reinforced specimen

До начала работ по наклеиванию углеродного волокна выполняли подготовку основания, а именно – очистку щеткой металлических конструкций боковых поверхностей. Это делалось для снятия верхнего слоя бетона, который контактировал с опалубкой, обработанной антиадгезионным средством. Следующим этапом было нанесение на очищенную поверхность грунтовки «Консолид 1» (производства ООО «КОМПОЗИТ», г. Киев) при условии, что это предусмот-

рено технологией усиления [10, 11]. Наносили грунтовку одним слоем щеткой с мягким ворсом с затратами вещества 450 г/м².

С образцами, поверхность которых грунтовали, последующие действия выполняли через 18–24 ч. В иных случаях волокно приклеивали сразу после закругления углов, очищения боковых поверхностей и удаления с них пыли.

На подготовленную поверхность наносили клей «ЭДМОК» (производства ООО «КОМПОЗИТ») и с помощью шпателя «утапливали» в него углеродное волокно. Через 5–10 мин поверхность волокна покрывали еще одним слоем клея «ЭДМОК» так, чтобы он полностью покрывал поверхность. Его нанесение выполняли щеткой с мягким ворсом с затратами вещества 750 г/м² на основание и 500 г/м² – на поверхность волокна.

В серии испытаний № 6 углеродное волокно полностью пропитывали клеем в специальной емкости, после чего наклеивали на поверхность образца. При таком методе приклеивания затраты клея составляли 2270 г/м², что почти в два раза больше по сравнению с предыдущим способом. Также под пропитанным клеем волокном образуются трудноудаляемые воздушные пустоты. Присутствуют неудобства в работе, связанные с оплыванием с волокна излишков клея и его сползанием с конструкции.

Эксперименты проводились при температуре (15–22) °С на испытательной машине П-125 по схеме осевого сжатия через 96 ч после приклеивания внешнего армирования. Нагрузка к образцу (2,0 т) прикладывалась последовательно. Испытания проводили до полного разрушения образцов.

Результаты исследований и характер разрушения образцов, усиленных разными способами, представлены в табл. 1.

По результатам экспериментальных исследований выявлено, что наибольшая несущая способность достигнута на образцах колонн с округленными углами при условии нанесения клея на основание образца и на углеродное волокно (40,6 т) (серия № 4). Прочность на сжатие таких образцов была на 82,2 % больше, чем прочность контрольных образцов (серия № 1). Почти такой же рост прочности, а именно на 81,7 % в сравнении с контрольными образцами, достигнут на образцах (серия № 2) с дополнительным предварительным грунтованием основания.

Анализируя результаты исследований, можно констатировать, что технологический фактор – грунтование поверхности образцов перед их усилением – не повышает прочность, потому нет целесообразности в выполнении данной операции при усилении колонн.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований по определению разрушающего усилия образцов
Results of experimental studies on determining breaking force of specimens

№ серии	Описание технологии	Среднее разрушающее усилие		Характер разрушения образца	
		т	%	Фото	Описание
1	Армирование не производилось	22,3	100,0		
2	Углы закругленные, поверхность грунтованная, слой клея на основании и на углеродном волокне	40,5	181,7		Полоса волокна (62 мм) разорвалась в верхней части образца. Большая часть разрыва на боковой поверхности. Волокно полностью приклеено к образцу
3	Углы острые, поверхность грунтованная, слой клея на основании и на углеродном волокне	34,0	152,5		Полоса волокна (48 мм) разорвалась в верхней части образца. Весь разрыв произошел в углу. Волокно полностью приклеено к образцу
4	Углы закругленные, слой клея на основании и на углеродном волокне	40,6	182,2		Полоса волокна разорвалась в нижней (52 мм) и средней (23 мм) частях образца. Разрывы произошли на боковых поверхностях. Волокно полностью приклеено к образцу
5	Углы закругленные, слой клея только на основании	38,6	173,4		Полоса волокна (64 мм) оторвалась от напуска в нижней части образца. Разрыв произошел на боковой поверхности. Волокно полностью приклеено к образцу
6	Углы закругленные, углеродное волокно пропитано клеем	38,8	174,3		Полоса волокна (82 мм) оторвалась от напуска в верхней части образца. Разрыв произошел на боковой поверхности. Волокно полностью приклеено к образцу

Прочность на сжатие усиленных образцов, углы которых не закругляли (серия № 3), оказалась наиболее низкой (34,0 т), что на 52,5 % больше при сравнении с контрольными образцами и на 29,7 % меньше, чем прочность образцов серии № 4. Следует отметить, что на таких образцах углеродное волокно разрывалось на углах. Это может свидетельствовать о разрезании волокна острыми углами образцов или об образовании больших напряжений на углах, которые и привели к разрыву волокон.

Результаты экспериментальных исследований образцов серии № 6 показали, что их прочность на сжатие на 74,3 % больше в сравнении

с контрольными образцами и на 7,9 % меньше, чем прочность образцов серии № 4. Нужно отметить, что в реальных условиях строительства такая технология сложная в выполнении, поскольку имеет ряд недостатков, описанных ранее.

Прочность на сжатие образцов серии № 5 составляет 38,6 т, что на 73,4 % больше прочности контрольных образцов и на 8,8 % меньше прочности образцов серии № 4. Такая технология может использоваться в дальнейших исследованиях, а также при выполнении аналогичных работ в строительстве, поскольку отсутствие верхнего слоя клея снижает себестоимость, трудовые затраты и, следовательно, сокращает сроки производства работ.

ВЫВОД

По итогам экспериментальных исследований установлено, что технология выполнения работ по усилению колонн (пилонов) внешним армированием существенно влияет на их прочность. В результате можно констатировать, что острые углы колонн следует округлять, чтобы не вызывать разрыва волокон внешнего армирования;

Грунтовать поверхность необязательно – это не увеличивает прочность усиленных колонн.

Пропитка волокна клеем с его дальнейшим приклеиванием не целесообразна. Такое решение имеет ряд недостатков, а рост прочности усиленной конструкции меньший по сравнению с более простыми решениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ремонт и усиления несущих и ограждающих строительных конструкций и основ зданий и сооружений: ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Введен 01.04.2017. Киев: ГП «УкрНДНЦ», 2017. 72 с.
2. Савйовський, В. В. Реконструкція зданий и сооружений / В. В. Савйовський. Киев: Лира-К, 2018. 320 с.
3. Omar Ahmed Farghal Ahmed, Abd El-Rahman Megahid (2006) Behavior of Axially Loaded Circular RC Column Confined with CFRP Wrapping Sheet / Ahmed Farghal Ahmed Omar, Abd El-Rahman Megahid // Journal of Engineering Sciences, Assiut University. 2006. Vol. 34, No 4. P. 1027–1047.
4. Campione, G. Strength and Strain Enhancements of Concrete Columns Confined with FRP Sheets / G. Campione, N. Miraglia, M. Papia // Structural Engineering and Mechanics. 2004. Vol. 18, No 6. P. 769–790. <https://doi.org/10.12989/sem.2004.18.6.769>.
5. Rocca, S. Review of Design Guidelines for FRP Confinement of Reinforced Concrete Columns of Noncircular Cross Sections / S. Rocca, N. Galati, A. Nanni // Journal of Composites for Construction. 2008. Vol. 1, No 12. P. 80–92. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2008\)12:1\(80\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:1(80)).
6. Holmes, N. Active Confinement of Weakened Concrete Columns / N. Holmes, D. Niall, C. O'shea // Materials and Structures. 2014. Vol. 48, No 9. 2759–2777. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0352-1>.
7. Ghanem, S. Y. Circular RC Columns Partially Confined with FRP: Theses and Dissertations / S. Y. Ghanem. Kentucky, 2016. 201 p.
8. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч. 1: Отечественные эксперименты при статическом нагружении [Электронный ресурс] / И. И. Овчинников [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8, № 3. Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf>.
9. Hayder Lateef Al-Khafaji. Experimental Investigation of CFRP Wrapped Square Non-Ductile Reinforced Concrete Columns / Hayder Lateef Al-Khafaji. Portland State University Pdxscholar, 2016. 212 p.
10. Савйовський, В. В. Усилення железобетонных балочных конструкций внешним армированием / В. В. Савйовський, А. С. Молодед, Н. А. Малец // Управление развитием сложных систем. 2017. № 29. С. 198–204.

11. Технологическая карта на выполнение работ по восстановлению кирпичных, железобетонных конструкций и их защите. Киев: ООО «КОМПОЗИТ», 2009. 7 с.

Поступила 28.02.2018

Подписана в печать 15.03.2019

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. State Standard of Ukraine B.3.1-2:2016. *Repair and Strengthening of Load-Bearing and Protective Building Structures and Foundations of Buildings and Structures*. Kyiv, Ukrainian Research and Training Center of Standardization, Certification and Quality, 2017. 72 (in Russian).
2. Savvyovskiy V. V. (2018) *Reconstruction of Buildings and Structures*. Kyiv, Lira-K Publ. 320 (in Russian).
3. Omar Ahmed Farghal Ahmed, Abd El-Rahman Megahid (2006) Behavior of Axially Loaded Circular RC Column Confined with CFRP Wrapping Sheet. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*. 34 (4), 1027–1047.
4. Campione G., Miraglia N., Papia M. (2004) Strength and Strain Enhancements of Concrete Columns Confined with FRP Sheets. *Structural Engineering and Mechanics*, 18 (6), 769–790. <https://doi.org/10.12989/sem.2004.18.6.769>.
5. Rocca S., Galati N., Nanni A. (2008) Review of Design Guidelines for FRP Confinement of Reinforced Concrete Columns of Noncircular Cross Sections. *Journal of Composites for Construction*, 1 (12), 80–92. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2008\)12:1\(80\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:1(80)).
6. Holmes N., Niall D., O'shea C. (2014) Active Confinement of Weakened Concrete Columns. *Materials and Structures*, 48 (9), 2759–2777. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0352-1>.
7. Ghanem S. Y. (2016) *Circular RC Columns Partially Confined with FRP: Theses and Dissertations*. Kentucky. 201.
8. Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Chesnokov G. V., Mikhaldykin E. S. (2016) Analysis of Experimental Studies on the Reinforcement of Reinforced Concrete Structures with Polymer Composite Materials. Part 1. Domestic Experiments under Static Loading. *Internet Journal "Naukovedenie"*, 8 (3). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf>.
9. Hayder Lateef Al-Khafaji (2016) *Experimental Investigation of CFRP Wrapped Square Non-Ductile Reinforced Concrete Columns. Dissertations and Theses*. Portland State University Pdxscholar. 212.
10. Saviovs'kii V. V., Moloded A. S., Malets N. A. (2017) Reinforcement of Reinforced Concrete Beam Structures with External Reinforcement. *Upravlenie Razvitiem Slozhnykh System* [Management of the Development of Complex Systems], (29), 198–204 (in Russian).
11. *Technological Map for the Implementation of Work on the Restoration of Brick, Reinforced Concrete Structures and their Protection*. Kiev, LLC "COMPOSITE", 2009. 7 (in Russian).

Received: 28.02.2018

Accepted: 15.03.2019

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-400-406>

УДК 711.417.5

Стратегии трансформации планировочной структуры городов-спутников Минской агломерации

Магистр архит. Н. И. Жолудь¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Определение стратегий формирования городов-спутников Минска является основой для развития полицентрической модели столичной агломерации. На основании проведенного сопоставительного анализа проектных решений генеральных планов предложена концепция совершенствования планировочной структуры и функциональной организации городов-спутников. Концепция заключается в адаптации их планировочной структуры к одному из перспективных экономических профилей (промышленному, научно-промышленному, аграрно-промышленному, туристско-рекреационному). В соответствии с концепцией выделяются четыре основных типа планировочной структуры городов-спутников, коррелирующих с их градообразующими спецификами: урбанизированная планировочная структура (тип У) – промышленный город, урбанизированно-природная (УП) – научно-промышленный город, природно-урбанизированная (ПУ) – аграрно-промышленный город и природная (П) – туристско-рекреационный город. Выделенные типы планировочной структуры легли в основу стратегий их преобразований. Термин «стратегия» в градостроительном контексте подразумевается как генеральное направление трансформации планировочной структуры города на долговременную перспективу (20–30 лет). При разработке генеральных планов необходимо выделять два основных направления трансформации: преобразование и развитие. Реализация первого направления обеспечивается двумя стратегиями – фрагментацией и дефрагментацией, а также четырьмя разновидностями каждой из стратегий. Стратегии пространственного развития – консолидация, векторный рост, секторный рост, радиальный рост. Особое внимание уделено анализу возможных вариантов размещения функциональных зон в зависимости от удаленности города от города-ядра. С учетом выделенных стратегий пространственного развития и анализа размещения городов-спутников в Минской агломерации разработаны двенадцать планировочных моделей, которые могут использоваться при создании градостроительных проектов по совершенствованию функционально-планировочной организации поселений Минской агломерации.

Ключевые слова: города-спутники, Минская агломерация, стратегия развития, типология планировочной структуры, модель преобразования

Для цитирования: Жолудь, Н. И. Стратегии трансформации планировочной структуры городов-спутников Минской агломерации / Н. И. Жолудь // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 400–406. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-400-406>

Planning Structure Transformation Strategies for Satellite Cities of the Minsk Agglomeration

N. I. Zholud'¹⁾

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

Abstract. Determination of strategies for the formation of satellite cities of Minsk is the basis for the development of a polycentric model of the metropolitan agglomeration. On the basis of the comparative analysis of design solutions for master plans, a concept for improving the planning structure and functional organization of satellite cities has been proposed in the paper. The concept is to adapt their planning structure to one of the promising economic profiles (industrial, scientific and industrial, agrarian and industrial, tourism and recreation). In accordance with the concept, there are four main types of the planning structure of satellite cities that correlate with their city-forming specifics: an urbanized planning structure (type У) – an industrial city, an urbanized-natural structure (type УП) – a scientific-industrial city, a natural-urbanized structure (type ПУ) – agricultural and industrial city and a natural structure (type П) – tourist and recreational city. The selected

Адрес для переписки

Жолудь Наталья Игоревна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-59
grado@bntu.by

Address for correspondence

Zholud' Natalia I.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-59
grado@bntu.by

types of planning structure have formed the basis of strategies for their transformation. The term “strategy” in the urban planning context is understood as the general direction of the transformation of the city’s planning structure for the long period (20–30 years). While developing master plans, it is necessary to distinguish two main directions of transformation: transformation and development. The implementation of the first direction is provided by two strategies – fragmentation and defragmentation as well as four varieties of each strategy. Spatial development strategies are consolidation, vector growth, sector growth, radial growth. Particular attention is paid to the analysis of possible options for the placement of functional zones, depending on the distance of the city from the core city. Taking into account the identified strategies for spatial development and analysis of the location of satellite cities in the Minsk agglomeration, twelve planning models have been developed that can be used to create urban planning projects to improve the functional planning organization of settlements in the Minsk agglomeration.

Keywords: satellite cities, Minsk agglomeration, development strategy, typology of planning structure, transformation model

For citation: Zholid’ N. I. (2020) Planning Structure Transformation Strategies for Satellite Cities of the Minsk Agglomeration. *Science and Technique*. 19 (5), 400–406. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-400-406> (in Russian)

Введение

На современном этапе градостроительного развития Минской агломерации актуальной задачей является формирование городов-спутников Минска. Первые уверенные шаги по формированию в столичном регионе городов-спутников сделаны еще в 2010 г. Именно тогда была утверждена Государственная программа строительства крупных жилых районов для жителей г. Минска в городах-спутниках и выноса (переноса) из столицы в населенные пункты республики некоторых производственных объектов [1]. Данный документ направлен на ограничение численности жителей города Минска (не более 2 млн чел.) [2]. В список городов-спутников были включены: Дзержинск, Фаниполь, Жодино – промышленные, Смолевичи, Столбцы, Узда, Руденск – аграрно-промышленные, Заславль и Логойск – туристско-рекреационные города [1].

После утверждения Государственной программы в 2013 г. Институтом экономики НАН Беларуси была разработана «Концептуальная модель развития городов-спутников Минска». Ее отличительная особенность – экономический аспект рассмотрения проблемы [3].

Второй этап формирования городов-спутников начался в 2014 г. после подписания Указа Президента Республики Беларусь № 214 «О развитии городов-спутников», где был уточнен их список. Данный документ урегулировал вопрос создания городов-спутников и определил их статус, который может быть придан городу областного или районного подчинения, городскому поселку, расположенному на расстоянии не более 60 км от Минска [4]. Указ закрепил статус городов-спутников за следующими городами: Дзержинск, Фаниполь, Заславль, Руденск, Смолевичи, Логойск. Как и в предыдущих документах, целью формирова-

ния городов-спутников являлось строительство жилья для минчан, нуждающихся в улучшении жилищных условий. Эта особенность предопределила содержание утвержденных главой государства генеральных планов городов в 2016 г. [5].

Сопоставительный анализ проектных решений генеральных планов, проведенный автором, выявил проблему отсутствия долгосрочных стратегий комплексного развития городов-спутников как составной части агломерации.

Решению названных проблем может способствовать разработка вариантов моделей планировочной организации, основанных на стратегических направлениях развития городов-спутников, обусловленных характеристиками их градостроительной организации и местоположением в Минской агломерации.

Основная часть

На основании проведенного анализа автором предложена концепция совершенствования планировочной структуры и функциональной организации городов-спутников, которая заключается в ее адаптации к одному из экономических профилей, определенному в программе развития городской агломерации. Такие профили могут выделяться по преобладанию градоформирующей группы населения в структуре занятости. В условиях Беларуси актуальны следующие экономические профили городов:

- промышленный;
- научно-промышленный;
- аграрно-промышленный;
- туристско-рекреационный [6].

Названные экономические профили городов коррелируют с разработанной автором

типологией планировочных структур городов-спутников и соответствуют теории трансенда, предполагающей выделение вокруг поселений концентрических поясов с постепенным снижением степени урбанизации территории и увеличением доли ландшафта [7].

В соответствии с дифференциацией урбанизированных и природных осей и узлов, удаленностью города от ядра агломерации выявлено четыре типа планировочных структур, которые соответствуют четырем экономическим профилям городов:

- урбанизированная – промышленный город;
- урбанизированно-природная – научно-промышленный город;
- природно-урбанизированная – аграрно-промышленный город;
- природная – туристско-рекреационный город.

Урбанизированная планировочная структура (тип У) – промышленный город (рис. 1). Планировочная структура промышленного города в составе агломерации отличается повышенным уровнем урбанизации территории – наличием полимагистралей (коммуникационных коридоров) национального и регионального значения, а также отсутствием крупных природных комплексов.

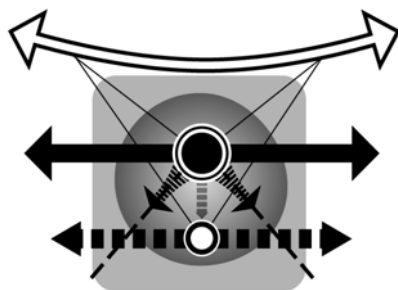


Рис. 1. Схема развития урбанизированной планировочной структуры

Fig. 1. Development plan of urbanized planning structure

Характерными особенностями данной планировочной структуры являются:

- тяготение всех функциональных зон к транспортным магистралям;
- расположение общегородского общественного центра вблизи узла внешнего транспорта;
- расчленение территории города магистралями;
- локализация мест приложения труда вблизи железнодорожных магистралей;

- развитие территории параллельно основным транспортным коммуникациям в направлении ядра агломерации;

- концентрация производственных территориальных образований.

Ограниченность природного комплекса (отсутствие водоемов) и повышенная степень антропогенного освоения данной планировочной структуры предполагают ее развитие с учетом градообразующей специфики производственного и логистического профиля.

Ландшафтно-рекреационные территории имеют ограниченные связи с пригородным природным комплексом и формируются групповым либо линейно-полосовым способом (нет единой природной оси).

Для городов типа У рекомендовано формирование открытой планировочной структуры, которая предполагает линейное развитие основных функциональных зон вдоль урбанизированных осей и более интенсивное использование внутренних территориальных ресурсов – уплотнение застройки. Базовая модель представлена на рис. 2.

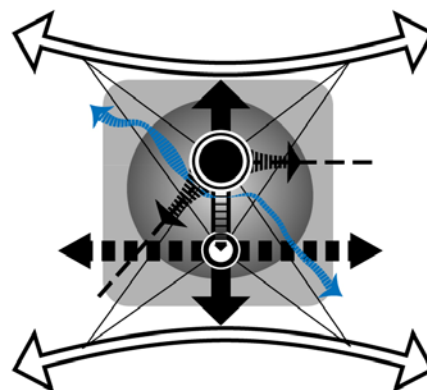


Рис. 2. Схема развития урбанизированно-природной планировочной структуры

Fig. 2. Development scheme of urbanized natural planning structure

Урбанизированно-природная планировочная структура (тип УП) – научно-промышленный город. Рассматриваемый тип планировочной структуры характеризуется наличием нескольких урбанизированных осей и развитым природным комплексом.

Внешние связи с городом-центром осуществляются магистралью республиканского значения и железной дорогой, расположенными параллельно друг другу. Природная ось пересекает в диагональном направлении урбани-

зированные оси и расчленяет территории города на основные структурные элементы.

Природный комплекс не оказывает ведущего влияния на планировочное построение города, но играет важную роль в его функциональной организации. Это связано с незначительными участками, занятыми водными ресурсами и их пойменными территориями.

Ландшафтные территории формируются согласно линейно-полосовой (вдоль природной оси) либо центрической (вокруг компактного в плане природного комплекса) модели.

Базовая модель развития урбанизированно-природной планировочной структуры представлена на рис. 2.

Природно-урбанизированная планировочная структура (тип ПУ) – аграрно-промышленный город. Планировочная структура аграрно-промышленного города характеризуется равновесием природных и урбанизированных осей. Связь с ядром агломерации осуществляется посредством автомобильного транспорта по автодороге республиканского значения. Природный комплекс оказывает существенное влияние на планировочное построение города и диктует трассировку улиц, размещение функциональных зон. В основе данного типа лежит ориентация на развитие антропогенной структуры в тесном взаимодействии с природным комплексом. Водные пространства с обширными пойменными территориями расчленяют территорию города (рис. 3).

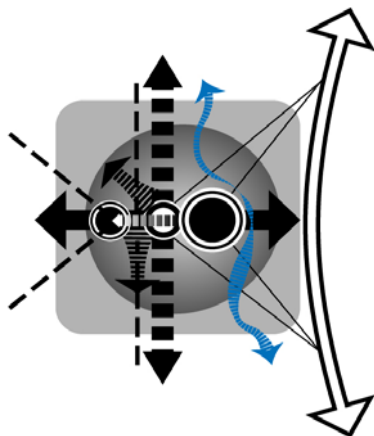


Рис. 3. Схема развития природно-урбанизированной планировочной структуры

Fig. 3. Development scheme of natural-urbanized planning structure

Природная планировочная структура (тип П) – туристско-рекреационный город.

Природную планировочную структуру города следует формировать при наличии крупных рекреационных и охраняемых территорий, а также спортивно-развлекательных комплексов. Связь с городом-центром обеспечивается по автодорогам республиканского значения. Сложившийся природный комплекс определяет направления совершенствования функционально-планировочной организации города и является основой для развития туристского потенциала.

Природные оси и узлы выступают структуроформирующей системой планировки города, которая определяет размещение специализированных общественно-развлекательных, рекреационных, туристических и других учреждений (рис. 4).

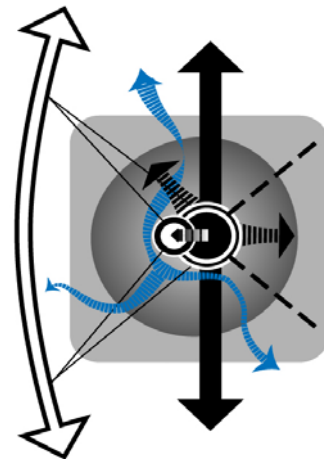


Рис. 4. Схема развития природной планировочной структуры

Fig. 4. Development scheme of natural planning structure

Стратегические направления совершенствования планировочной структуры городов

Стратегические направления (стратегии) совершенствования планировочной структуры городов должны отражать долгосрочные цели социально-экономических преобразований агломерации. Под термином «стратегия» следует понимать генеральное направление трансформации планировочной структуры города, принимаемое в рамках генерального плана.

Стратегические направления совершенствования планировки городов опираются на известные принципы преобразования и развития городской территории, к которым относятся:

- гибкость планировочной структуры;
- преемственность;
- компактность;
- экоустойчивость [8, 9].

Наиболее общим правилом при преобразовании городов агломерации является формирование открытой планировочной структуры, предполагающей беспрепятственное развитие основных функциональных зон в направлении города-центра. Такая модель развития города основана не только на внутренних связях между элементами и зонами самого города, но и на внешних, которые формируют планировочный каркас системы агломерации в целом [10].

В стратегиях трансформации территории города рекомендуется различать два вида ее освоения:

- преобразование – освоение территории города, осуществляемое путем реконструкции сложившейся застройки и нового строительства в рамках сложившейся городской черты;

- развитие – увеличение площади города за счет включения в городскую черту новых территорий.

Преобразование территории как форма освоения может быть реализована двумя базовыми стратегиями, которые получили названия «фрагментация» (новое строительство на свободных территориях и уплотнение существующей застройки) и «дефрагментация» (реконструкция застройки).

Стратегические направления преобразования планировочной структуры городов имеют следующие разновидности:

- фрагментации:

- дисперсная – выборочное строительство на свободных участках, удаленных друг от друга;

- локальная – выборочное строительство на компактной в плане территории;

- векторная – выборочное строительство вдоль одной из планировочных осей;

- комплексная – новое строительство, объединенное комплексом торгового, культурно-бытового обслуживания и реализуемое согласно единому замыслу;

- дефрагментации:

- дисперсная – выборочная реконструкция объектов, удаленных друг от друга и не связанных функциональными, пространственными связями;

- локальная – выборочная реконструкция объектов, расположенных на компактной в плане территории, но не связанных функциональными, пространственными связями;

- векторная – выборочная реконструкция объектов, расположенных вдоль одной из планировочных осей;

- комплексная – комплексная реконструкция застройки, осуществляемая согласно единому замыслу.

Графические модели преобразования планировочной структуры городов-спутников представлены на рис. 5.

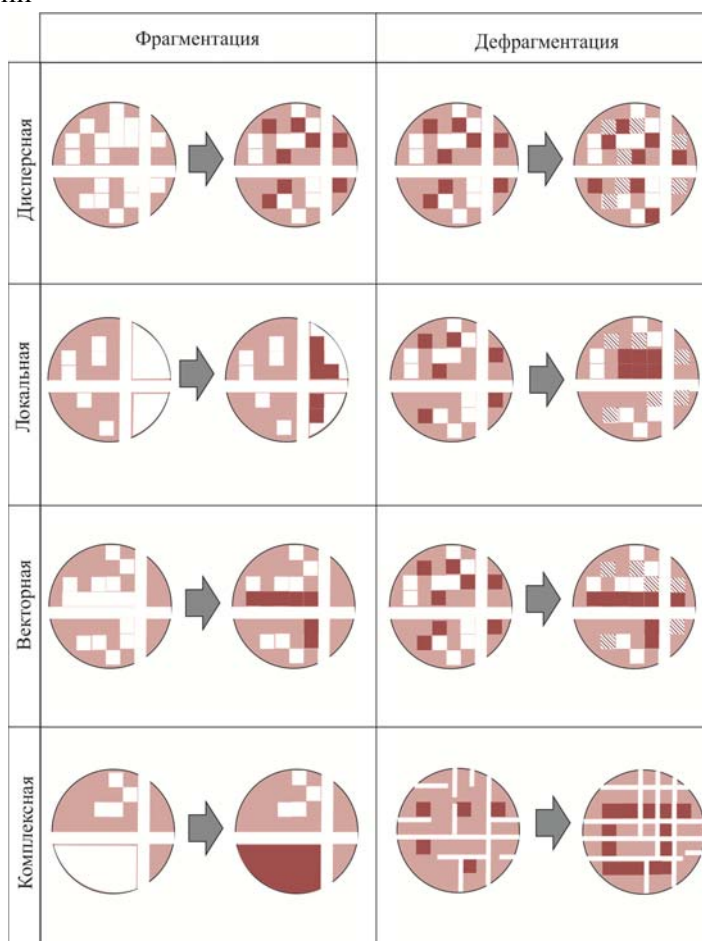


Рис. 5. Планировочные модели стратегии преобразования городов-спутников

Fig. 5. Planning models for transformation strategy of satellite cities

Автором разработаны следующие стратегии пространственного развития планировочной структуры городов:

- консолидация – объединение отдельных поселений в новый город с формированием нового качества планировки (рис. 6а);
- векторный рост – линейное территориальное развитие города в одном направлении, ограниченное полимагистральями (коммуникационными коридорами) (рис. 6б);
- секторный рост – поясное развитие одного из районов города (рис. 6с);
- радиальный рост – равномерное осевое развитие территории вдоль вылетных магистралей (рис. 6д).

На основе экономических профилей городов-спутников и разработанной автором их типологии составлены двенадцать моделей их планировочной организации, выявляющие возможные варианты взаимного размещения функциональных зон в зависимости от удаленности города от ядра-центра (рис. 7).

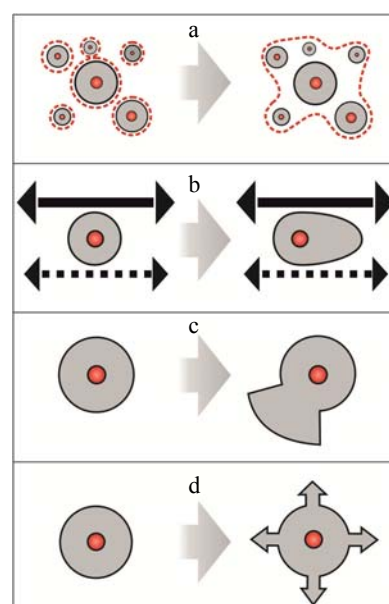


Рис. 6. Стратегические направления развития планировочной структуры городов-спутников:
а – консолидация; б – векторный рост; с – секторный рост; д – радиальный рост

Fig. 6. Strategic directions for development of planning structure of satellite cities:
b – vector growth; c – sector growth; d – radial growth

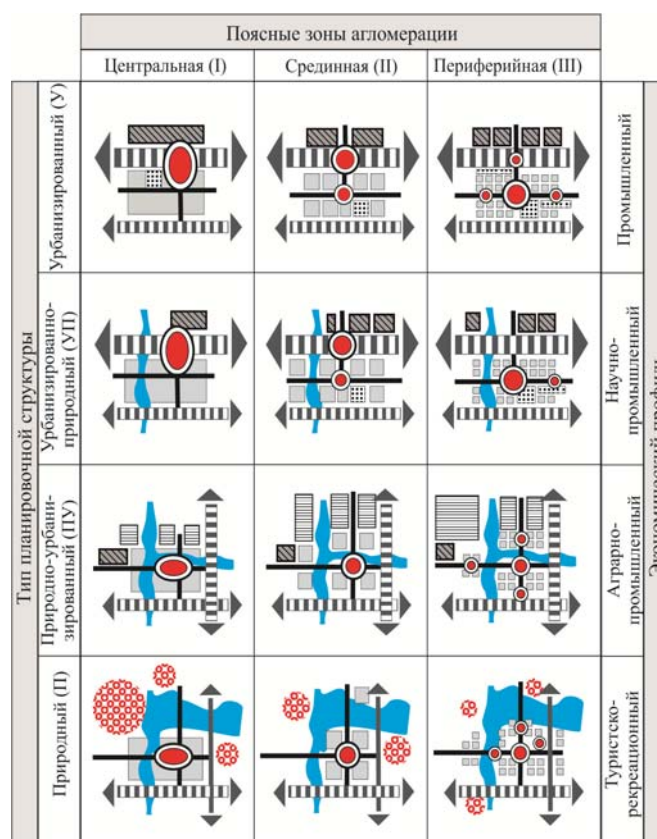


Рис. 7. Теоретические модели функционально-планировочной организации городов-спутников

Fig. 7. Theoretical models of functional planning organization of satellite cities

ВЫВОДЫ

1. Развитию и реконструкции городов-спутников могут способствовать выделение четырех типов планировочной структуры, соответствующих перспективному экономическому профилю, а также планировочные модели трансформации территории городов-спутников, выявляющие особенности развития отдельных элементов в зависимости от удаления города-спутника от города-центра.

2. При разработке проектной документации необходимо учитывать стратегические направления совершенствования планировочной структуры городов-спутников – преобразование (фрагментация и дефрагментация) и развитие (консолидация, векторный, секторный и радиальный рост).

ЛИТЕРАТУРА

1. О Государственной программе строительства крупных жилых районов для жителей г. Минска в городах-спутниках и выноса (переноса) из столицы в населенные пункты республики некоторых производственных объектов [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 29.06.2010, № 976 // Белзакон. Режим доступа: https://belzakon.net/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%B0_%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%A0%D0%91/2010/61924.
2. Генеральный план города Минска (корректировка). Основные положения градостроительного развития города Минска. Система градостроительных регламентов / Мингориспоком, Комитет архитектуры и градостроительства. Минск: УП «Минскград», 2016. 131 с.
3. Концептуальная модель развития городов-спутников Минска / Т. С. Вертинская [и др.], под общ. ред. Т. С. Вертинской. Минск: Беларуская навука, 2013. 196 с.
4. О развитии городов-спутников [Электронный ресурс]: Указ Президента Республики Беларусь, 7 мая 2014 г., № 214 // Kodeksy-by. Режим доступа: https://kodeksy-by.com/norm_akt/source-%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%20%D0%A0%D0%91/type-%D0%A3%D0%BA%D0%B0%D0%B7/214-07.05.2014.htm.
5. Потаев, Г. А. Планировка населенных мест / Г. А. Потаев. Минск: РИПО, 2015. 304 с.
6. Концепция территориальной организации Минской агломерации / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск: НП РУП «БелНИИПградостроительства», 2014. 41 с.
7. Жолудь, Н. И. Планировочная организация городов-спутников в условиях развития Минской агломерации / Н. И. Жолудь // Архитектура: сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2019. Вып. 12. С. 58–63.
8. Основы теории градостроительства / З. Н. Яргина [и др.]. М.: Стройиздат, 1986. 162 с.

9. Стратегия устойчивого развития минской области на 2016–2025 годы (Проект) [Электронный ресурс]. Минск, 2015. Режим доступа: <http://allminsk.biz/images/sur.pdf>.

10. Иодо, И. А. Основы градостроительства и территориальной планировки / И. А. Иодо, Г. А. Потаев. Минск: УниверсалПресс, 2003. 216 с.

Поступила 30.05.2019

Подписана в печать 06.08.2019

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. *About the State Program of Construction of Large Residential Areas for Inhabitants of Minsk in the Cities-Satellites and Removal (Transfer) from the Capital to Settlements of the Republic of Some Production Facilities: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus from 29.06.2010 No 976.* Available at: https://belzakon.net/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%B0_%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%A0%D0%91/2010/61924.
2. Minsk City Executive Committee, Committee for Architecture and Urban Planning (2016) *General Plan of the City of Minsk (Correction). The Main Provisions of the Urban Development of the City of Minsk. System of Town Planning Regulations.* Minsk, Minskgrado. 131 (in Russian).
3. Vertinskaya T. S., Bogdanovich A. V., Bulko O.S., Kel'nik A. V., Avtory: Koleda O. A., Van Tsyzyun', Bulavitskaya M. G. (2013) *Conceptual Model of Development of Satellite Cities of Minsk.* Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 196 (in Russian).
4. *On the Development of Satellite Cities:* Decree of the President of the Republic of Belarus from May 7, 2014 No 214. Available at: https://kodeksy-by.com/norm_akt/source-%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%20%D0%A0%D0%91/type-%D0%A3%D0%BA%D0%B0%D0%B7/214-07.05.2014.htm.
5. Potaev G. A. (2015) *Layout of Settlements.* Minsk, Republican Institute for Vocational Education. 304 (in Russian).
6. Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus (2014) *The Concept of the Territorial Organization of the Minsk Agglomeration.* Minsk, Scientific and Design Republican Unitary Enterprise "BelNIIPgradostroitelstva". 41 (in Russian).
7. Zhulud N. I. (2019) Planning Organization of Satellite Cities in the Context of the Development of the Minsk Agglomeration. *Arkhitektura: Sb. Nauch. Tr.* [Architecture: Collection of Research Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 12, 58–63 (in Russian).
8. Yargina Z. N., Kositskii Ya. V., Vladimirov V. V., Gutnov A. E., Mikulin E. M. *Foundations of Urban Planning Theory.* Moscow, Stroyizdat Publ. 162 (in Russian).
9. *Sustainable Development Strategy of the Minsk Region for 2016–2025.* Minsk, 2015. Available at: <http://allminsk.biz/images/sur.pdf> (in Russian).
10. Iodo I. A., Potaev G. A. (2003) *Basics of Urban Planning and Territorial Planning.* Minsk, UniversalPress Publ. 216 (in Russian).

Received: 30.05.2019

Accepted: 06.08.2019

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-407-412>

УДК 528.48

Картографическая экстраполяция как метод прогнозирования природных явлений и процессов

Канд. геогр. наук, доц. В. И. Михайлов¹⁾, магистрант Е. Ю. Мысливчик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Все известные методы прогнозирования не могут обойтись без помощи карт, если это касается природных явлений и процессов. Географический прогноз можно рассматривать как предсказание географических явлений или процессов, не доступных для исследования. Идентичность методики прогнозирования динамики явлений во времени и распространения их в пространстве позволяет переносить закономерности, справедливые для временных последовательностей, на пространственные ряды. В отличие от специализированных методов прогноза, разрабатываемых отдельными науками, картография предоставляет в распоряжение исследователя общий способ прогнозирования, названный картографической экстраполяцией. Экстраполяция в данном случае понимается как распространение закономерностей, полученных в ходе картографического анализа какого-либо явления или процесса, на неизученную часть этого явления или процесса, на другую территорию, на будущее время. Изложенное рассмотрено на примере карты СВДЗК Республики Беларусь, составленной по данным геофизики и повторных нивелировок. Применяя метод картографической экстраполяции по карте, выделены прогнозные закономерности и ожидания. Эффективность картографической экстраполяции возрастает при комплексном использовании разных методов. Особое значение имеет взаимодействие картографического и дистанционного методов. Совместный анализ карт, аэро- и космических снимков, полученных с разных высот и в различных диапазонах, способствует прогнозу общих глобальных, региональных или локальных закономерностей. Пример тому – геолого-геоморфологические исследования. Для прогноза неотектонического строения территории в зоне сочленения Микашевичского выступа кристаллического фундамента и Туровской депрессии в Белорусском Полесье использовались карты разного содержания и результаты дешифрирования аэроснимков.

Ключевые слова: карты, картографическая экстраполяция, дешифрирование по аэрофотоснимкам, прогноз

Для цитирования: Михайлов, В. И. Картографическая экстраполяция как метод прогнозирования природных явлений и процессов / В. И. Михайлов, Е. Ю. Мысливчик // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 407–412. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-407-412>

Cartographic Extrapolation as Method for Forecasting Natural Phenomena and Processes

V. I. Mikhailov¹⁾, E. Yu. Myslivchik¹⁾

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

Abstract. All known forecasting methods cannot do without the help of maps when it comes to natural phenomena and processes. Geographic forecasting can be considered as predicting geographic phenomena or processes that cannot be explored. Identity of the methodology for forecasting the dynamics of phenomena in time and their propagation in space makes it possible to transfer the patterns that are true for time sequences to spatial series. In contrast to specialized forecasting methods developed by individual sciences, cartography provides a researcher with a general forecasting method called cartographic extrapolation. In this case the extrapolation is understood as the spread of patterns obtained in the course of cartographic analysis of a phenomenon or a process to an unexplored part of this phenomenon or process to another territory, for the future.

Адрес для переписки

Михайлов Владимир Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25/1,
220014, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-95-97
inggeod@bntu.by

Address for correspondence

Mikhailov Vladimir I.
Belarusian National Technical University
25/1, F. Skoriny str.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-95-97
inggeod@bntu.by

The foregoing is considered on the example of a map of Modern vertical movements of the Earth's crust in the Republic of Belarus which is compiled according to geophysical data and repeated leveling. Predictive patterns and expectations are highlighted while applying the method of cartographic extrapolation on the map. The efficiency of cartographic extrapolation is increased with the complex use of different methods. The interaction of cartographic and remote methods is of particular importance. Joint analysis of maps, aerial and satellite images obtained from different heights and in different ranges helps to predict general global, regional or local patterns. An example of this is geological and geomorphological research. Maps of different contents and the results of interpretation of aerial photographs have been used to predict the neo-tectonic structure of the territory in the zone of junction of the Mikashevich ledge of the crystalline basement and the Turov depression in the Belarusian Polesie.

Keywords: maps, cartographic extrapolation, interpretation from aerial photographs, forecasting

For citation: Mikhailov V. I., Myslivchik E. Yu. (2020) Cartographic Extrapolation as Method for Forecasting Natural Phenomena and Processes. *Science and Technique*. 19 (5). 407–412. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-407-412> (in Russian)

Все известные методы прогнозирования, будь то математическое моделирование, экспертные оценки, балансовый метод и другие, не могут обойтись без помощи карт, если это касается природных явлений и процессов. Карты неизменно сопровождают геологическое или географическое прогнозирование на всех его этапах, начиная с накопления отправляемых фактов и сведений и заканчивая выдачей итоговых прогнозных документов.

Географический прогноз можно рассматривать как предсказание географических явлений или процессов, недоступных исследованию [1, 2]. В такой трактовке прогнозирование не ограничивается гипотезами о развитии явлений и процессов в будущем, а предполагает возможность предсказания их современного состояния. Существенно лишь то, что предсказываемый объект недоступен современному исследованию.

Прогнозирование будущих и современных состояний географических явлений и процессов тесно связано с представлением о динамических и статических системах. В ряде случаев статическую пространственную систему, компоненты которой представлены на серии карт разной тематики, можно рассматривать как частный случай динамической системы, в которой координата времени постоянна. Идентичность методики прогнозирования динамики явлений во времени и распространение их в пространстве позволяет переносить закономерности, справедливые для временных последовательностей, на пространственные ряды.

В отличие от специализированных методов прогноза, разрабатываемых отдельными науками, картография предоставляет в распоряжение исследователя специфический общий способ

прогнозирования, названный картографической экстраполяцией [1, 2]. Экстраполяция в данном случае понимается как распространение закономерностей, полученных в ходе картографического анализа какого-либо явления или процесса, на неизученную часть этого явления или процесса, на другую территорию, на будущее время.

Авторами проведен анализ ряда карт современных движений земной коры, на основании которого была выбрана карта Ж. П. Хотько [3]. Составленная по данным геофизики и повторных нивелировок (рис. 1). На карте выделяются зоны резкого изменения скоростей вертикальных движений продольного и поперечного направлений. Самая протяженная из них пересекает регион с севера на юг в направлении Браслав – Гомель. Эта зона захватывает разные геоструктурные элементы и совпадает с границей разновозрастной складчатости докембрия. Она отражает особенности внутренней структуры кристаллического фундамента. Здесь, в сравнительно узкой зоне, скорость вертикальных движений изменяется до 8 мм в год.

Применяя метод картографической экстраполяции по карте, можно установить следующие прогнозные закономерности и ожидания.

В зоне резкого сгущения изобаз расположены Солигорские рудники, Гомель. Далее от Гомеля эта зона резко поворачивает на юго-запад и затем на юг, где она пересекает площадку Чернобыльской АЭС. Сегодня уже доказано, что катастрофа на Чернобыльской АЭС произошла не по технической, а по тектонической причине. Площадка под эту АЭС была выбрана неверно.

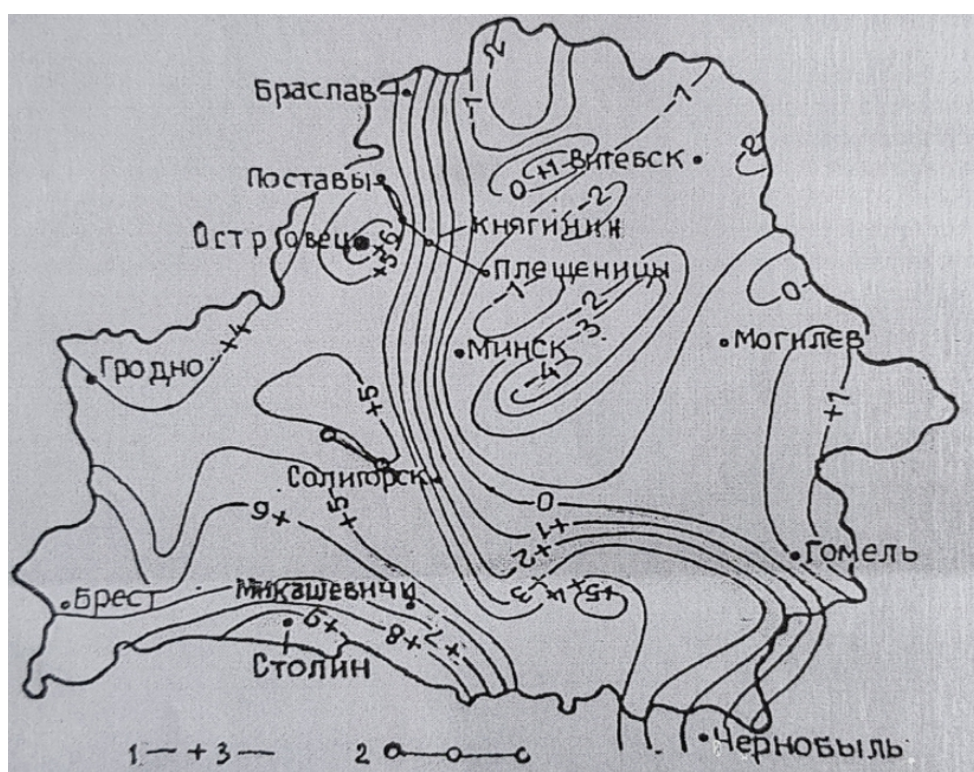


Рис. 1. Карта современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) Беларуси, М 1:6000000 (по Ж. П. Хотко [3]):
1 – изобазы со значениями скоростей СВДЗК, мм/год; 2 – фрагменты профилей фундаментальных реперов
на Плещеницком и Краснослободском геодинамических полигонах

Fig. 1. Map of modern vertical movements of the Earth's crust in Belarus, Scale 1:6000000 (according to Zh. P. Khotko [3]):
1 – isobases with velocity values of modern vertical movements of the Earth's crust, mm/year; 2 – fragments of profile
of fundamental benchmarks at the Pleshchenitsky and Krasnoslobodsky geodynamic test sites

Согласно карте, Островецкая АЭС также находится рядом с такой зоной. Поэтому этот факт нужно принимать во внимание.

Если рассматривать произошедшие за небольшой исторический период землетрясения, то оказывается, что все они так же, как Солигорское и Чернобыльское, были локализованы вдоль зоны сгущения изобаз Браслав–Минск–Гомель. Некоторые из них достигали 6–7 баллов и относились к очень сильным, способным вызвать существенные разрушения. Так, еще в 1887 г. в Борисовском уезде произошло землетрясение, сопровождающееся сильным гулом и вышибанием стекол во многих домах. В этом районе зарегистрированы обилие разломов, резкие изгибы русел рек, контрастные современные движения [4]. Землетрясение 15 декабря 1909 г. в пределах Островецкого района происходило с интенсивностью около 7 баллов.

В результате новейших подвижек крупных блоков платформенного чехла намечается тенденция усиления тектонических движений на

территории Солигорского промышленного района, которая до недавнего времени считалась асейсмичной. Уже в 1978, 1983, 1998 гг. в этом районе были зарегистрированы землетрясения до 4 баллов по шкале Рихтера [3, 4]. Наряду с выявленной сейсмической активностью, энергетический класс которой определяется современной мобильностью земной коры, обнаруживаются местные сейсмические явления (до 40 землетрясений в год) природно-техногенного происхождения. Эти землетрясения вызваны, вероятно, техногенной деятельностью (подработка месторождения, сосредоточенная на дневной поверхности крупнотоннажных галитовых отвалов, шламов и водохранилища), оказывающей влияние на изменение геодинамического режима территории. Скорее всего, активные движения земной коры, ее ландшафт и местные землетрясения причинно связаны между собой. Поэтому на территории промышленного района можно ожидать землетрясения более высокого энергетического класса, кото-

рые предваряются в настоящее время форшоками интенсивностью до 5 баллов. Аналогичный прогноз для данного региона был сделан другими исследователями [5–7].

Проседание земной поверхности по существующей системе разломов в результате подработки месторождения достигает 4–5 м. В случаях больших проседаний земной поверхности имеется опасность прорыва плотины Солигорского водохранилища, построенной для асейсмичной зоны [8]. В связи с этим целесообразно на современном этапе произвести ревизию сейсмичных условий ранее построенных объектов повышенной ответственности для определения их сейсмичности в свете новых данных о местных землетрясениях [9]. Подъем активности местных землетрясений наблюдается в осенний и весенний периоды. Поэтому здесь можно ожидать также землетрясения интенсивностью до 5 и более баллов. Аналогичный прогноз для данного региона был сделан другими исследователями [5, 6].

Эффективность картографической экстраполяции возрастает при комплексном использовании разных методов. Особое значение имеет взаимодействие картографического и дистанционного методов. Совместный анализ карт и фотоснимков, полученных с разных высот и в различных диапазонах, способствует прогнозу общих глобальных, региональных или локальных закономерностей. Пример тому можно найти в любой отрасли знаний, где совместно используются карты и снимки, но особенно показательны в этом отношении геолого-геоморфологические исследования [10]. Для прогноза неотектонического строения территории в зоне сочленения Микашевичского выступа кристаллического фундамента и Туровской депрессии в Белорусском Полесье использовались карта базисной поверхности, скрытого и явного остаточного рельефа и результаты структурного дешифрирования аэроснимков (рис. 2).

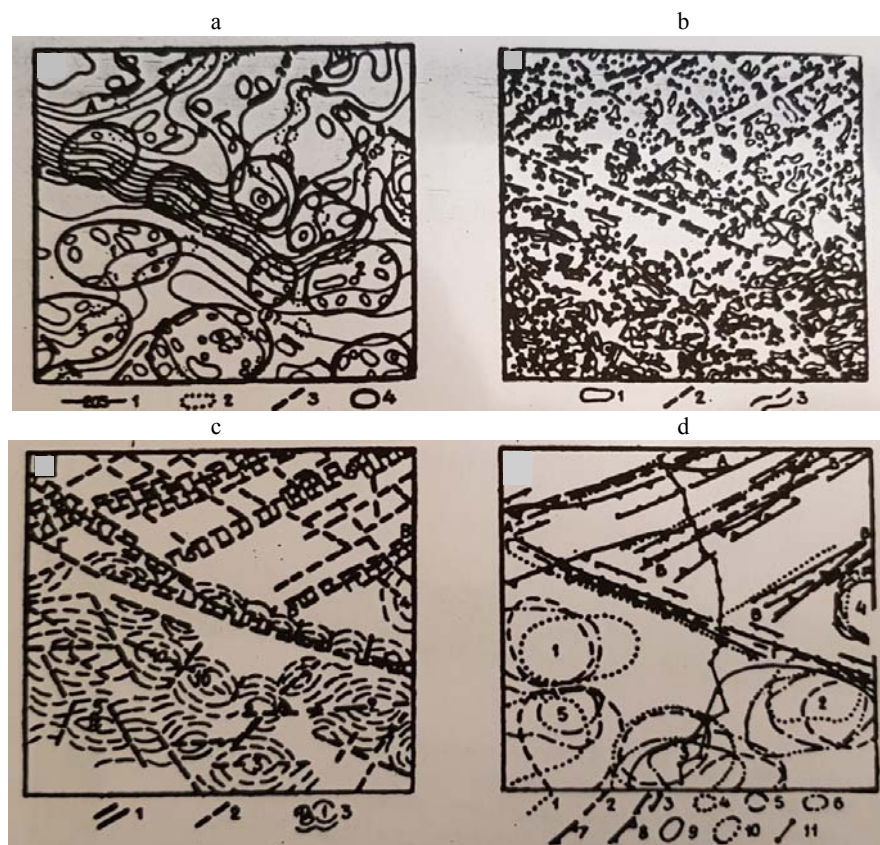


Рис. 2. Использование морфометрических данных и результатов структурного дешифрирования аэрофотоматериалов при изучении неотектоники в районе сочленения Микашевичского выступа кристаллического фундамента и Туровской депрессии в Белорусском Полесье

Fig. 2. Use of morphometric data and results of structural decoding of aerial photographic material in the study of neo-tectonics in the area of junction of the Mikashevich ledge of the crystalline basement and the Turov depression in the Belarusian Polesie

Системный подход к анализу рельефа и ландшафта по картам и материалам дешифрирования позволяет выявить закономерную систему структурных линий, отражающихся в распределении остаточных высот, отрицательных форм рельефа, в особенностях почвенного и растительного покровов, связанных с разрывными и складчатыми структурами. Для дизъюнктивных нарушений характерны прерывистые прямые контуры, а для пликативных деформаций – совокупность дугообразных линий. Применение указанных принципов позволило прогнозировать разломы значительных амплитуд, локальные разрывные нарушения, поднятия и блоки.

Прогнозная схема Г (рис. 2) дает хорошее совпадение выявленных структур с геолого-геофизическими данными. Например, наблюдается полное совмещение с глубинным разломом А, окаймляющим с севера Туровскую депрессию. По поверхности фундамента этой зоне соответствует сброс амплитудой около 50 м. Локальные поднятия в юго-восточной части территории совпадают в плане с фаменскими верхнесолевыми поднятиями, ограниченными изогипсами опорного электрического горизонта.

Данный пример хорошо иллюстрирует эффективность прогнозирования по аналогии. Закономерности, выявленные в ходе картографического анализа и подтвержденные геолого-геофизическими данными, экстраполируются в дальнейшем за пределы изученной территории с целью прогноза ее структурных особенностей и связанных с ними полезных ископаемых [11].

Обозначения на рис. 2: а – карта базисной поверхности и скрытого остаточного рельефа 3-го порядка: 1 – изобазиты; 2 – остаточный рельеф; 3 – предполагаемые разрывные нарушения; 4 – предполагаемые локальные поднятия; б – карта явного остаточного рельефа: 1 – остаточный рельеф; 2 – предполагаемые разрывные нарушения; 3 – предполагаемые пликативные деформации; с – карта результатов структурного дешифрирования: 1 – предполагаемые зоны разломов; 2 – локальные разрывные нарушения; 3 – предполагаемые локальные поднятия; д – прогнозная схема неотектонических структур.

Прогнозируемые структурные элементы, выявляемые по картам: 1 – базисной поверхности; 2 – явного остаточного рельефа; 3 – структурного дешифрирования. Прогнозируемые локальные поднятия, выявляемые по картам: 4 – базисной поверхности; 5 – явного остаточного рельефа; 6 – структурного дешифрирования. Геолого-геофизические данные: 7 – глубинные разломы; 8 – разломы в неоген-четвертичной толще; 9 – изогипсы опорного электрического горизонта по поверхности фаменских соленосных отложений; 10 – локальные поднятия, установленные по карте мощности четвертичных отложений; 11 – линия геологического профиля.

ВЫВОДЫ

1. Метод экстраполяции может стать очень эффективным в комплексе других методов, используемых для составления прогнозов.

2. Опыт показывает, что с формальной точки зрения нет принципиальной разницы между прогнозом во времени и в пространстве.

3. Использование единой методики взаимно усиливает оба варианта прогноза.

4. На примере картографического экстраполирования ясно видно, что перспективное изучение явлений невозможно без их ретроспективного анализа.

5. Для успешного применения картографической экстраполяции необходимо наличие возможно более длинных серий карт, отражающих прошлые состояния явления или смену ситуаций в пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

- Берлянт, А. М. Картографический метод исследования / А. М. Берлянт. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1978. 257 с.
- Михайлов, В. И. Картографическая экстраполяция – способ прогнозирования явлений и процессов / В. И. Михайлов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2006. Т. 1. С. 410–412.
- Хотько, Ж. П. Глубинное строение территории Белоруссии и Прибалтики по данным геофизики / Ж. П. Хотько. Минск: Наука и техника, 1974. 91 с.
- Авотиня, И. Я. Каталог исторических землетрясений Белоруссии и Прибалтики / И. Я. Авотиня, А. М. Боборыкин, А. П. Емельянов // Сейсмический бюллетень станций «Минск» (Плещеницы) и «Нарочь» за 1983 г. Минск, 1988. С. 126–137.

5. Гарецкий, Р. Г. Оценка возможных сейсмических воздействий сильных землетрясений Прибалтики и Белоруссии в связи с сооружением и эксплуатацией особо ответственных объектов / Р. Г. Гарецкий, А. М. Боборыкин, А. П. Емельянов // Проблемы экологической геологии в Прибалтике и Белоруссии. Вильнюс, 1990. С. 41–43.
6. Аронова, Т. И. Особенности проявления сейсмических процессов на территории Беларуси / Т. И. Аронова // Литасфера. 2006. № 2. С. 103–110.
7. Шароглазова, Г. А. Проектирование геодинамических исследований в районах взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов на состояние земной коры / Г. А. Шароглазова // Вестник Полотского государственного университета. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. 2012. № 8. С. 166–171.
8. Михайлов, В. И. Анализ карт современных вертикальных движений земной коры Беларуси для целей строительства и эксплуатации инженерных сооружений / В. И. Михайлов // Бюллетень Белорусской горной академии. 2001. Т. 5, № 1. С. 50–53.
9. Михайлов, В. И. Изучение землетрясений в Беларуси в связи со строительством и эксплуатацией инженерных сооружений / В. И. Михайлов // Вестник Белорусского национального технического университета. 2007. № 6. С. 50–53.
10. Михайлов, В. И. Картографо-аэрокосмический метод изучения новейшей тектоники при прогнозе бурогольных залежей / В. И. Михайлов, В. Н. Губин // Разведка и охрана недр. 1989. № 4. С. 31–37.
11. Михайлов, В. И. Изучение техногенных просадок в Солигорском промышленном районе аэрокосмическим и геодезическим методами / В. И. Михайлов, Е. Ю. Мысливчик, А. В. Кабацкий // Геоматика: образование, теория и практика: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию каф. геодезии и космоаэрокартографии и 85-летию фак. географии и геоинформатики БГУ. Минск: БГУ, 2019. С. 9–12.

Поступила 10.02.2020

Подписана в печать 14.04.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Berlyant A. M. (1978) *Cartographic Research Method*. Moscow, Publishing House of Moscow State University. 257 (in Russian).
2. Mikhailov V. I. (2006) Cartographic Extrapolation – a Way of Forecasting Phenomena and Processes. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy 3-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 3th International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 410–412 (in Russian).

3. Khotko Zh. P. (1974) Deep Structure of the Territory of Belarus and the Baltic States According to Geophysical Data. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 91 (in Russian).
4. Avotinya I. Ya., Boborykin A. M., Emelyanov A. P. (1988) Catalog of Historical Earthquakes in Belarus and the Baltic States. *Seismic Bulletin of Stations “Minsk” (Pleschenitsy) and “Naroch” for 1983*. Minsk, 126–137 (in Russian).
5. Garetsky R. G., Boborykin A. M., Emelyanov A. P. (1990) Assessment of Possible Seismic Impacts of Strong Earthquakes in the Baltic States and Belarus in Connection with the Construction and Operation of Particularly Critical Facilities. *Problems of Ecological Geology in the Baltics and Belarus*. Vilnius, 41–43 (in Russian).
6. Aronova T. I. (2006) Specific Features in Manifestation of Seismic Processes in Belarus. *Litasfera [Lithosphere]*, (2), 103–110 (in Russian).
7. Sharoglazova G. A. (2012) Design of Geodynamic Studies in the Areas of the Interdependent Influence of Tectonic and Technogenic Factors on the State of the Earth’s Crust. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya F. Prikladnye Nauki. Stroitel'stvo = Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, (8), 166–171 (in Russian).
8. Mikhailov V. I. (2001) Analysis of Maps for Modern Vertical Movements of the Earth’s Crust in Belarus for Construction and Operation of Engineering Structures. *Byulleten' Belorusskoi Gornoj Akademii* [Bulletin of the Belarusian Mining Academy], 5 (1), 50–53 (in Russian).
9. Mikhailov V. I. (2007) Study of Earthquakes in Belarus in Connection with the Construction and Operation of Engineering Structures. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (6), 50–53 (in Russian).
10. Mikhailov V. I., Gubin V. N. (1989) Cartographic and Aerospace Method for Studying the Latest Tectonics in Forecasting Brown Coal Deposits. *Razvedka i Okhrana Nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*, (4), 31–37 (in Russian).
11. Mikhailov V. I., Myslivchik E. Yu., Kabatsky A. V. (2019) Study of Technogenic Subsidence in the Soligorsk Industrial Region by Aerospace and Geodetic Methods. *Geomatika: Obrazovanie, Teoriya i Praktika: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Posvyashch. 50-letiyu Kaf. Geodezii i Kosmoaerokartografii i 85-letiyu Fak. Geografii i Geoinformatiki BGU* [Geomatics: Education, Theory and Practice: Proceedings of International Scientific and Practical Conference Dedicated to 50th Anniversary of Geodesy and Aerospace Cartography Department and 85th Anniversary of Geography and Geo-Informatics Faculty of Belarusian State University]. Minsk, Publishing House of Belarusian State University, 9–12 (in Russian).

Received: 10.02.2020

Accepted: 14.04.2020

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-413-420>

УДК 69.057

Конструкция одноуровневого станционного комплекса для применения технологии сквозной проходки

Асп. А. О. Коликов¹⁾, докт. техн. наук, проф. Г. П. Пастушков¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Метрополитен оказывает огромное влияние на развитие городской транспортной инфраструктуры. Необходимость увеличения эффективности пассажирских перевозок вызвана стремительным ростом пассажирооборота, а также увеличением расстояния от окраин города до центра. В связи с необходимостью развития сети метрополитена в Минске, которая подтверждается исследованиями в области пассажиропотоков основных направлений города, приобретен механизированный тоннелепроходческий щит CSM Bessac, позволяющий значительно увеличить скорость проходки перегонных тоннелей. Использование механизированного тоннелепроходческого комплекса в традиционной концепции строительства метрополитена, при которой проходка перегонных тоннелей осуществляется после сооружения станционного комплекса, не позволяет применять щит с максимальной экономической эффективностью ввиду небольшой протяженности перегонных тоннелей, необходимости сооружения монтажно-щитовых камер и проведения работ по разборке и сборке щита. В условиях использования механизированного тоннелепроходческого щитового комплекса актуально применение новой концепции, разработанной Ю. С. Фроловым и получившей название сквозной проходки. Суть ее заключается в непрерывной проходке перегонных тоннелей на пусковом участке строящейся линии и последовательном сооружении каждого станционного комплекса по мере продвижения через него проходческих щитов. Для реализации концепции сквозной проходки актуально применение полужакрытого способа строительства, при котором конструкция перекрытия сооружается открытым способом, а остальные элементы – закрытым. Проанализированы имеющиеся решения станций метрополитена полужакрытого способа работ. Произведены детальный анализ с учетом адаптации к условиям строительства в Минске и разработка конструктивных элементов и узлов платформенного участка станции, представляющего собой двухконсольный свод с развитой ригельной частью, опирающийся на сваи-колонны круглого сечения. Усилия от разомкнутого кольца гибкой обделки путевых тоннелей воспринимаются консольной частью свода и лотковой плитой. Рассмотрены конструкция станции метрополитена, основные ее элементы, их назначения и специфика работы, а также вопросы оптимизации и результаты технико-экономического обоснования конструкции.

Ключевые слова: метрополитен, проходческий щит, сквозная проходка, станция мелкого заложения, строительство, оптимизация, технико-экономическое обоснование

Для цитирования: Коликов, А. О. Конструкция одноуровневого станционного комплекса для применения технологии сквозной проходки / А. О. Коликов, Г. П. Пастушков // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 413–420. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-413-420>

Single-Level Station Complex Structure for Application of Through Driving Construction Method

A. O. Kolikov¹⁾, G. P. Pastushkov¹⁾

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

Abstract. Metro Service has a huge impact on the development of urban transport infrastructure. The need to increase the efficiency of passenger transportation is caused by the rapid growth in passenger turnover as well as an increase in the distance from the outskirts of the city to the center. In connection with the need to develop a metro service network in Minsk city, which is confirmed by research in the area of passenger traffic in the main areas of the city, the CSM Bessac tunnel boring machine was purchased, which allows significantly to increase the speed of tunnel driving. The use of a mechanized tunnel boring machine in the traditional concept of the metro network construction, in which driving of tunnels is carried out after construction of stations, does not allow to use a shield with maximum economic efficiency due to the small extent of tunnels. There is also a need to build assembly-shield chambers and carry out works on disassembling and assembling the shield.

Адрес для переписки

Пастушков Геннадий Павлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 146а,
220014, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-95-97
mit_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Pastushkov Gennady P.
Belarusian National Technical University
146a, Nezavisimosty Ave.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-95-97
mit_ftk@bntu.by

The application of the new concept developed by Yu. S. Frolov and called “through driving” is actual in the conditions of the use of a mechanized tunnel boring machine. Its essence lies in the continuous driving of tunnels on the line section under construction and the consecutive construction of each station complex as the tunnel boring machine passes through it. To implement the concept of “through driving”, it is relevant to use a semi-closed construction method, in which the floor structure is constructed in an open way, and the other elements are closed. The available solutions of the metro stations constructed while using a semi-closed method of work have been analyzed in the paper. A detailed analysis has been carried out with due account of the adaptation to the construction conditions in Minsk, and the development of structural elements and assemblies of the platform area of the station, which is a two-cantilever vault with a developed transom part, resting on pile-columns of a circular cross section. Forces from the open ring of flexible tunnels lining are supported by a cantilever part of an arch and a bottom plate. The paper considers a design of a metro station, its main elements, their purpose and specificity of work, as well as optimization issues and the results of the design feasibility study.

Keywords: metro, tunnel boring machine, through driving, shallow metro station, construction process, optimization, feasibility study

For citation: Kolikov A. O., Pastushkov G. P. (2020) Single-Level Station Complex Structure for Application of Through Driving Construction Method. *Science and Technique*. 19 (5). 413–420. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-413-420> (in Russian)

Объемно-планировочные решения

Концепция сквозной проходки, разработанная Ю. С. Фроловым [1], представляет большой интерес для строительства Минского метрополитена в связи с приобретением механизированного тоннелепроходческого щитового комплекса CSM Bessac. Суть концепции заключается в непрерывной (сквозной) проходке перегонных тоннелей на всем протяжении пускового участка строящейся линии (3–4 км) и последовательном сооружении каждого станционного комплекса по мере продвижения через него проходческих щитов. Работы по сооружению всех станций на новом пусковом участке выполняет одно специализированное подразделение. К строительству очередной станции приступают только после того, как перегонные щитовые комплексы пройдут часть трассы в пределах этой станции [2].

В результате анализа известных конструктивных решений [1–5] для применения концепции сквозной проходки была произведена детальная разработка элементов и узлов варианта станции с двухконсольным железобетонным монолитным сводом, опирающимся на сталежелезобетонные сваи-колонны круглого сечения.

Станционный комплекс включает вестибюли, входы и выходы из них, платформенный участок, служебные помещения, а также все необходимые для эксплуатации сооружения в соответствии с нормативной документацией [6–8]. Вид станционного комплекса в плане приведен на рис. 1.

В состав каждого вестибюльного блока входят кассовый зал с двумя кассами, пассажирские лифты, служебные помещения и другие вспомогательные элементы. Общий вид вестибюлей представлен на рис. 2.

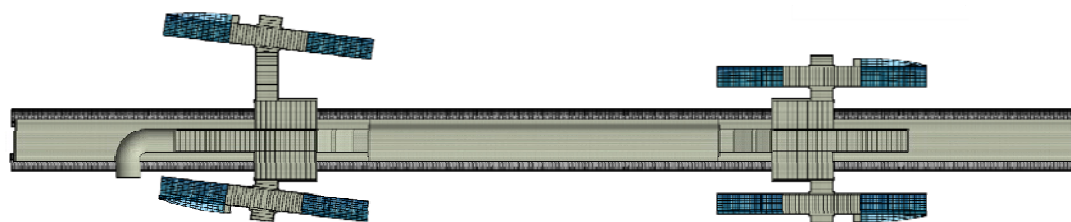


Рис. 1. Станционный комплекс

Fig. 1. Station complex

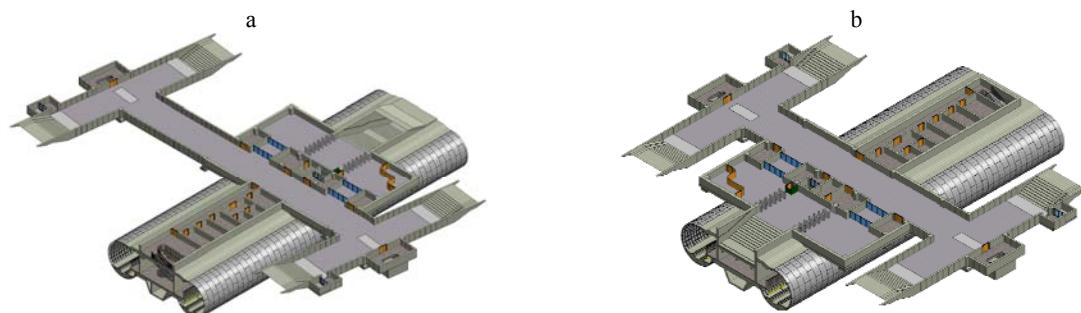


Рис. 2. Вестибюль 1 (а), вестибюль 2 (б)

Fig. 2. Lobby 1 (a), lobby 2 (b)

Кассовый зал связан с платформой лестничным сходом. Вестибюли примыкают к пешеходным тоннелям, объединяющим входы и выходы на поверхность. К пешеходным тоннелям примыкают блоки служебных помещений. Разрезы станции по вестибюлям приведены на рис. 3.

Платформенный участок предусмотрен в данном варианте с размерами, необходимыми для обеспечения пропускной способности промежуточной станции в центральных районах города. К платформенному участку примыкают служебные проходы путевых тоннелей, связывающие служебные помещения, пассажирские лифты и платформенный зал. На платформенном участке располагаются два ряда колонн с шагом 6 м и пролетом 6 м. Высота по центру зала составляет 5,0 м, минимальная высота прохода по станции 2,8 м. Общий вид и разрез платформенного участка представлены на рис. 4.

Для разделения пассажирской зоны и путевых тоннелей на станции предложено поли-

карбонатное платформенное ограждение с автоматическими дверями. В конструкции платформенного участка предусмотрен технологический проход. Станционный комплекс имеет служебные помещения, размещенные в уровне как платформы, так и вестибюлей. Путевые служебные проходы имеют перильное ограждение.

Вдоль служебных помещений пролегают вентиляционные каналы, обеспечивающие продольную вентиляцию платформенного участка. В конструкции предусмотрен лестничный спуск в технологический проход под платформенным залом. Общий вид и разрез служебных помещений показаны на рис. 5.

Конструкция противодутьевых сбоек сходна с конструкцией платформенного участка. К ним также примыкают путевые служебные проходы, оборудованные перильным ограждением. Конструкции перекрытия и лотковой плиты выполнены плоскими с развитой ригельной частью. Общий вид и разрез противодутьевой сбоек приведены на рис. 6.

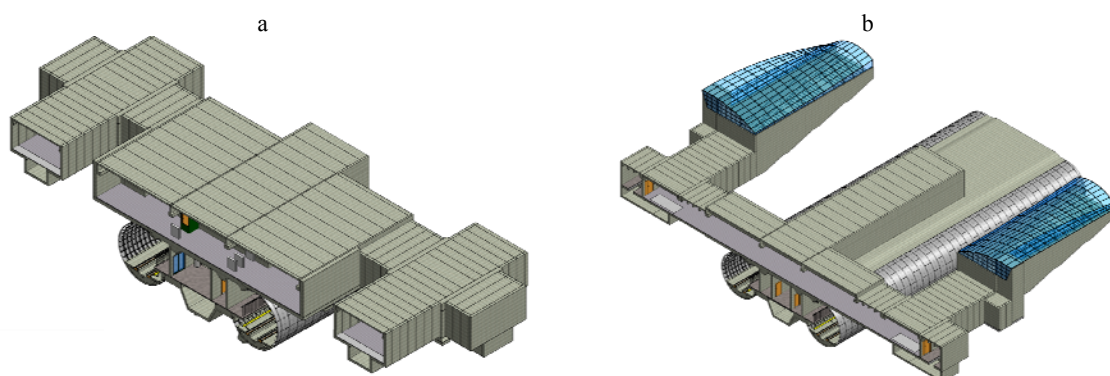


Рис. 3. Разрезы станции по вестибюлю 2 (а) и по пешеходному тоннелю у вестибюля 2 (б)

Fig. 3. Stations section along the lobby 2 (a) and pedestrian tunnel at the lobby 2 (b)

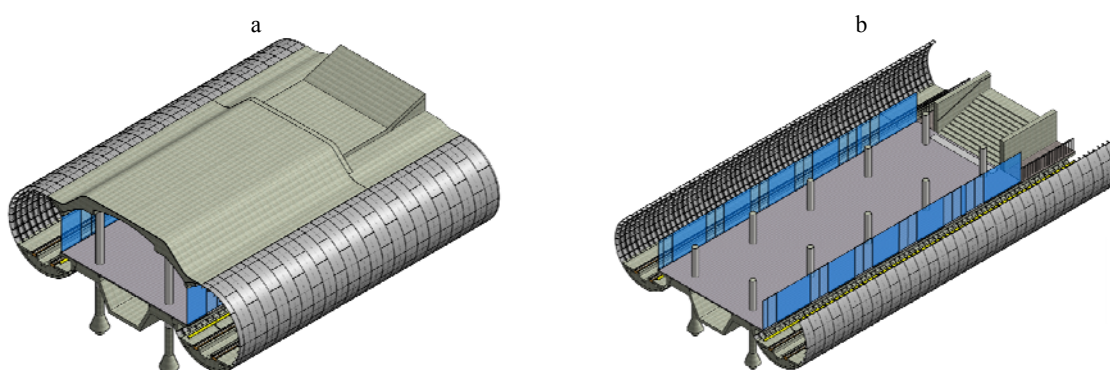


Рис. 4. Платформенный участок (а) и разрез платформенного участка (б)

Fig. 4. Platform area (a) and platform area section (b)

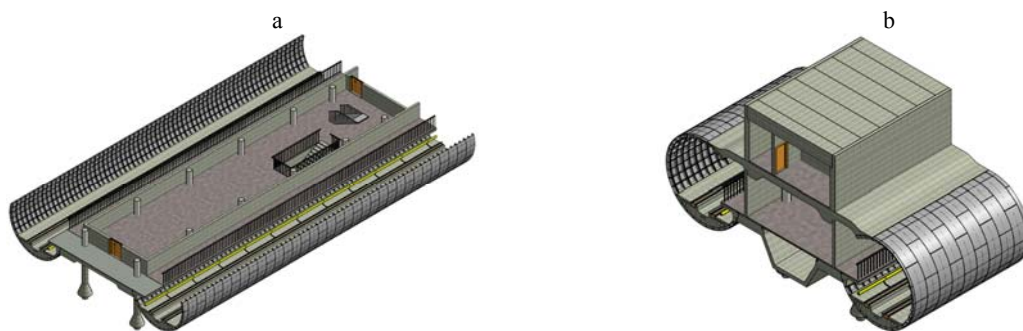


Рис. 5. Служебные помещения (а) и разрез по служебным помещениям в уровне вестибюлей (b)

Fig. 5. Service premises (a) and section of service areas at the lobby level (b)

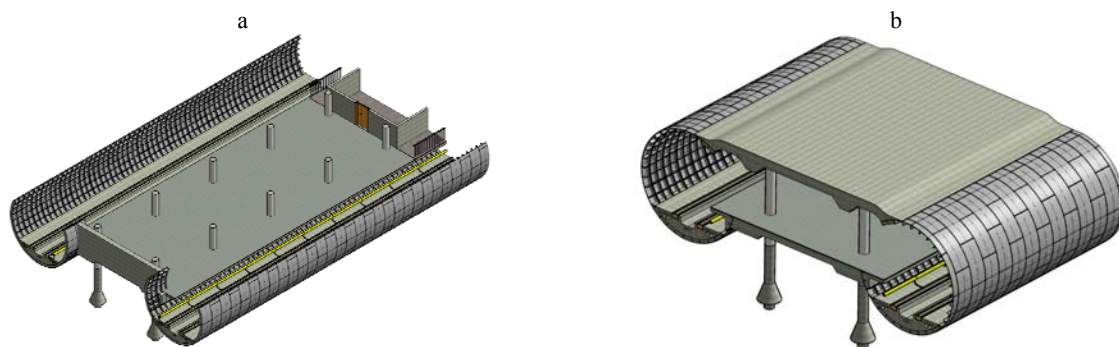


Рис. 6. Противодутьевая сбойка (а) и разрез по противодутьевой сбойке (b)

Fig. 6. Anti-blowing area (a) and anti-blowing area section (b)

Конструктивные решения

Конструкция платформенного участка (рис. 7) включает в себя чугунную тубинговую обделку путевых тоннелей, сталежелезобетонные сваи-колонны, монолитный свод, монолитную лотковую плиту, платформенные плиты, монолитные участки, платформенное ограждение и проч.

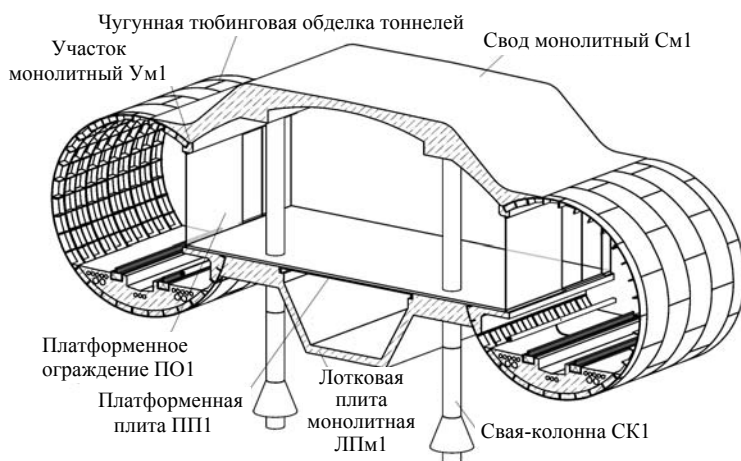


Рис. 7. Конструкция платформенного участка

Fig. 7. Platform area design

За счет повышенной жесткости конструкции свода изгибающий момент в чугунной

тубинговой обделке путевых тоннелей существенно снижается. Продольные и поперечные усилия, приходящиеся от обделки тоннелей, воспринимаются сводом и лотковой плитой.

Нагрузки в лотковой плите возникают вследствие передачи усилия от обделки путевых тоннелей после разборки временных тубингов на последних стадиях строительства. Также лотковая монолитная плита участвует в статической работе конструкции на временную нагрузку. Горизонтально направленное усилие от обделки воспринимается лотковой плитой за счет развитой ригельной части, опирающейся на сваи-колонны. Таким образом, напряжения в части конструкции лотковой плиты, находящейся в месте служебного прохода под платформенными плитами, относительно небольшие, что позволило уменьшить толщину плиты до 250 мм. Объединение лотковой плиты и обделки путевых тоннелей осуществляется при помощи арматурных стержней, пропущенных через отверстия в тубингах.

Выполнение свай-колонн в сталежелезобетонном варианте позволило повысить несущую способность колонны в пре-

делах платформенного зала и упростить технологию производства работ. Нижняя часть свай-колонны представляет собой железобетонную буронабивную сваю с уширением.

Для восприятия нагрузки в продольном направлении монолитный свод имеет развитую ригельную часть. В связи с тем, что деформации свода в вертикальном направлении ведут к увеличению нагрузки в тубинговой обделке, расчет в стадии строительства и эксплуатации производился в упругой стадии работы железобетонной конструкции без перераспределения усилий, что связано с необходимостью обеспечения жесткости конструкции свода и недопущения деформаций, связанных с образованием пластических шарниров.

Обделка путевых тоннелей объединяется в жесткий узел со сводом при помощи изготовленных по эскизу арматурных стержней (с приваренными стальными упорами), пропущенных через отверстия в ключевых тубингах.

Конструкция вестибюлей и служебных помещений в уровне платформы приведена на рис. 8.

Станция в пределах вестибюлей представляет собой двухуровневую конструкцию. Так же, как и в пределах платформенного участка, усилия от тубинговой обделки путевых тоннелей передаются на монолитное перекрытие и монолитную лотковую плиту. Нагрузка от веса вышележащих конструкций, а также от собственного веса перекрытия, в значительной степени воспринимается сваями-колоннами.

Конструкция вестибюлей включает монолитные лоток и стены, фундаменты, колонны, моно-

литные ригели и сборное балочное перекрытие. В поперечном направлении конструкция состоит из трех пролетов. Нагрузка от центрального пролета передается на монолитное перекрытие нижнего уровня станции, а от крайних пролетов – через ригели и колонны на фундаменты, расположенные на расстоянии от путевых тоннелей для исключения передачи нагрузки на конструкцию обделки путевых тоннелей.

Служебные помещения верхнего уровня опираются на монолитное перекрытие, которое передает нагрузку непосредственно на свай-колонны. Конструкция служебных помещений выполнена сборно-монолитной: сборное балочное перекрытие опирается на монолитные стены толщиной 400 мм.

В служебных проходах, находящихся в уровне платформенного участка, нагрузка от путевых тоннелей передается на монолитное перекрытие и на монолитную лотковую плиту. По обе стороны от тягово-понижительной подстанции (рис. 9) предусмотрены служебные проходы в путевых тоннелях, которые для обеспечения требований безопасности оборудованы перильным ограждением.

Конструкция противодутьевой сбойки (рис. 10) состоит из чугунной тубинговой обделки путевых тоннелей, сталежелезобетонных свай-колонн, монолитного перекрытия и монолитной лотковой плиты. В связи с отсутствием необходимости в служебном проходе лотковая плита выполнена плоской с развитой ригельной частью. Перекрытие также выполнено плоским.

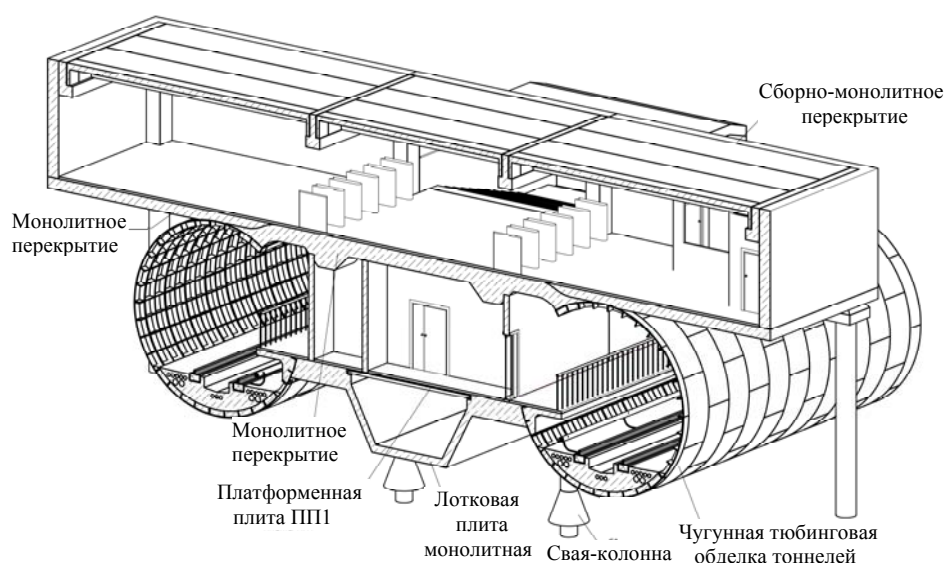


Рис. 8. Конструкция вестибюлей и служебных помещений в уровне платформы

Fig. 8. Design of platform-level lobbies and service premises

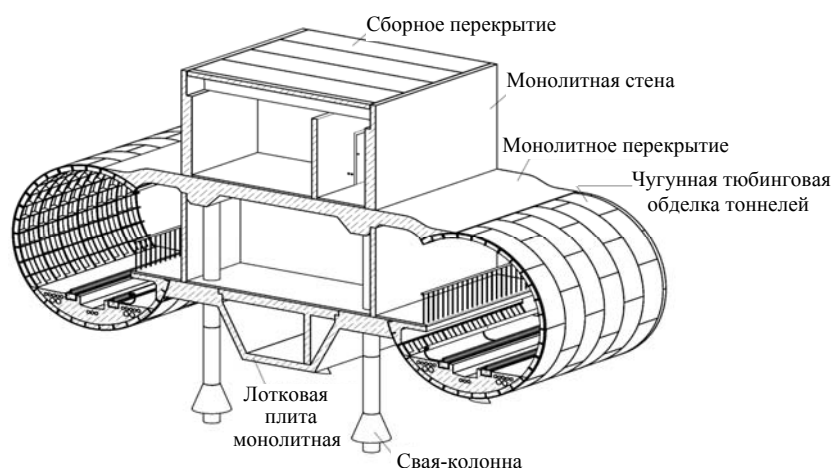


Рис. 9. Конструкция тягово-понижительной подстанции и служебных помещений в уровне вестибюлей

Fig. 9. Design of traction-step-down substation and service premises in the lobby level

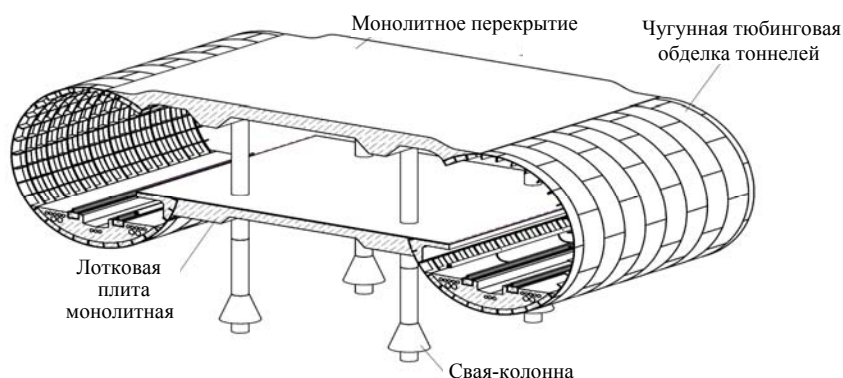


Рис. 10. Конструкция противодутьевой сбойки

Fig. 10. Design of anti-blowing area

Оптимизация

В процессе разработки большое внимание уделялось оптимизации конструкции станционного комплекса. По мнению Ю. С. Фролова, наиболее ответственным участком конструкции в отношении ее статической работы является консольная часть перекрытия. Под действием нагрузки от разомкнутого кольца обделки путевого тоннеля в ней возникает значительная растягивающая продольная сила. Величина этой силы с изменением параметров конструкции колеблется в широком диапазоне значений, вплоть до изменения направления действия от растяжения к сжатию [1].

В процессе оптимизации конструкции станции исследован ряд вариантов с различными параметрами. Расчет выполняли с применением метода конечных элементов. В качестве функциональных ограничений принимали диаметр

обделки путевых тоннелей, шаг колонн и пролет перекрытия, в качестве варьируемых параметров – конструкции свода и лотковой плиты, сваи-колонны, сечение обделки путевых тоннелей, материалы, конструктивные особенности узлов.

За счет выбора расстояния между осями путевых тоннелей и формы конструкции свода растягивающие напряжения в консольной части перекрытия были сведены к минимуму. Эпюра продольных сил N приведена на рис. 11. Следует отметить, что на статическую работу конструкции оказало влияние изменение диаметра обделки путевых тоннелей, так как диаметр обделки для механизированного тоннелепроходческого щита CSM Bessac составляет 6000 мм.

В связи с тем, что напряжения в консольной части свода сведены к минимуму, в рассматриваемой конструкции станционного комплекса самой ответственной частью является обделка путевых тоннелей.

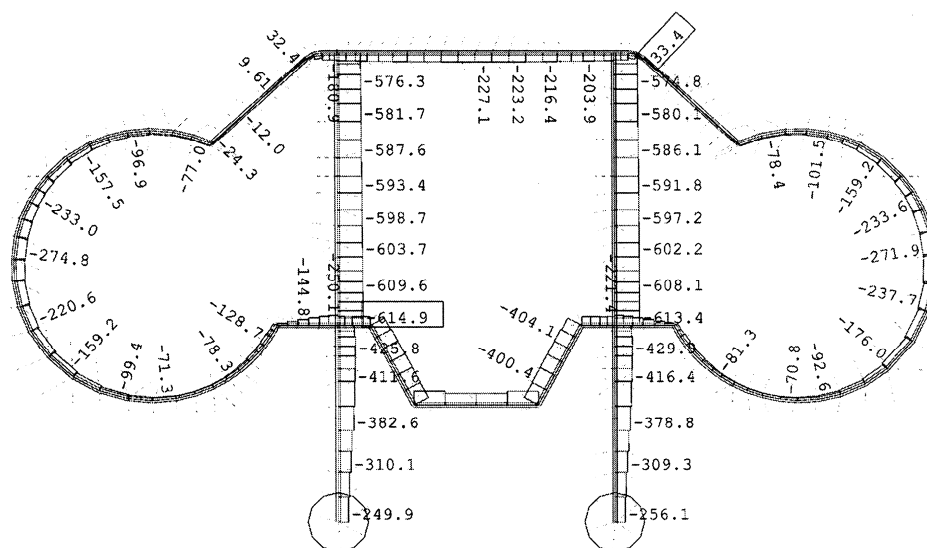


Рис. 11. Эпюра N , кН, на стадии эксплуатации при нагрузке А-14

Fig. 11. Diagram N , kN, at the stage of operation under load A-14

Напряженно-деформированное состояние обделки в значительной степени зависит от жесткости конструкции свода и от конструкции узла опирания на сваи-колонны, поэтому в качестве проверки проводили расчет конструкции с шарнирным опиранием.

Технико-экономическое обоснование

Технико-экономическое обоснование проводилось с целью показать эффективность новой концепции строительства метрополитена в сравнении с традиционной как в плане уменьшения стоимости, так и в плане сокращения сроков строительных работ (рис. 12).

В структуру проведения технико-экономического обоснования входят оценка стоимости и продолжительности строительства линии метрополитена с применением традиционной технологии и технологии сквозной проходки.

Для оценки стоимости строительства линии метрополитена необходимо учесть стоимость сооружения станционных комплексов, перегонных тоннелей, стоимость строительства монтажно-щитовых камер, затраты на сборку и разборку щита и подготовительные работы. Для оценки использовалась линия метрополитена, состоящая из 15 станций. В результате сравнения получено 16 % уменьшения стоимости при использовании новой концепции строительства.

Продолжительность строительства линии метрополитена оценивается исходя из продолжительности сооружения станций, монтажно-щитовых камер, продолжительности проходки тоннелей, а также сборки и разборки тоннелепроходческого щита. С учетом поточного способа организации работ [9, 10] и одновременного сооружения трех станций продолжительность строительства линии метрополитена с применением концепции сквозной проходки составила на 33 % меньше продолжительности строительства при использовании традиционной технологии.



Рис. 12. Структура проведения технико-экономического обоснования

Fig. 12. Structure of feasibility study

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы имеющиеся решения станций метрополитена полузакрытого способа

работ и разработаны конструктивные элементы и узлы платформенного участка станции для применения сквозной проходки в Минске. Основное внимание уделено разработке конструкции платформенного участка – наиболее ответственной части станционного комплекса – с учетом технологических, конструктивных, архитектурных и других требований [11, 12].

2. Большое внимание уделено вопросу оптимизации железобетонных конструкций станционного комплекса, в частности оптимизации конструкций монолитного свода и лотковой плиты.

3. Важным разделом работы является технико-экономическое обоснование строительства с применением концепции сквозной проходки. Показаны преимущества технологии сквозной проходки как в плане уменьшения стоимости, так и сокращения сроков строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов, Ю. С. Метрополитены на линиях мелкого заложения: новая концепция строительства / Ю. С. Фролов, Ю. Е. Крук. М.: ТИМП, 1994. 244 с.
2. Фролов, Ю. С. Основы проектирования и строительства метрополитена методом сквозной проходки на линиях метрополитена / Ю. С. Фролов. СПб.: Петербургский ун-т путей сообщения, 1995. 45 с.
3. Проектирование тоннелей, сооружаемых горным способом / Г. П. Пастушков [и др.]. Минск: БНТУ, 2005. 187 с.
4. Кузьмицкий, В. А. Проектирование тоннелей, сооружаемых щитовым способом / В. А. Кузьмицкий, В. Г. Пастушков. Минск: БНТУ, 2009. 187 с.
5. Тоннели и метрополитены / В. П. Волков [и др.]. М.: Транспорт, 1975. 551 с.
6. Метрополитены. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-115–2008 (02250). Введ. 01.07.2009. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 64 с.
7. Тоннели и метрополитены. Правила устройства: ТКП 45-3.03-238–2011 (02250). Введ. 01.11.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 156 с.
8. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-227–2010 (02250). Введ. 01.07.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 49 с.
9. Безопасность труда в строительстве. Общие требования: ТКП 45-1.03-40–2006 (02250). Введ. 01.07.2007. Минск: Минстройархитектуры, 2007. 58 с.
10. Нормы продолжительности строительства объектов транспорта и транспортной инфраструктуры: ТКП 45-1.03-213–2010 (02250). Введ. 01.01.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2014. 52 с.

11. Защита от шума. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-154–2009 (02250). Введ. 01.01.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 50 с.
12. Организация строительного производства: ТКП 45-1.03-161–2009* (02250). Введ. 01.05.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2014. 51 с.

Поступила 24.03.2020

Подписана в печать 02.06.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Frolov Yu. S., Kruk Yu. E. (1994) *Subways on Shallow Lines: a New Construction Concept*. Moscow, TIMP Publ. 244 (in Russian).
2. Frolov Yu. S. (1995) *Fundamentals of the Design and Construction of the Subway by Through-Penetration Method on Subway Lines*. Saint-Petersburg, Publishing House of Petersburg State Transport University. 45 (in Russian).
3. Pastushkov G. P., Pastushkov V. G., Ollyak V. Yu., Kuz'mitskii V. A., Kuz'mitskii D. V. (2005) *Design of Tunnels Constructed by Mining Method*. Minsk, Belarusian National Technical University. 187 (in Russian).
4. Kuz'mitskii V. A., Pastushkov V. G. (2009) *Shield Tunnel Design*. Minsk, Belarusian National Technical University. 187 (in Russian).
5. Volkov V. P., Naumov S. N., Pirozhkova A. N., Khrapov V. G. (1975) *Tunnels and Subways*. Moscow, Transport Publ. 551 (in Russian).
6. ТКП 45-3.03-115–2008 (02250) *Subways. Structural Design Codes*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2009. 64 (in Russian).
7. ТКП 45-3.03-238–2011 (02250). *Tunnels and Subways. Device Rules*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2011. 156 (in Russian).
8. ТКП 45-3.03-227–2010 (02250). *Streets of Settlements. Structural Design Codes*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2011. 49 (in Russian).
9. ТКП 45-1.03-40–2006 (02250). *Labour Safety in Construction. General Requirements*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2007. 58 (in Russian).
10. ТКП 45-1.03-213–2010 (02250). *Standards for Duration of Construction of Transport Facilities and Transport Infrastructure*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2014. 52 (in Russian).
11. ТКП 45-2.04-154–2009 (02250). *Noise Protection. Structural Design Codes*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2009. 50 (in Russian).
12. ТКП 45-1.03-161–2009* (02250). *Organization of Construction Production*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2014. 51 (in Russian).

Received: 24.03.2020

Accepted: 02.06.2020

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-421-427>

UDC 004.42:81'33

Electronic Lexicography: Traditional and Modern Approaches

M. V. Makarych¹⁾, Yu. B. Popova¹⁾, M. O. Shved²⁾

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

²⁾EPAM Systems, Inc. (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. Nowadays there are a lot of modern technologies in electronic lexicography: speech synthesis technology, cross-referencing between dictionary modules, spell-checking functions, etc. The increasing availability of online information has necessitated intensive research in the area of automatic text summarization within the Natural Language Processing community. Belarusian scientists are also interested in this sphere and new lexicographical approaches for creating a linguistic database are shown in the paper. The authors present English-Belarusian-Russian electronic dictionary TechLex. This is the project of the 2nd English Department and the Department of Software for Information Systems and Technologies of the Belarusian National Technical University. The linguistic database of the dictionary is compiled not by the traditional method of processing a large number of paper dictionaries and combining the received translations, but by sequential processing of scientific and technical English-language periodicals. While the designing the dictionary the authors have taken into account the analysis of modern electronic multilingual translation dictionaries and created a client-server application in the Java programming language. The client part of the system contains a mobile application for the Android operating system, which has been tested on tablets and smartphones with different screen diagonals. The interface of the TechLex dictionary is designed taking into account the possibility of adding new subject areas and filling them with appropriate lexical material. The main advantage of our dictionary is that it is the first technical multilingual electronic dictionary having a Belarusian version.

Keywords: electronic lexicography, Natural Language Processing, linguistic database, terminological system, client-server application, Android operating system

For citation: Makarych M. V., Popova Yu. B., Shved M. O. (2020) Electronic Lexicography: Traditional and Modern Approaches. *Science and Technique*. 19 (5). 421–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-421-427>

Компьютерная лексикография: традиционные и современные методологии

М. В. Макарич¹⁾, Ю. Б. Попова¹⁾, М. О. Швед²⁾

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

²⁾ИООО «ЭПАМ Системз» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В настоящее время существует много научных подходов в области лексикографии: синтез речи, взаимосвязь информационных модулей словаря, корректировка правописания и т. д. Лавинообразный объем различной онлайн-информации в сетях вызвал необходимость создания систем автоматической обработки текстов. Белорусские ученые также ведут работу в этом направлении – новый подход к созданию лингвистической базы данных для такого рода систем рассмотрен в статье. Авторы представляют англо-белорусско-русский электронный словарь TechLex, который является совместным проектом кафедры английского языка № 2 и кафедры информационных систем и технологий Белорусского национального технического университета. Лингвистическая база данных словаря составлена не традиционным методом обработки печатных версий переводных словарей, а путем последовательной обработки

Адрес для переписки

Макарич Марина Васильевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/1
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-37
2348843@tut.by

Address for correspondence

Makarych Maryna V.
Belarusian National Technical University
65/1, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-37
2348843@tut.by

текстов периодических научных изданий узкой предметной области с последующей систематизацией лексических единиц. В процессе работы авторы изучили имеющиеся многоязычные электронные словари и создали клиент-серверное приложение на языке Java. Клиентская часть системы содержит мобильное приложение для операционной системы Android, которое было протестировано на планшетах и смартфонах с различными диагоналями экранов. Интерфейс словаря TechLex разработан с учетом возможности добавления новых предметных областей и заполнения их необходимым лексическим материалом. Неоспоримым достоинством предлагаемого словаря является тот факт, что это первый технический электронный многоязычный словарь, имеющий белорусскую версию перевода.

Ключевые слова: компьютерная лексикография, обработка естественного языка, лингвистическая база данных, терминологическая система, клиент-серверное приложение, операционная система Android

Для цитирования: Макарич, М. В. Компьютерная лексикография: традиционные и современные методологии / М. В. Макарич, Ю. Б. Попова, М. О. Швед // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 421–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-421-427>

Introduction

The term *electronic dictionary* can be used to refer to any data collection in electronic form concerned with the spelling, meaning or use of words [1]. The early use of computers in lexicography. Computers were first employed in lexicography in the 1960s. It was the associate editor of the Random House Dictionary of English Language [2]. At the same time the Lexicographic Project at System Development Corporation in Santa Monica, California, developed Webster Dictionary. It was created as a tape version of the paper-based Webster's 7th New Collegiate Dictionary and the New Merriam-Webster Pocket Dictionary [3]. Advances in technology in the 1970s encouraged a more extensive use of computers in lexicographical projects. Computer-based compilation systems were employed to sort and check entries in both the first Longman Dictionary of Contemporary English (LDOCE) (1978) [4]. Corpus lexicography began in the early 1980s, with the inauguration of the COBUILD project [5]. Lexicographic information in machine-readable form became increasingly available to lexicographers and researchers. The Diccionario de la Lengua Española (1984) is considered as "the last large European dictionary to be completed using exclusively the traditional methods of handwritten slips and letterpress composition and printing" [6].

The first electronic dictionaries with interfaces designed for human users were an offshoot of a calculator and Personal Digital Assistant technology, and became available in 1978. These were the LK-3000 produced by the Lexicon Corporation, Florida (the rights were acquired by Nixdorf that now is Siemens), the Craig M100 produced by the Craig Corporation, Japan, and "Speak & Spell", an educational toy produced by Texas Instruments [7]. Once the text of the dictionary was digitized and online, it was also available to be published on CD-ROM. The text of the first edition was made available in 1987 [8].

Nowadays there are a lot of modern technologies in electronic lexicography: speech synthesis technology, cross-referencing between dictionary modules, spell-checking functions and etc. [9–11].

The increasing availability of online information has necessitated intensive research in the area of automatic text summarization within the Natural Language Processing (NLP) community. Over the past half a century the problem has been investigated by applied linguistics and addressed from many different perspectives in varying domains and using various paradigms. The subfield of summarization has been investigated by the NLP community for nearly the last half century. Dragomir R. Radev defines a summary as "a text that is produced from one or more texts, that conveys important information in the original text(s), and that is no longer than half of the original text(s) and usually significantly less than that" [12]. Belarusian scientists are also interested in the development of NLP systems. The example of such a system with possibility of translation is TRT [13]. The linguistic base data of the system includes electronic dictionary with semantic codes. This approach makes possible to precisely define semantic functions of the text keywords that are situated in parsing groups and allows the automatic system to avoid typical mistakes [14]. The main part of TRT linguistic database (LD) is an alphabetical-frequency dictionary with semantic codes. It was used as a base for the creation of the electronic English-Belarusian-Russian dictionary. This is the project of the 2nd English Department and the Department of Software for Information Systems and Technologies of Belarusian National Technical University.

Research objectives

The objective of this research is to develop an electronic English-Belarusian-Russian dictionary for helping students to accurately identify the meaning of a word in a short period of time. The research focuses on the following aspects:

- 1) to create LD for the dictionary using English periodicals;
- 2) to develop a software for the dictionary;
- 3) to evaluate the suitability of the dictionary for the students of Belarusian National Technical University on specialty "Informatics" with textbook "English. Computer Engineering" [15] and specialties "Information systems and technolo-

gies”, “Information technology software” with textbooks “The art of unit testing” [16].

The methodology of a linguistic database development

For the creating of LD for our electronic dictionary, the selection and description of informatics terminology in English, Belarusian and Russian languages was done. Afterwards the comparison of these descriptions and the harmonization of terminological systems of the above-mentioned languages were carried out. At the first stage, we selected and analyzed 30 scientific and technical English articles taken from periodicals “International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering”, “Journal of Computer Engineering & Information Technology”, “Journal of Applied & Computational Mathematics”, “American Journal of Computer Science and Information Technology”, “Journal of Informatics and Data Mining”. As a result, 7000 terms were selected for dictionary LB. In the total number of terms were chosen:

- one-component terms: *frame* (англ.) – *фрэйм* (бел.) – *фрейм* (рус.); *storage* (англ.) – *захоўванне* (бел.) – *хранение* (рус.); *subset* (англ.) – *падмноства* (бел.) – *подмножество* (рус.);

- multicomponent terms: *access control* (англ.) – *кіраванне доступам* (бел.) – *управление доступом* (рус.); *information query language* (англ.) – *інфармацыйна-пошукавая мова* (бел.) – *информационно-поисковый язык* (рус.).

Since a significant part of the computer science sublanguage are abbreviations, they were also considered for inclusion in the linguistic database of the dictionary: *AIS/Alarm Indication Signal* (англ.) – *СІАС/сiгнал iндыкацыi аварыйнага стану* (бел.) – *СИАС/сигнал индикации аварийного состояния* (рус.); *BIOS/Basic Input-Output System* (англ.) – *базавая сістэма ўводу-вываду* (бел.) – *базовая система ввода-вывода* (рус.); *GUI/Graphical User Interface* (англ.) – *графічны iнтэрфейс карыстальніка* (бел.) – *графический интерфейс пользователя* (рус.); *TB/terabyte* (англ.) – *тэрабайт* (бел.) – *терабайт* (рус.). The number of abbreviations was 8 % of the total number of selected vocabulary. This is due to the presence of a large number of multi-component technical terms in innovative developments.

The results of our terminological research were placed in Excel table for further filling of English-Belarusian-Russian electronic dictionary LD. A fragment of the table is shown in Fig. 1.

	A	B	C	D	E	F	G
5742	join	1.злучэнне (операцыя рэляцыйнай алгебры) 2.	1.соединение (операция реляционной алгебры) 2. (операция) включающее ИЛИ				
5743	journal file	часопіс, часопісны файл	журнал, журнальный файл				
5744	journalizing	журналяванне (запіс інфармацыі аб аперацыях у	журнализация (запись информации об операциях в журнал)				
5745	joystick	каардынатная ручка, "джойстyk"	координатная ручка, "джойстик"				
5746	jump I	пераход, перадача кіравання	переход, передача управления				
5747	jump II	пераходзіць, выконваць пераход, перадаваць	переходить, выполнять переход, передавать управление				
5748	jump instruction	каманда пераходу, каманда перадачы кіравання	команда перехода, команда передачи управления				
5749	jump table	табліца пераходу, пераключальнік	таблица переходов, переключатель				
5750	justification	выраўноўванне [выключка] радкоў	выравнивание [выключка] строк				
5751	justify	выраўноўваць	выравнивать				
5752	Karnaugh map	карта Карно	карта Карно				
5753	Kbit	кілабйт, Кбіт (1024 біта)	килобит, Кбит (1024 бита)				
5754	Kbyte	кілабайт (1024 байты)	килобайт (1024 байта)				
5755	kernel	ядро (аперацыйнай сістэмы)	ядро (операционной системы)				
5756	kernel mode	прывілеяваны рэжым, рэжым ядра (аперацыяны прывілежаваны рэжым, рэжым ядра (операцыйнай сістэмы)	привилегированный режим, режим ядра (операционной системы)				
5757	kernel operation	аперацыя ядра	операция ядра				
5758	key	ключ, клавіша (клавіатуры)	ключ; клавиша (клавиатуры)				
5759	key click	пстрычка пры націску клавішы	щелчок при нажатии клавиши				
5760	key field	поле ключа; ключавое поле	поле ключа; ключевое поле				
5761	key in	друкаваць	печатать				
5762	key sorting	сартаванне па ключы	сортировка по ключу				
5763	key board input	увод (дадзеных) з клавіатуры; дадзеныя, якія ў	ввод (данных) с клавиатуры; данные, введенные с клавиатуры				
5764	key board	клавіатура	клавиатура				
5765	keyed access	доступ па ключы, ключавы доступ	доступ по ключу, ключевой доступ				
5766	keyed sequential-access method	паслядоўны метад доступу з ключамі	последовательный метод доступа с ключами				
5767	key pad	дапаможная [спецыялізаваная] клавіатура	вспомогательная [специализированная] клавиатура				
5768	key stroke	націск клавішы	нажатие клавиши				
5769	keyword parameter	ключавы параметр	ключевой параметр				
5770	keyword	ключавое слова	ключевое слово				
5771	kill	знішчаць (пра працэс); выдаляць (пра паведам	уничтожать (о процессе); удалять (о сообщении или части текста)				
5772	kit	набор, камплект	набор; комплект				
5773	kludge	варыянтны запіс (якая выкарыстоўваецца для а	вариантная запись (используемая для обхода системы контроля типов)				
5774	knowledge acquisition	збор ведаў; пабудова базы ведаў	сбор знаний; построение базы знаний				
5775	knowledge base	база ведаў	база знаний				

Fig. 1. A fragment of the Excel spreadsheet with the English-Belarusian-Russian translations

Electronic dictionary software realization

There are two common types of modern electronic dictionary software realization. They are *web application* and *mobile application*. Both are very popular and each of them has its own advantages and disadvantages. A web application is a client-server application (the client is a browser, and the server is a web server). Data in this app is stored mainly on the server and is exchanged over the network [17, 18]. It follows that to work with a web application, the user needs access to the Internet or to the organization local network if the server is located there [19]. The main advantage of choosing the client-server application is the fact that users do not depend on the operating system, so web applications are cross-platform and number of people can use it at the same time. Also, they do not require installation on a computer, tablet or smartphone, i. e. they don't occupy a device memory unlike mobile applications. With mobile applications, the situation is different. For changing the design, making any improvements, developing additional features the user needs to download it himself from the store or another resource. The disadvantage of the client-server solution is its dependence on the network, so it can't be used offline.

The mobile application is installed on a mobile device (tablet or smartphone) by downloading from a suitable resource, afterwards the application works offline. All the data that the mobile application works with is stored on user's device. This approach makes the problem of accessibility easier than web applications do it. Another advantage of mobile applications is the user's confidence in the security of the product, because app developers make thorough checking of the proposed product for viruses. The disadvantage of mobile applications is as a rule a longer and more expensive development process than for client-server development with similar functionality [20]. It should also be noted that the mobile application is almost always in addition to the web application, i. e. the company begins with the development of a web application and only then moves to its mobile counterpart. Therefore, it was decided to use the maximum advantages of the above options and implement the web application to our electronic dictionary with the ability to work in the local

network of BNTU and its mobile counterpart for the Android operating system [21–26].

In the process of English-Belarusian-Russian technical dictionary development, a client-server application was developed. It is created in the Java programming language on the base of the architectural pattern MVC (Model-View-Controller) [27, 28]. The General architecture of the application is shown in Fig. 2.

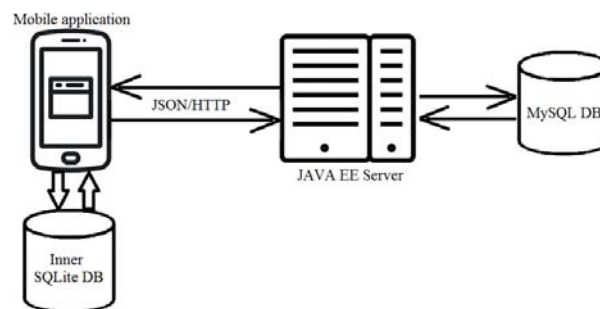


Fig. 2. General architecture of the application

The server part of the developed system contains MySQL database and JAVA EE (Enterprise Edition) server that operates with TomCat servlet container. The client part of the system contains SQLite database and a mobile application for Android operating system. To create and design the mobile application the standard tools of Android Studio development environment were used [29].

User manual for English-Belarusian-Russian electronic dictionary TechLex

The web application of the electronic dictionary TechLex is deployed in the local network of Belarusian National Technical University [<http://172.16.11.72:4325>], which must be typed in the browser address bar from any University computer. After that, the main dictionary window will be displayed (Fig. 3).

The application interface is created in the Belarusian language. The default translation direction is “Англійская мова” → “Беларуская мова”. The subject area “Information technologies” is filled with linguistic terms described above. There is a possibility to provide tabs for other subject areas: “Water Supply”, “Civil Engineering and Architecture”, “Transport Communications”, “Economics”, “Power Plant Construction” and “Pedagogy”.

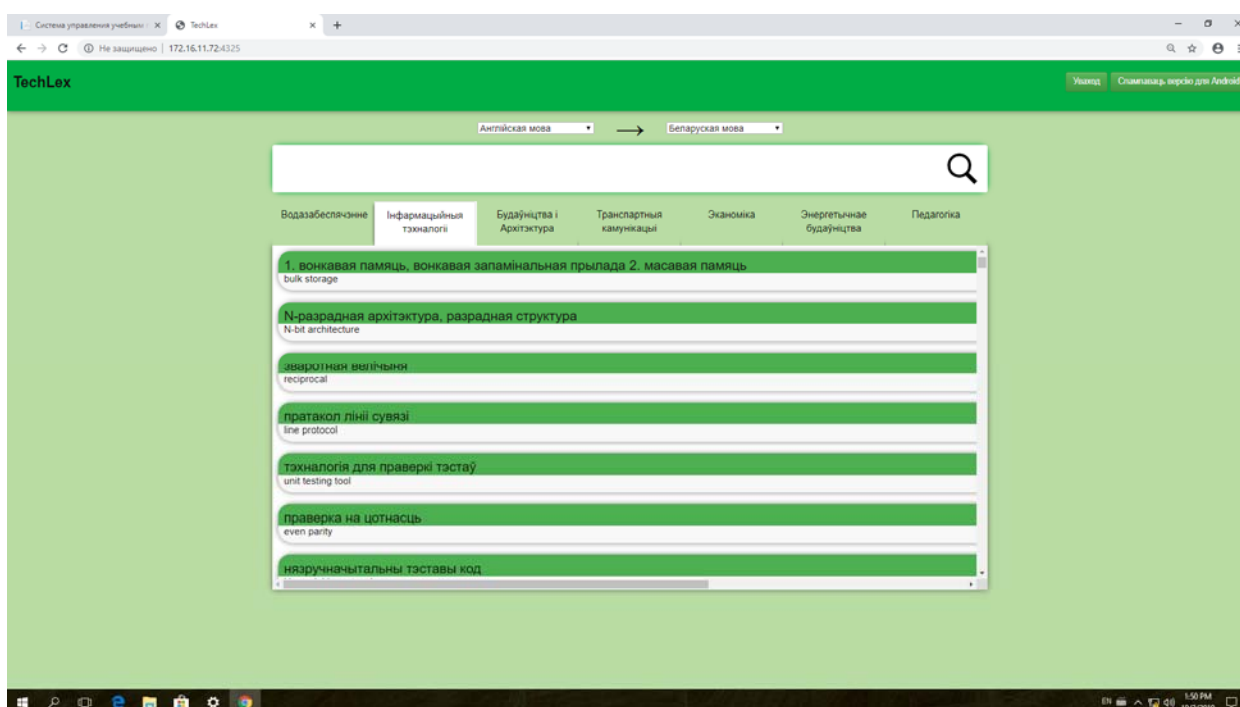


Fig. 3. The main dictionary window of TechLex

To translate word, you need to start typing it in the search field, and all the words and phrases containing the entered part will be displayed in the lines for the translated values. So Fig. 4 shows a copy screen of TechLex for the translation in the direction of “English language” → “Русская мова”

of subject area “Information technologies” for the words with syllable *buf* (the aim of a user is the word *buffer*). The results of the search are five words combinations displayed by the dictionary in the form of a list.

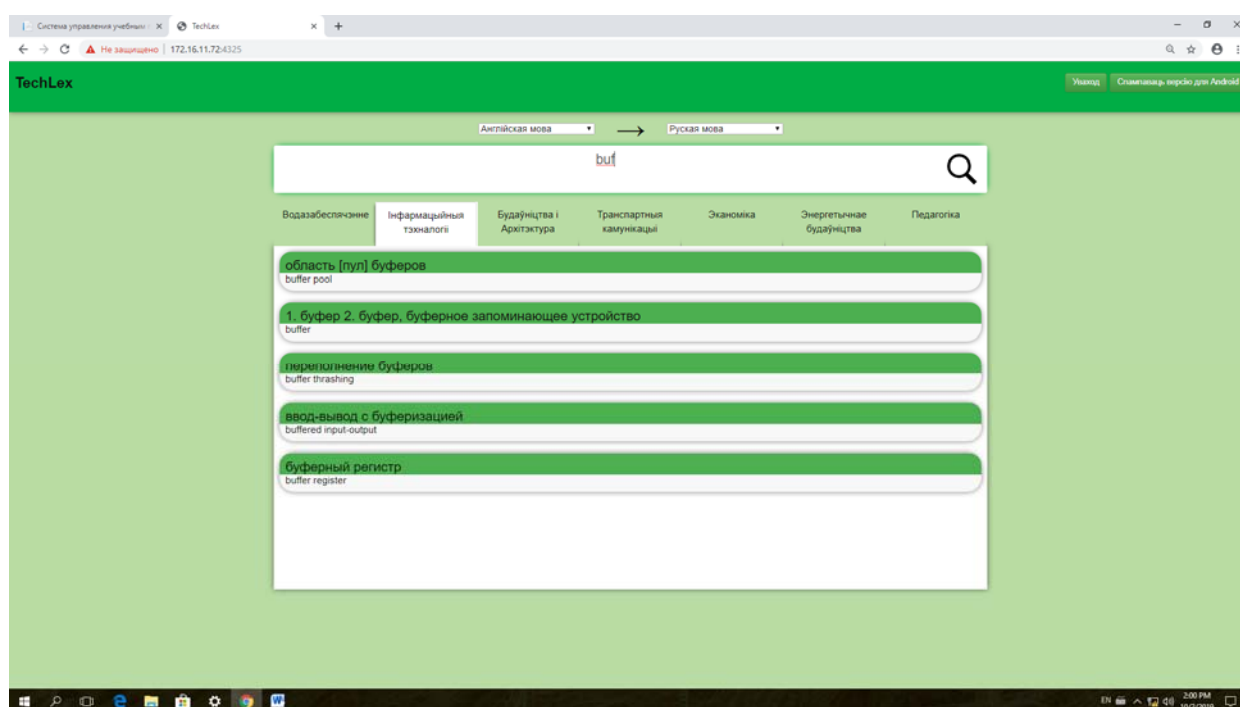


Fig. 4. Searching the translation with the part of a word

To add new words to TechLex database an administration module is provided. For this purpose, in the upper right corner of the dictionary you need to click on the button “Увайсці”. After that, the form shown in Fig. 5 will be displayed. If authentication is successful, the main page of the administration module with the ability to add, edit, delete words from LD will be displayed on the screen. If the login or password is incorrect, an error message will appear.

Fig. 5. The input form of an administration module

It should also be added that after logging into the administration module as an administrator, the user has a possibility to create, delete, and edit extra users. Clicking on the menu item “Дадаць карыстальніка” the form of adding a user is opened (Fig. 6).

Fig. 6. The form for adding a user

CONCLUSIONS

1. Presented English-Belarusian-Russian electronic dictionary TechLex is a completely new

electronic dictionary and has the following advantages:

- the linguistic database of the dictionary is compiled not by the traditional method of processing a large number of paper dictionaries and combining the received translations, but by sequential processing of scientific and technical English-language periodicals;
- the dictionary database has the possibility of simultaneous work of several users;
- the software of the proposed electronic dictionary is designed taking into account the analysis of modern electronic multilingual translation dictionaries and is a client-server application in the Java programming language;
- the client part of the system contains a mobile application for the Android operating system, which has been tested on tablets and smartphones with different screen diagonals;
- the interface of the TechLex dictionary is designed taking into account the possibility of adding new subject areas and filling them with appropriate lexical material;
- TechLex dictionary is the first technical multilingual electronic dictionary having an English-Belarusian-Russian version.

2. Web-application and mobile version of the TechLex dictionary were tested and included in the educational process of students on the specialty 1-080101-07 “Professional training (Informatics)” (Engineering and Pedagogical Department) for the discipline “Foreign language (English)” (Act approved at the meeting of the 2nd English Department, 30.08.2019, Protocol No 1) and the students on specialties 1-40 05 01 “Information Systems and Technologies”, 1-40 01 01 “Information Technologies Software” for the disciplines “Software Testing and Debugging” and “Software Reliability” (Act approved at the meeting of Information Systems and Technologies Software Department, 22.05.2019, Protocol No 11). In the future, it is planned to connect the training component to the electronic dictionary with the possibility of using it in Learning Management Systems [30].

REFERENCES

1. Nesi H. (2009) Dictionaries in Electronic Form. *The Oxford History of English Lexicography*. Oxford University Press, 458–478.

2. Stein J. (ed.) (1967) *Random House Dictionary of the English Language*. New York, Random House. 2059.
3. Hoboken N. J., Washington D. C. (2012) *Houghton Mifflin Harcourt Acquires Award-Winning Culinary Program, Webster's New World Reference Titles and Cliffs Notes Guides from John Wiley & Sons*. Available at: <https://www.wiley.com/WileyCDA/PressRelease/pressReleaseId-106123.html>.
4. Cowie A. P. (ed.) (2009) *The Oxford History of English Lexicography Oxford*. Oxford University Press, 458–478.
5. De Schryver G. (2003) Lexicographers' Dreams in the Electronic Dictionary Age. *International Journal of Lexicography*, 16 (2), 143–199. <https://doi.org/10.1093/ijl/16.2.143>.
6. Dodd S. (1989) Lexicocomputing and the Dictionary of the Future. *Lexicographers and their Works*. Exeter, University of Exeter Press, 83–93.
7. Tsai C. Y. (2004) Oxford Phrasebuilder Genie. *International Journal of Lexicography*, 17 (2), 223–230. <https://doi.org/10.1093/ijl/17.2.223>.
8. Tsai C. Y. (2002). CIDE on CD. *International Journal of Lexicography*, 15 (4), 307–322. <https://doi.org/10.1093/ijl/15.4.307>.
9. Casio Evolution in Electronic Lexicography (電子辞書、気が付けばカシオの独壇場) // Casio Electronic Dictionaries. Available at: <https://toyokeizai.net/articles/-/57340>.
10. Chen Y. (2010) Dictionary Use and EFL Learning: a Contrastive Study of Pocket Electronic Dictionaries and Paper Dictionaries. *International Journal of Lexicography*, 23 (3), 275–306. <https://doi.org/10.1093/ijl/ecq013>.
11. Lew R. (2011) Online Dictionaries of English. *E-Lexicography: the Internet, Digital Initiatives and Lexicography*. London/New York, Continuum, 230–250.
12. Radev D., Jing H., Stys M. (2004) Centroid-Based Summarization of Multiple Documents. *Information Processing and Management*, 40 (6), 919–938. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2003.10.006>.
13. Makarych M. (2012) *Automatic Text Summarization System*. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing. 145.
14. Makarych M. (2016) Modern Approach in Natural Language Processing Systems for Summarization. *Collection of Proceedings XVI Scientific Conferences "Linguistic and Cultural Traditions and Innovations"*. Tomsk, TPU, 303–307.
15. Makarych M. V., Pytko V. V. (2019) *English. Computer Engineering*. Minsk, Vysheyskaya Shkola Publ. 167 (in Russian).
16. Osherove R. (2014) *The Art of Unit Testing*. USA: Manning Publications Co. 261.
17. Benattallah B., Casati F. (2004) Web Service Conversation Modeling: a Cornerstone for E-Business Automation. *IEEE Internet Computing*, 8 (1), 46–54. <https://doi.org/10.1109/mic.2004.1260703>.
18. Dustdar S., Schreiner W. (2005) A Survey on Web Services Composition. *International Journal of Web and Grid Services*, (1), 1–30. <https://doi.org/10.1504/ijwgs.2005.007545>.
19. Preuner G., Schrefl M. (2002) Integration of Web Services into Workflows Through a Multilevel Schema Architecture. *Proceedings Fourth IEEE International Workshop on Advanced Issues of E-Commerce and Web-Based Information Systems (WECWIS 2002)*. <https://doi.org/10.1109/wecwis.2002.1021241>.
20. Sturgis H. E., Mitchell E. (2005) Separating Data from Function in a Distributed File System. *Massachusetts Institute of Technology & Software Patent Institute Overview*, (20).
21. Popova Y. B., Makarych M. V., Shved M. O. (2019) Mobile Application for English-Belarusian-Russian Technical Dictionary. *Teoretychnyya i Prykladnyya Aspekty Etnologichnykh Dasledavannyau: Zbornik Navukovykh Artykulau* [Theoretical and Practical Aspects of Ethnological Research: Collection of Scientific Papers]. Minsk, BNTU, 426–433.
22. Makarych M. V., Popova Y. B., Shved M. O. (2018) Linguistic Database and Software of the English-Belarusian-Russian Dictionary of Technical Terms. *Sistemnyi Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (4), 74–82. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-4-74-82> (in Russian).
23. Shved M. O., Popova Y. B. (2019) Mobile Application for the English-Belarusian-Russian Dictionary of Technical Terms. *Informatsionnye Tekhnologii i Sistemy: Problemy, Metody, Resheniya (ITS-2018): Respublik. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 22–23 Noyab. 2018 g.: Sb. Materialov i Dokladov* [Information Technologies and Systems: Problems, Methods, Solutions (ITS-2018): Republican Scientific and Technical Conference, Minsk, Nov. 22–23, 2018: Collection of Materials and Reports]. Minsk, Chetyre Chetverti Publ., 207–210 (in Russian).
24. Shved M. O. (2019) Software Implementation of a Mobile Application for the English-Belarusian-Russian Dictionary of Technical Terms. *Materialy 75-i Studencheskoi Nauch.-Tekhn. Konf.* [Materials of the 75th Student Scientific and Technical Conference]. Available at: http://static.bntu.by/bntu/news/2019/fitr/SNTK2019_FITR.pdf (in Russian).
25. Shved M. O., Popova Y. B., Makarych M. V. (2019) Features of the Mobile Application for the English-Belarusian-Russian Dictionary of Technical Terms. *VIII Forum Vuzov Inzhenerno-Tekhnologicheskogo Profilya Soyuznogo Gosudarstva: Sb. Materialov, Minsk, 29 Okt. – 1 Noyab. 2019 g.* [VIII Forum of Universities of Engineering and Technology Profile of the Union State: Collection of Materials, Minsk, Oct. 29 – Nov. 1, 2019]. Minsk, BNTU, 132–135 (in Russian).
26. Shved M. O., Popova Y. B., Makarych M. V. TechLex Linguistic and Electronic Dictionary Software. *VII Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Internet-Konf. "Informatsionnye Tekhnologii v Obrazovanii, Nauke i Proizvodstve", 16–17 Noyab. 2019 goda, Minsk, Belarus'* [VII International Scientific and Technical Internet Conference "Information Technologies in Education, Science and Production", Nov. 16–17, 2019, Minsk, Belarus]. Minsk, BNTU. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/68247> (in Russian).
27. *Learn Java Programming. The Definitive Guide*. Available at: <https://www.programiz.com/java-programming>.
28. *Design Patterns – MVC Pattern*. Available at: https://www.tutorialspoint.com/design_pattern/mvc_pattern.htm.
29. *Android Studio*. Available at: <https://developer.android.com/studio>.
30. Popova Y. B. (2016) Classification of Learning Management Systems. *Sistemnyi Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (3), 51–58 (in Russian).

Received: 22.01.2020

Accepted: 17.04.2020

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-428-436>

УДК 681.77, 681.2.083, 681.2.088, 681.2.089

Методика определения элементов внутреннего ориентирования многоматричных оптико-электронных аппаратов

Асп. Н. О. Старосотников^{1,2)}, инж. И. В. Подскребкин²⁾, канд. техн. наук, доц. Р. В. Фёдорцев¹⁾

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

²⁾ОАО «Пеленг» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В схемах работы оптико-электронных аппаратов (ОЭА), таких как цифровые автоколлиматоры, пеленгаторы, датчики Шака-Гартмана, а также системы астроориентации, проекционные измерительные системы, схемы геометрической калибровки ОЭА, фотоприемник выступает не только в качестве приемного устройства, но и отсчетного. Задачи, стоящие перед ОЭА, все сложнее, требуются большие поля зрения, которые обеспечиваются в том числе за счет размера фотоприемников с минимальным размером пикселя. Однако существуют технологические ограничения создания таких фотоприемников. Решение проблемы – использование нескольких фотоприемников, установленных на одной электронной плате. Поскольку фотоприемники ОЭА выступают и в качестве измерительных устройств, необходимо производить их геометрическую калибровку, подразумевающую измерение элементов внутреннего ориентирования (ЭВО), применяемых при обработке изображений ОЭА. Геометрическая калибровка позволяет исключить погрешности взаимной выставки фотоприемников на одной электронной плате, установленной в фокальной плоскости, а также искажения, вносимые объективом ОЭА, в первую очередь дисторсией. На правильность определения ЭВО влияет взаимное расположение коллиматора, с помощью которого производится геометрическая калибровка, и самого калибруемого ОЭА, т. е. элементов внешнего ориентирования. Стоит задача разделить ЭВО и элементы внешнего ориентирования. Это достигается с помощью методики математической обработки измеренных данных в прямом и перевернутом положениях коллиматора, позволяющей применять ее для геометрической калибровки ОЭА с большим количеством фотоприемников. В статье представлены результаты геометрической калибровки ЭВО при проецировании коллиматором тест-объекта на три фотоприемника макета ОЭА. Определены факторы, влияющие на точность геометрической калибровки ЭВО ОЭА. Разработанная методика геометрической калибровки ЭВО многоматричных ОЭА обеспечивает высокую точность измерений – не более 0,1"–0,2".

Ключевые слова: геометрическая калибровка, коллиматор, оптико-электронный аппарат, элементы внешнего и внутреннего ориентирования, фотоприемник

Для цитирования: Старосотников, Н. О. Методика определения элементов внутреннего ориентирования многоматричных оптико-электронных аппаратов / Н. О. Старосотников, И. В. Подскребкин, Р. В. Фёдорцев // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 428–436. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-428-436>

Method for Determining Elements of Internal Orientation Calibration in Multi-Matrix Optoelectronic Devices

M. A. Starasotnikau^{1,2)}, I. V. Padskrebkin²⁾, R. V. Feodortsau¹⁾

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

²⁾JSC “Peleng” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In the operation schemes of optical electronic devices (OED), such as digital autocollimators, direction finders, Shack-Hartmann sensors, as well as astro-orientation systems, projection measuring systems, geometric calibration schemes for OED, the photo-detector acts not only as a receiving device, but also as a measuring device. The tasks facing the OED

Адрес для переписки

Фёдорцев Ростислав Валерьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-62-86
lft@bntu.by

Address for correspondence

Feodortsau Rostislav V.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-62-86
lft@bntu.by

are becoming more and more complicated, large fields of view are required, which are provided among other things due to the size of photo-detectors with a minimum pixel size. However, there are technological limitations to the creation of such photo-detectors. The solution to the problem is the use of several photo-detectors installed on one electronic board. Since OED photo-detectors act, inter alia, as measuring devices, it is necessary to perform their geometric calibration. Geometric calibration involves the measurement of interior orientation parameters used in the processing of OED images. Geometric calibration makes it possible to eliminate errors in mutual exposure of photo-detectors on one electronic board installed in the focal plane, as well as distortions introduced by the OED lens, primarily by distortion. The correctness of the interior orientation parameter determination is influenced by the relative position of the collimator, with the help of which the geometric calibration is performed, and the calibrated OED itself, i. e. the external orientation elements. The task is to separate the interior orientation parameters and the elements of external orientation. This is achieved using the method of mathematical processing of measured data in the forward and inverted positions of the collimator. This method of geometric calibration allows to use it for geometric calibration of OED with a large number of photo-detectors. The paper presents the results of the geometric calibration of the interior orientation parameters when the collimator projects a test object onto three photo-detectors of the OED layout. The factors influencing on the accuracy of the geometric calibration of the interior orientation elements for OED are determined in the paper. The developed method for geometric calibration of the interior orientation parameters for multi-matrix OED provides high measurement accuracy – not more than 0.1"–0.2".

Keywords: geometric calibration, collimator, optoelectronic device, exterior and interior orientation parameters, photo-detector

For citation: Starasotnikau M. A., Padskrebkin I. V., Feodortsau R. V. (2020) Method for Determining Elements of Internal Orientation Calibration in Multi-Matrix Optoelectronic Devices. *Science and Technique*. 19 (5). 428–436. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-428-436> (in Russian)

Введение

В связи с совершенствованием технологии создания фотоприемников в схемах работы оптико-электронных аппаратов (ОЭА), таких как цифровые автоколлиматоры, пеленгаторы, датчики Шака-Гартмана, а также системы астроориентации, проекционные измерительные системы, схемы геометрической калибровки ОЭА [1–4], фотоприемник выступает не только в качестве приемного устройства, но и отсчетного, поскольку элементы фотоприемника – пиксели – имеют высокую точность пространственной периодичности. Задачи, стоящие перед ОЭА, становятся более сложными, требуются большие поля зрения, которые обеспечиваются в том числе за счет размера фотоприемников с минимальным размером пикселя. Однако существуют технологические ограничения создания таких фотоприемников. Решение проблемы – использование нескольких фотоприемников, установленных на одной электронной плате.

Поскольку фотоприемники ОЭА выступают и в качестве измерительных устройств, необходимо производить геометрическую калибровку ОЭА, подразумевающую измерение элементов внутреннего ориентирования (ЭВО) ОЭА, используемых при обработке изображений ОЭА. Геометрическая калибровка позволяет исключить погрешности взаимной выставки фотоприемников на одной электронной плате, уста-

новленной в фокальной плоскости ОЭА, а также искажения, вносимые объективом ОЭА, в первую очередь дисторсией [5]. Под ЭВО ОЭА понимаются следующие параметры:

- фотограмметрическое (эффективное) фокусное расстояние ($\mathcal{F}$);
- положение главной точки Sfx', Sfy' ;
- расположение фотоприемников в фокальной плоскости ОЭА:
 - линейное – координаты нулевого пикселя фотоприемника x_0, y_0 ;
 - угловое – угол поворота фотоприемника κ .

Методы геометрической калибровки

Общие принципы реализации. Общей схемой для геометрической калибровки ОЭА является проецирование на фотоприемник ОЭА эталонной связки векторов с предварительно известной пространственной ориентацией. По энергетическим центрам тяжести, определяемым периодической топологией элементов фотоприемника, спроецированной эталонной связки векторов, фотоприемник регистрирует их пространственное положение в системе координат ОЭА. Таким образом, в данной схеме периодическая топология элементов фотоприемника ОЭА будет являться измерительной шкалой. Определяются невязки эталонной связки векторов и их проекций в системе координат ОЭА. Невязки входят в систему линейных алгебраи-

ческих уравнений, решение которых методом наименьших квадратов будет определять ЭВО ОЭА.

Главным различием методов геометрической калибровки можно назвать способ формирования связки векторов. В зависимости от того, какой в ОЭА фотоприемник – линейный или матричный, – определяется то, как должны быть разнесены векторы связки векторов: по двум или по одной координатам. Величина поля зрения ОЭА влияет на то, какой диапазон должна охватывать связка векторов. Требования к точности геометрической калибровки определяют требования к определению пространственной ориентации связки векторов.

Для геометрической калибровки чаще всего используются коллимационные схемы [6]. В качестве тест-объекта может выступать либо матрица тест-объектов, либо единичный тест-объект.

Коллиматор с матрицей тест-объектов подходит для геометрической калибровки ОЭА с небольшим полем зрения, ограниченным технологическими возможностями производства матрицы тест-объектов. Предварительно проводится геометрическая калибровка коллиматора, например аттестованным теодолитом.

При использовании коллиматора с единичным тест-объектом его проецируют под разными углами в ОЭА. Возможны три варианта:

- коллиматор неподвижен, поворачивается калибруемый ОЭА;
- коллиматор поворачивается, калибруемый ОЭА неподвижен;
- калибруемый ОЭА поворачивается по одной оси, а коллиматор – по другой: для упрощения конструктивной реализации геометрической калибровки, когда необходимо калибровать ОЭА с большими полями зрения по двум осям.

Во всех случаях необходимо измерять величину поворота либо ОЭА, либо коллиматора, например, при помощи аттестованного углового датчика или теодолита.

Для геометрической калибровки ОЭА с сильно вынесенным входным зрачком осуществлять нужно не только поворот, но и линейное перемещение. Это обеспечивает расположение коллиматора и калибруемого ОЭА как можно ближе друг к другу для уменьшения области

с возможным движением воздушных масс, либо градиентом температуры, влияющих на точность геометрической калибровки.

На правильность определения ЭВО влияет то, как определено расположение друг относительно друга коллиматора и калибруемого ОЭА в процессе геометрической калибровки, т. е. элементов внешнего ориентирования. Стоит задача разделить ЭВО и элементы внешнего ориентирования. Это достигается за счет методики математической обработки измеренных данных, представленной в статье. Стоит отметить, что в случае схемы геометрической калибровки, когда коллиматор и калибруемый ОЭА перемещаются, дополнительно необходимо контролировать относительное их положение, которое нужно учитывать при обработке.

Описание схемы. Структурная схема геометрической калибровки (рис. 1) включает коллиматор и макет ОЭА. Внешний вид схемы геометрической калибровки макета ОЭА без кожуха показан на рис. 2. Коллиматор включает объектив с фокусным расстоянием $f = 1000$ мм (точное значение $f = 999,7190$ мм), тест-объект, расположенный в фокальной плоскости объектива, и осветитель. Рисунком тест-объекта является массив прозрачных точек на непрозрачном фоне.

Пример изображения рисунка тест-объекта на фотоприемнике ОЭА представлен на рис. 3. Массив точек подобран таким образом, чтобы равномерно спроецировать их изображения в центре и по краям фотоприемника ОЭА. Осветитель включает массив светодиодов и матовое стекло для обеспечения равномерной подсветки рисунка тест-объекта. Плата, на которой установлены светодиоды, с тыльной стороны охлаждается вентилятором. Длина волны излучения светодиодов (660 ± 10) нм. Объектив ОЭА, в фокальной плоскости которого установлены фотоприемники, формирует изображение тест-объекта, спроецированного коллиматором, на фотоприемнике. Объективы рассчитаны на минимум дисторсии, астигматизма, комы и хроматических aberrаций. Согласованность размера рисунка тест-объекта, функции рассеяния точки объективов и размера фоточувствительного элемента ОЭА – согласно [7].

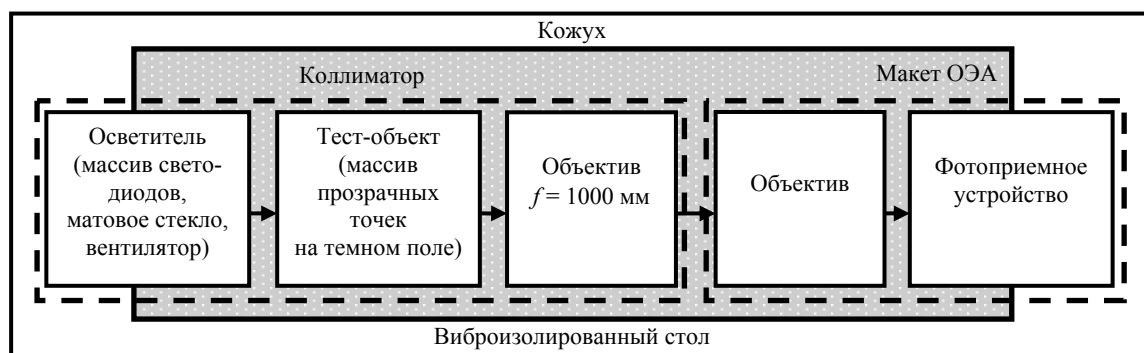


Рис. 1. Структурная схема геометрической калибровки макета оптико-электронного аппарата

Fig. 1. Structural diagram of geometric calibration for a model of optoelectronic device

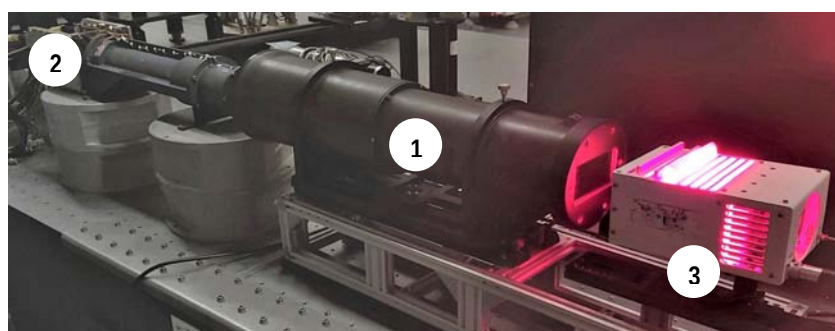


Рис. 2. Внешний вид схемы геометрической калибровки макета оптико-электронного аппарата (кожух не показан):

1 – коллиматор; 2 – макет; 3 – осветитель

Fig. 2. External view of the scheme of geometric calibration for a model of optoelectronic device (casing is not shown):

1 – collimator; 2 – layout; 3 – illuminator

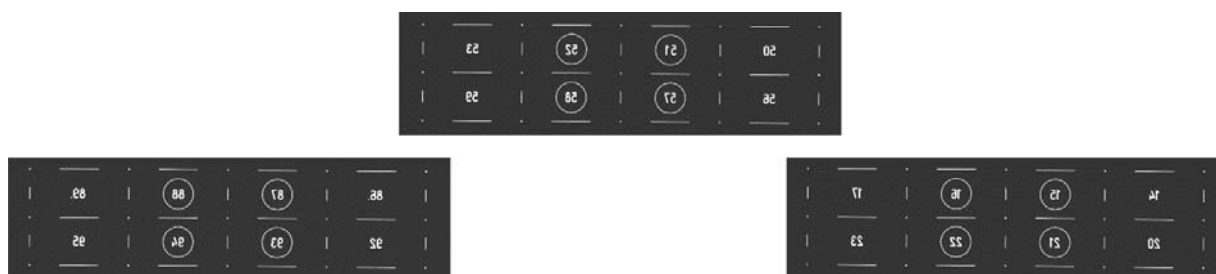


Рис. 3. Пример изображения рисунка тест-объекта на фотоприемнике оптико-электронного аппарата

Fig. 3. Image example of test object drawing on photo-detector of optoelectronic device

Основные технические характеристики калибруемого макета ОЭА представлены в табл. 1. Схема фокальной плоскости ОЭА (рис. 4) характерна для ОЭА, осуществляющего маршрутные съемки, когда ОЭА движется относительно объекта съемки и производит ее в режиме временной задержки и накопления. Три фотоприемника с шахматным расположением в макете ОЭА в исследовании используются в качестве примера. В ОЭА с большим количеством фотоприемников вдоль оси OX расчет будет аналогичным.

Таблица 1
Основные технические характеристики калибруемого макета оптико-электронного аппарата
Main technical characteristics of calibrated model of optoelectronic device

Наименование технического параметра	Значение
Фокусное расстояние объектива f , мм	1000
Количество фотоприемников Nm , шт.	3
Разрешение фотоприемника (Д×Ш), пикс	2048×576
Формат фотоприемника (Д×Ш), мм	10,2×2,9
Размер пикселя p , мкм	5×5

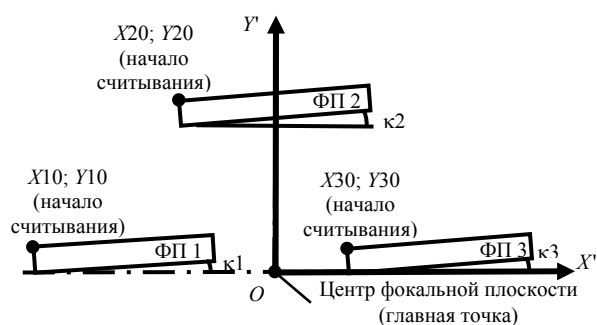


Рис. 4. Схема фокальной плоскости макета оптико-электронного аппарата (вид со стороны объектива): $X_{10}, Y_{10}, X_{20}, Y_{20}, X_{30}, Y_{30}$ – координаты начальных пикселей фотоприемников; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – углы поворота фотоприемников; X', Y' – проекция осей $X_{OЭА}, Y_{OЭА}$ на фокальную плоскость

Fig. 4. Diagram of focal plane of optoelectronic device layout (view from the side of the lens): $X_{10}, Y_{10}, X_{20}, Y_{20}, X_{30}, Y_{30}$ – coordinates of initial pixels of photo-detectors; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – angles of photo-detector rotation; X', Y' – projection of $X_{OЭА}, Y_{OЭА}$ axes onto the focal plane

Для устранения искажений в оптическом тракте схемы геометрической калибровки из-за рефракции воздуха, оптический тракт закрывается кожухом. Использование кожуха устраняет влияние перемещения воздушных масс в помещении на процесс геометрической калибровки. Кожух устанавливается таким образом, чтобы оставались открытыми не входящие в оптический тракт схемы калибровки части осветителя и ОЭА. Это необходимо для свободного отвода выделяемого ими тепла во время калибровки. Помимо этого, кожух должен быть пористым, чтобы обеспечить отвод теплоты из оптического тракта, а также устранить застоявания воздушных масс. Для снижения влияния вибраций схема геометрической калибровки устанавливается на виброизолирующий стол.

Описание методики и этапы калибровки

1. Коллиматор, калибруемый ОЭА, и осветитель визуально выставляются соосно.
2. ОЭА выдерживается во включенном состоянии для достижения рабочего режима съемки.
3. Определяется величина тока питания светодиодов или экспозиция, чтобы обеспечить освещенность фотоприемника ОЭА 80–90 % величины его потенциальной ямы.
4. По изображению с фотоприемников ОЭА достигается расположение рисунка тест-объек-

та коллиматора в центре фокальной плоскости путем поворотов коллиматора вокруг трех осей.

5. ОЭА выключается и остывает до температуры помещения.

6. ОЭА включается. Производится съемка 100 кадров рисунка тест-объекта.

7. Коллиматор поворачивается вокруг своей оптической оси на 180° .

8. ОЭА выключается и остывает до температуры помещения.

9. ОЭА включается. Производится съемка 100 кадров рисунка тест-объекта.

10. Полученные изображения обрабатываются согласно следующему разделу.

Обработка результатов

Вычисление по изображению с фотоприемников координат спроецированных коллиматором точек тест-объекта

1. Усредняется значение сигнала $I_{n,m}$ в каждом пикселе n, m , характеризующее преобразованной в электронном тракте ОЭА освещенности пикселя для снятых 100 кадров ОЭА.

Для снижения влияния шумов к усредненным кадрам применяется фильтр Винера размером 5×5 пикселей, а также вводился порог [8, 9], значения сигнала ниже которого принимались «0». Величина порога была в пять раз больше среднего значения фонового сигнала. Размер фильтра и величина порога определялись для повышения точности расчета центра тест-объекта.

2. Предварительно визуально определяется положение изображения одной из точек рисунка тест-объекта на фотоприемнике. С учетом известного шага между точками и линейного увеличения системы объектив коллиматора – объектив ОЭА определяются предварительные координаты точек рисунка тест-объекта на фотоприемнике, которые используются для задания центра области вычисления точных координат.

3. Находятся точные координаты изображения каждой точки рисунка тест-объекта коллиматора по энергетическому центру тяжести

$$C = \frac{\sum_N \sum_M (I_{n,m} n) \sum_N \sum_M (I_{n,m} m)}{\sum_N \sum_M I_{n,m} \sum_N \sum_M I_{n,m}},$$

где $I_{n,m}$ – величина сигнала в пикселе n, m ; n, m – порядковые номера пикселей по столб-

цам и строкам фотоприемника; N, M – общее число столбцов и строк области вычисления координат центра тяжести, использовалась область 70×70 пикселей [10].

Вычисление элементов внутреннего ориентирования оптико-электронного аппарата

1. Переходят из системы координат фотоприемника в систему координат фокальной плоскости ОЭА:

$$\begin{pmatrix} X_{Pnp_{i1}} \\ Y_{Pnp_{i1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{np0} \\ Y_{np0} \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{np0}) & -\sin(\alpha_{np0}) \\ \sin(\alpha_{np0}) & \cos(\alpha_{np0}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{Pnp_{i1,0}} \\ C_{Pnp_{i1,1}} \end{pmatrix};$$

$$X_{P_{i2}}, Y_{P_{i2}} = \begin{pmatrix} X_{P0_{i1}}, Y_{P0_{i1}} \\ X_{P1_{i1}}, Y_{P1_{i1}} \\ \vdots \\ X_{Pnp_{i1}}, Y_{Pnp_{i1}} \end{pmatrix},$$

где $X_{P_{i2}}, Y_{P_{i2}}$ – координаты изображения точки тест-объекта коллиматора в системе координат фокальной плоскости ОЭА; X_{np0}, Y_{np0} – линейные координаты нулевых пикселей фотоприемников; α_{np0} – поворот фотоприемников вокруг визирной оси ОЭА; p – размер пикселя фотоприемника; $C_{Pnp_{i1}} = (C_{x_{i1}}, C_{y_{i1}})$ – координаты центров тяжести точек изображения тест-объекта на фотоприемнике; $np = 0 \dots Nm - 1$ – номер фотоприемника; Nm – количество фотоприемников ОЭА; $i1 = 0 \dots T - 1$ – номер точки тест-объекта коллиматора, спроецированной на фотоприемник; T – количество точек тест-объекта коллиматора, спроецированных на фотоприемник; $i2 = 0 \dots TNm - 1$ – номер точки тест-объекта коллиматора, спроецированной на фокальную плоскость ОЭА; $P = 1, P = 2$ – положение коллиматора: 1 – прямое; 2 – перевернутое на 180° вокруг оптической оси коллиматора.

2. Пересчитываются координаты с учетом поправок:

$$X_{P_{i2}} = P_{i3,pp} X_{P_{i2}};$$

$$Y_{P_{i2}} = P_{i3,pp} Y_{P_{i2}},$$

где $P_{i3,pp}$ – полином аппроксимации, при первой итерации равен нулю; pp – степень полинома.

3. Пересчитываются координаты коллиматора в систему координат фокальной плоскости ОЭА

$$XkP_{i2}, YkP_{i2} = v XkP_{i2}, YkP_{i2} \cdot (f / f_k);$$

где XkP_{i2}, YkP_{i2} – эталонные координаты точек тест-объекта коллиматора; $v = \begin{cases} 1 & \text{для } P=1 \\ -1 & \text{для } P=2 \end{cases}$ –

коэффициент, характеризующий поворот коллиматора на 180° вокруг оптической оси; f – фокусное расстояние объектива ОЭА; f_k – фокусное расстояние коллиматора.

4. Вычисление эффективного фокусного расстояния.

Приводят координаты к общему центру.

Вычисляются невязки.

Вычисляется поворот вокруг оптической оси для каждого фотоприемника.

Компенсируется поворот вокруг оптической оси для каждого фотоприемника.

Определяется эффективное фокусное расстояние методом наименьших квадратов

$$f_{\text{эф}} = f + f \frac{\sum \left(\left(\sqrt{X_{fP_{i2}}^2 + Y_{fP_{i2}}^2} - \sqrt{X_{kfP_{i2}}^2 + Y_{kfP_{i2}}^2} \right) \right)}{\sum \left(\sqrt{X_{kfP_{i2}}^2 + Y_{kfP_{i2}}^2} \right)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{-\sqrt{X_{kfP_{i2}}^2 + Y_{kfP_{i2}}^2} \left(\sqrt{X_{kfP_{i2}}^2 + Y_{kfP_{i2}}^2} \right)}{\sum \left(\sqrt{X_{kfP_{i2}}^2 + Y_{kfP_{i2}}^2} \right)}.$$

Пересчитываются невязки $dX_{fP_{i2}}, dY_{fP_{i2}}$ с новым эффективным фокусным расстоянием.

Вычисляется средняя квадратическая погрешность (СКП; SKP) эффективного фокусного расстояния

$$SKPf = \sqrt{\sum_P \left(\sqrt{\frac{\sum (dX_{fP_{i2}})^2}{TNm-1}} \sqrt{\frac{\sum (dY_{fP_{i2}})^2}{TNm-1}} \right)^2}.$$

Выполняется весь расчет заново с уточненным фокусным расстоянием.

5. Проводится компенсация элементов внешнего ориентирования.

Координаты переводятся в векторный вид направляющих косинусов

$$VkP_{i2}, VP_{i2} = \frac{1}{\sqrt{(XkP_{i2}, X_{P_{i2}})^2 + (YkP_{i2}, Y_{P_{i2}})^2 + f_{\text{эф}}^2}} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} XkP_{i2}, XP_{i2} \\ YkP_{i2}, YP_{i2} \\ f_{\text{эф}} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Вычисляются элементы внешнего ориентирования в первом приближении:

- вычисляются невязки координат;
- вычисляется поворот вокруг оптической оси OZ

$$\kappa P_{np} = \frac{\sum_T (XnP_{i2} dXP_{i2})}{\sum_T (XnP_{i2}^2)}. \quad (2)$$

Примечание. Для вычисления поворота вокруг оптической оси OZ используют координаты, приведенные к общему центру;

- вычисляется поворот вокруг оси OX

$$\omega P_{np} = \arctg \left(\frac{\sum_T dYP_{i2}}{Tf} \right); \quad (3)$$

- вычисляется поворот вокруг оси OY

$$\alpha P_{np} = \arctg \left(\frac{\sum_T dXP_{i2}}{Tf} \right); \quad (4)$$

- выполняется пересчет векторов с учетом компенсации элементов внешнего ориентирования

$$VkP_{i2} = My(\alpha P) Mx(\omega P) My(\kappa P) VkP_{i2}, \quad (5)$$

где Mx , My , Mz – матрицы поворота вокруг осей OX , OY , OZ ;

- пересчитываются невязки.

Уточнение ЭВО

Вычисление уточненного поворота вокруг оптической оси для каждого фотоприемника

$$\kappa P_{np} = \kappa P_{np} + \sum_P \frac{\sum_T (XnP_{i1} dXP_{i1})}{\sum_T (XnP_{i1}^2)} / 2. \quad (6)$$

Вычисление уточненных линейных координат для каждого фотоприемника

$$Xnp0, Ynp0 = Xnp0, Ynp0 + \sum_P \left(\frac{\sum_T dXP_{i1}, \sum_T dYP_{i1}}{T} \right) / 2. \quad (7)$$

Порядок компенсации элементов внешнего и внутреннего ориентирования по формулам (1)–(7):

– компенсируется поворот вокруг оптической оси OZ κP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 κP_{np} для положений коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

– компенсируется поворот вокруг оси OX ωP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 ωP_{np} для положений коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

– компенсируется поворот вокруг оси OY αP как среднее поворота для ФП1 и ФП3 αP_{np} для положений коллиматора $P = 1$ и $P = 2$;

– выполняется весь расчет заново с уточненными элементами внешнего ориентирования;

– уточняется поворот вокруг оптической оси для каждого фотоприемника κP_{np} как среднее в двух положениях коллиматора;

– уточняются линейные координаты для каждого фотоприемника $Xnp0$, $Ynp0$ как среднее в двух положениях коллиматора;

– выполняется весь расчет заново с уточненными ЭВО.

6. Вычисление коэффициентов полинома аппроксимации дисторсии и остаточных поправок геометрического положения фотоприемников.

Вычисляются невязки dX_{i3} , dY_{i3} по всем измерениям в прямом и перевернутом положениях коллиматора, где $i3 = 0 \dots (TNm - 1) \cdot 2$ – номер точки тест-объекта коллиматора, спроецированной на фокальную плоскость ОЭА, в прямом и перевернутом положениях коллиматора.

Решением системы линейных алгебраических уравнений методом наименьших квадратов вычисляются остаточные невязки:

$$DX_{i3} = fx \frac{(V_{i3})_0}{(V_{i3})_2} + Sfx' \left(\frac{(V_{i3})_0}{(V_{i3})_2} \right)^2; \quad (8)$$

$$DY_{i3} = fy \frac{(V_{i3})_1}{(V_{i3})_2} + Sfy' \left(\frac{(V_{i3})_1}{(V_{i3})_2} \right)^2. \quad (9)$$

Пересчитываются невязки.

Вычисляются весовые коэффициенты Qx , Qy параметров из системы линейных алгебраических уравнений (8), (9).

Вычисляется СКП эффективного фокусного расстояния

$$SKPf = \sqrt{\frac{\sum (dX_{i3})^2}{(TNm-1) \cdot 2-1}} Qx \cdot \sqrt{\frac{\sum (dYfP_{i2})^2}{TNm-1}} Qy.$$

Вычисляются коэффициенты остаточного полинома аппроксимации ЭВО решением систем линейных алгебраических уравнений методом наименьших квадратов

$$P_{i3,pp} = Xn_{i3}^{pm} Yn_{i3}^{pn},$$

где $pm = 0 \dots \sqrt{pp}$; $pn = 0 \dots \sqrt{pp} - pm$; pp – степень полинома, номера комбинаций pm и pn .

Вычисляются невязки с учетом вычисленных остаточных поправок.

Вычисляется СКП геометрической калибровки

$$SKP = \sqrt{\arctg \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum (d3X_{i3})^2}{(TNm-1) \cdot 2-1}}}{f} \right)^2 \times \arctg \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum (d3Y_{i3})^2}{(TNm-1) \cdot 2-1}}}{f} \right)^2}.$$

Представление результатов расчета

Полученные в процессе геометрической калибровки ЭВО макета ОЭА с техническими характеристиками из табл. 1 и СКП определения ЭВО макета ОЭА представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты геометрической калибровки элементов внутреннего ориентирования макета оптико-электронного аппарата

Results of geometric calibration of elements for internal orientation of optoelectronic device layout

Наименование технического параметра	Значение
Фотограмметрическое фокусное расстояние $f_{\text{ф}}$, мм	999,7519
СКП определения фотограмметрического фокусного расстояния $SKPf$, мм	0,0016
СКП геометрической калибровки SKP , рад	0,0000003 (0,07")

На рис. 5 представлены остаточные невязки восстановления направления на эталонные точки тест-объекта коллиматора.

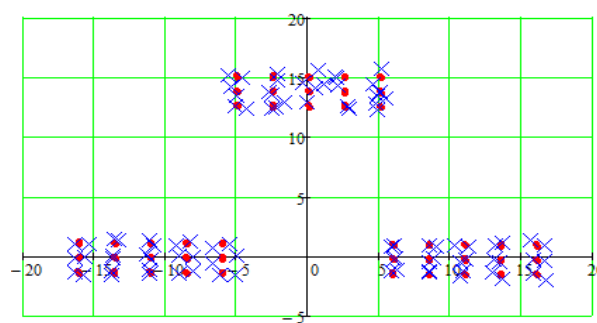


Рис. 5. Результаты расчета в системе координат фокальной плоскости макета оптико-электронного аппарата, мм: • – эталонные координаты точек тест-объекта коллиматора; X – увеличенные в 3000 раз остаточные невязки восстановления направления на точки тест-объекта коллиматора

Fig. 5. Calculation results in the focal plane coordinate system of optoelectronic device, mm: • – reference coordinates of collimator test object points; X – residual residuals of direction restoration to points of collimator test object increased by 3000 times

ВЫВОД

Проведена геометрическая калибровка макета многоатричного оптико-электронного аппарата с тремя фотоприемниками. Разработанная методика разделения элементов внешнего ориентирования за счет обработки измеренных данных по всем фотоприемникам и элементов внутреннего ориентирования за счет обработки по каждому фотоприемнику в прямом и перевернутом положениях коллиматора, а также представленные способы снижения влияющих факторов на точность геометрической калибровки элементов внутреннего ориентирования оптико-электронного аппарата обеспечивают высокую точность (не более 0,1"–0,2"). Данная методика позволяет применять ее для геометрической калибровки оптико-электронных аппаратов с большим количеством фотоприемников, чем представлено в качестве примера в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старосотников, Н. О. Высокоточный цифровой автоколлиматор для измерения малых углов / Н. О. Старосотников // Новые направления развития приборостроения: материалы 7-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., 23–25 апр. 2014 г. Минск: БНТУ, 2014. С. 244.
2. Jinyun, Yan. Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker / Yan Jinyun, Jiang Jie,

- Zhang Guangjun // *Optics Express*. 2016. Vol. 24, Iss. 6. P. 5961–5983. <https://doi.org/10.1364/oe.24.005961>
3. Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack – Hartmann Wavefront Sensor / Xiaoming Yin [et al.] // *Applied Optics*. 2009. Vol. 48, Iss. 32, P. 6088–6098. <https://doi.org/10.1364/ao.48.006088>.
4. Huang Zhengrong. Accurate Projector Calibration Based on a New Point to Point Mapping Relationship Between the Camera and Projector Images / Huang Zhengrong, Jiangtao Xi, Yanguang Yu // *Applied Optics*. 2015. Vol. 54, Iss. 3. P. 347–356. <https://doi.org/10.1364/ao.54.000347>.
5. Лобанов, А. Н. Фотограмметрия / А. Н. Лобанов, М. И. Буров, Б. В. Краснопецев. М.: Недра, 1987. 308 с.
6. Фотограмметрические параметры оптико-электронной аппаратуры / С. А. Архипов [и др.] // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 4. С. 105–115.
7. Старосотников, Н. О. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. 2015. № 5. С. 71–76.
8. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. М.: Изд-во «Техносфера», 2006. 616 с.
9. Старосотников, Н. О. Метод снижения влияния шумов фонового сигнала при определении координат энергетического центра тяжести изображения в ОЭП / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Приборостроение-2016: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., 23–25 нояб. 2016 г. Минск: БНТУ, 2016. С. 133–135.
10. Старосотников, Н. О. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах // Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 79–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86>.
- of the 7th International Students' Scientific and Technical Conference, April 23–25, 2014]. Minsk, BNTU, 244 (in Russian).
2. Jinyun Yan, Jiang Jie, Zhang Guangjun (2016) Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker. *Optics Express*, 24 (6), 5961–5983. <https://doi.org/10.1364/oe.24.005961>.
3. Xiaoming Yin, Xiang Li, Liping Zhao, Zhongping Fang (2009) Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack – Hartmann Wavefront Sensor. *Applied Optics*, 48 (32), 6088–6098. <https://doi.org/10.1364/ao.48.006088>.
4. Huang Zhengrong, Jiangtao Xi, Yanguang Yu (2015) Accurate Projector Calibration Based on a New Point to Point Mapping Relationship Between the Camera and Projector Images. *Applied Optics*, 54 (3), 347–356. <https://doi.org/10.1364/ao.54.000347>.
5. Lobanov A. N., Burov M. I., Krasnopevtsev B. V. (1987) *Photogrammetry*. Moscow, Nedra Publ. 308 (in Russian).
6. Arkhipov S. A., Gasitch G. V., Zavarzin V. I., Morozov S. A. (2008) Photogrammetric Parameters of Optical and Electronic Apparatus. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni N. E. Baumana = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, (4), 105–115 (in Russian).
7. Starasotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2015) Estimation of Accurate Determination for Coordinates of Gravity Energy Center in Collimator Test-Object in Respect of Control Schemes for Optoelectronic Devices with Matrix Photo-Detectors. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 71–76 (in Russian).
8. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. (2004) *Digital Image Processing Using MatLab*. New Jersey, Prentice Hall.
9. Starasotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2016) Method for Decreasing Influence of Background Signal Noise while Determining Energy Gravity Centre Coordinates for Images in Electrooptical Devices. *Priborostroenie-2016: Materialy 9-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 23–25 Noyab. 2016 g.* [Instrumentation-2016: Materials of the 9th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 133–135 (in Russian).
10. Starasotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2018) Accuracy Comparison of Algorithms for Determination of Image Center Coordinates in Optoelectronic Devices. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (1), 79–86. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86> (in Russian).

Поступила 11.11.2019

Подписана в печать 17.03.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Starasotnikau N. O. (2014) Highly-Accurate Digital Auto-collimator for Measuring Small Angles. *Novye Napravleniya Razvitiya Priborostroeniya: Materialy 7-i Mezhdunar. Stud. Nauch.-Tekhn. Konf., 23–25 Apr. 2014 g.* [New Directions in Instrumentation Development: Proceedings

Received: 11.11.2019

Accepted: 17.03.2020

Published online: 30.09.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-437-448>

УДК 681.5.09

Интеллектуальная модель потенциальных рисков возникновения техногенной катастрофы

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Гулай¹⁾, В. М. Зайцев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Техногенная катастрофа рассматривается как информационное отображение катастрофического развития событий в системе управления объектом, своеобразная проекция техногенной катастрофы на информационную плоскость. В статье представлена интеллектуальная модель, рассмотрены динамика и диапазоны аварийного изменения параметров системы управления, выполнена оценка потенциальных рисков и угроз возникновения катастрофы. Показано, что на макроструктурном уровне для семантического описания катастрофы достаточно эффективно применение древовидной сети сценариев, которая отображает концептуальную схему предметной и проблемной областей катастрофы и основывается на суждениях экспертов, их опыте и интуиции. Это позволяет вероятностными методами оценить потенциальные риски катастрофы с помощью двух количественных показателей: уровня риска (вероятности) возникновения явления в некоторой контрольной точке времени и величины ожидаемого материального ущерба. Для оценки возможных микросостояний по каждому из критических параметров объекта предложено применять аппарат нечеткой логики, экспертным путем задавать границы допусков и функции принадлежности к областям безаварийного функционирования объекта, отслеживать траектории миграции относительных значений параметров, своевременно обеспечивать условия их принудительного возвращения в рабочую область штатного функционирования. В интеллектуальную модель потенциальных рисков развития аварийной ситуации введены количественные показатели, имеющие нечеткую природу, для оценки динамики угрозы возникновения катастрофы. Одним из таких показателей является экспертный уровень угрозы наступления катастрофы при миграции группы аварийно опасных параметров технического объекта. Рассмотрен также интервал времени, отсчитываемый от текущего момента до ожидаемого момента наступления катастрофы при заданном предельно допустимом уровне угрозы ее возникновения.

Ключевые слова: техногенная катастрофа, интеллектуальная модель, система управления, древовидный сценарий, информационный образ, миграция параметров, потенциальный риск, ожидаемый ущерб

Для цитирования: Гулай, А. В. Интеллектуальная модель потенциальных рисков возникновения техногенной катастрофы / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 5. С. 437–448. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-437-448>

Intelligent Model of Potential Risks in Emergence of Man-Made Disaster

A. V. Gulay¹⁾, V. M. Zaitsev¹⁾

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

Abstract. A man-made catastrophe is considered as an information display of catastrophic development of events in the management system, a peculiar projection of a man-made catastrophe on the information plane. The paper presents an intellectual model, considers dynamics and ranges of emergency changes in management system parameters, assesses potential risks and threats of catastrophe emergence. It has been shown that at the macro-structural level for semantic description

Адрес для переписки

Гулай Анатолий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-25
is@bntu.by

Address for correspondence

Gulay Anatoliy V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-25
is@bntu.by

of a catastrophe, it is quite effective to use a tree-like network of scenarios, which displays the conceptual scheme of the subject and problem areas of the catastrophe and is based on judgments of experts, their experience and intuition. This allows probabilistic methods to assess potential risks of a catastrophe using two quantitative indicators: risk (probability) level of phenomenon occurrence at a certain control point of time and the volume of the expected material loss. It has been suggested that for assessment of possible microstate the fuzzy logic should be applied for each critical object parameter, tolerance limits and functions of affiliation with the fields of fail-safe object functioning should be set by expertise, migration trajectories of relative parameter values should be monitored and terms of their forced return to the working field of regular functioning should be duly provided. Quantitative indicators having imprecise origin have been introduced in the intelligent model of potential risks to assess dynamics of catastrophe threat. One of these indicators is the expert level of catastrophe occurrence during migration of a group of abnormally dangerous parameters of a technical object. The time interval has also been considered which is measured from the current moment to the expected moment of catastrophe occurrence at the preset maximum permissible level of catastrophe threat.

Keywords: man-made catastrophe, intelligent model, management system, tree-structured scenario, information context, migration of parameters, potential risk, expected damage

For citation: Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2020) Intelligent Model of Potential Risks in Emergence of Man-Made Disaster. *Science and Technique*. 19 (5). 437–448. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-5-437-448> (in Russian)

Введение

Для современного состояния промышленно развитых стран мира характерно нарастание угроз в технологической сфере, при этом техногенные катастрофы фактически становятся постоянно действующими факторами экономики. Крупнейшие аварии и катастрофы уносят множество человеческих жизней, причиняют огромный и часто невосполнимый ущерб окружающей среде, приводят к значительным экономическим потерям и требуют больших затрат на ликвидацию их последствий. В связи с ухудшением техногенной обстановки можно ожидать, что во многих случаях отдельные, даже небольшие по своим масштабам, производственные аварии станут одной цепью, будут провоцировать и усиливать друг друга, а также вызывать системные эффекты, не поддающиеся локализации и имеющие огромные прямые и косвенные последствия, проявляющиеся на макроэкономическом уровне.

Существенное усложнение промышленных технологий, насыщение предприятий энергоемким технологическим оборудованием характеризуются появлением новых источников аварий и повышением уровня уязвимости объектов, сопровождаются возрастанием рисков из-за возможных ошибок технического персонала и, следовательно, приводят к значительному повышению вероятности катастроф. В этих условиях возрастает необходимость в развитии методов наиболее раннего обнаружения угроз

возникновения техногенных аварий и катастроф [1–3]. Решение широкого круга вопросов, связанных со снижением вероятности негативных событий в промышленном производстве, может быть найдено при использовании современных информационных технологий для анализа динамики изменения параметров технических объектов.

Интеллектуальная модель техногенной катастрофы: концептуальный подход

В статье техногенная катастрофа рассматривается как информационное отображение катастрофического развития событий в системе управления, своеобразная проекция техногенной катастрофы на информационную плоскость. С целью автоматизации обработки данных о масштабах процессов, происходящих в системе, производится перенос проблемы анализа катастрофы в поле ее информационного проявления. При этом характеристики реальной техногенной катастрофы интерпретируются как катастрофическое изменение информативных функциональных параметров системы управления. Основные задачи анализа реального катастрофического события – построение интеллектуальной модели и рассмотрение динамики и диапазонов аварийного изменения параметров системы управления, оценка потенциальных рисков и угроз возникновения катастрофы.

Под техногенной аварией здесь понимается процесс несанкционированного высвобождения на производственном объекте сконцентрированных опасностей той или иной природы, которые в конечном итоге оказывают негативное, а в предельном случае – разрушительное и поражающее воздействие на производственное оборудование, помещения, окружающую среду и людей. Техногенная катастрофа – крупномасштабная авария объекта технического назначения, имеющая, как правило, обширный пространственный размах и характеризующаяся резким скоротечным изменением состояния объекта при определенных количественных вариациях возмущающих и управленческих параметров, от которых это состояние зависит. Техногенная катастрофа сопровождается крайне тяжелыми последствиями в виде материального ущерба и человеческих жертв.

Анализ многочисленных техногенных катастроф позволяет выделить следующие основные и наиболее частые причины их возникновения: отказы производственно-технологического оборудования, несоблюдение технологических регламентов, ошибки производственного персонала, потеря управления аварийно опасной частью оборудования. Строгое рассмотрение вопроса требует учета естественных природных причин: разрушительных землетрясений, цунами, наводнений, вероятность возникновения которых зависит от географического местоположения объектов.

Возникновению катастроф, как правило, подвержены объекты, потенциально имеющие [2, 3]:

- несколько различных устойчивых состояний работоспособности или жизнедеятельности;
- те или иные переходные неустойчивые состояния (точки бифуркации), выход из которых возможен при воздействии даже малых возмущающих или управленческих импульсов;
- явные или латентные механизмы постепенного изменения параметров или характеристик протекающих процессов, которые могут сопровождаться накоплением микродефектов и в дальнейшем приводить к быстрому (лавинообразному), а в ряде случаев необратимому изменению своих состояний;

- возможность реализации переходов между некоторыми состояниями по гистерезисным траекториям.

Объекты, подверженные катастрофам, имеют схожие функционально-морфологические особенности, а развивающиеся на них аварии различаются масштабами проявлений и тяжестью последствий, но имеют один и тот же характер побудительных причин. С учетом этого изучаемые авторами статьи нарушения штатных циклов управления вполне могут рассматриваться в качестве предвестников реальных аварий. В данном случае предполагается, что в процессе развития катастрофы сохраняется связь контролируемых параметров с реальными свойствами объекта, и формирующийся информационный образ адекватно отражает резко изменяющееся состояние объекта контроля.

Выводы и заключения относительно потенциальных рисков техногенных катастроф и динамики угроз их возникновения не могут быть отнесены ни к категории четких, ни к категории вероятностных. При этом процессы в изучаемом объекте целесообразно рассматривать на двух уровнях: макро- и микроструктурном. По природе происхождения исходной информации, применяемой при построении моделей событий и проведении требуемых оценок на каждом из уровней, одна часть информационного материала представляет собой экспертные сведения и эвристические правила, а другая часть – четкие и статистически подтвержденные данные [4]. В свою очередь, теоретические подходы к формированию выводов и оценок предпочтительнее основывать на эвристико-алгоритмических методах, доступных для использования в инженерной практике. Можно говорить только о некоторой степени уверенности в правомочности выводов и оценок в зависимости от доверия к знаниям экспертов и от ситуаций, складывающихся на рассматриваемых интервалах времени.

Для семантического описания катастрофы на макроструктурном уровне эффективно применение так называемой древовидной сети сценариев. Она, по сути, отображает концептуальную схему анализируемых предметных и проблемных областей, которая основывается на

суждениях экспертов, их опыте и интуиции [5]. Под сценарием будем понимать правдоподобную последовательность возможных случайных событий и неслучайных действий производственно-технического персонала, сопутствующих возникновению и развитию катастрофы. Корневым вершинам древовидной сети сценариев соответствуют возможные причины катастрофы, а ветвям – ожидаемые сценарии развития событий, отражающие в хронологическом порядке вовлекаемые в катастрофу составные части и процессы рассматриваемого объекта и его окружения, складывающиеся ситуации, защитные мероприятия персонала, результаты действий и наступившие последствия.

Возникновение катастрофы – это совокупность случайных многофакторных процессов, которые на макроструктурном уровне математически могут быть формализованы с помощью аппарата потоков событий [6, 7]. В соответствии с основными причинами возникновения катастрофы в каждом сценарии i -й ветви древовидной сети сценариев следует выделять следующие потоки событий:

- технических отказов аварийно опасного производственно-технологического оборудования, суммарная интенсивность которых составляет λ_i ;
- ожидаемых нарушений технологических регламентов с их суммарной интенсивностью ρ_i ;
- ожидаемых ошибок производственного персонала с суммарной интенсивностью π_i ;
- потерь управления аварийно опасной частью оборудования с суммарной интенсивностью ξ_i ;
- разрушительных стихийных бедствий и природных явлений с суммарной интенсивностью β_i .

Выделяется также обобщенный поток катастрофы с его консолидированной интенсивностью $\mu_i = \lambda_i + \rho_i + \pi_i + \xi_i + \beta_i$. Если в древовидной сети сценариев производственного объекта выделено N сценариев-ветвей, то верхняя граница интенсивности объединенного потока катастроф $\sup\{\mu\}$ будет определяться суммой интенсивностей консолидированных потоков его ветвей

$$\sup\{\mu\} = \sum_{i=1}^N \mu_i = \sum_{i=1}^N (\lambda_i + \rho_i + \pi_i + \xi_i + \beta_i).$$

При этом сам объединенный поток, являясь результатом взаимного наложения совокупностей различных потоков, в соответствии с предельными теоремами математической теории случайных потоков может рассматриваться как наиболее энтропийный пуассоновский поток [6, 7].

Эти положения позволяют применить экспоненциальную модель событий для любого момента времени t и оценить вероятность возникновения катастрофы $P_K(t)$ по следующей формуле [6]:

$$P_K(t) = 1 - e^{-t \sup\{\mu\}}.$$

Данная модель характеризует постоянное нарастание вероятности катастрофы с течением времени, и при неограниченном увеличении t имеет место предельное соотношение $P_K(t) \rightarrow 1$. На практике выбирается рациональная оценка длительности плано-предупредительного периода $T_{\text{п}}$ проведения функционального контроля оборудования и мероприятий по своевременной замене узлов, агрегатов, электронных компонентов и ликвидации последствий ошибок персонала. Кроме того, административно-организационными методами достигается постоянное повышение профессионализма и квалификации персонала. Эти меры обеспечивают поддержание вероятности возникновения катастрофы на требуемом допустимом уровне $P_K^*(t)$.

Риски катастроф принято оценивать с помощью двух количественных показателей, которые имеют статистическую природу: уровня риска в виде вероятности возникновения катастрофы $P_K(t)$ в некоторой контрольной точке времени $t = T_K$ и величины ожидаемого ущерба U . С целью сопоставления катастроф различного происхождения может быть применена достаточно распространенная эмпирическая шкала уровней относительных рисков, соответствующая требуемым или желаемым значениям вероятностей $P_K(t)$ в точке временной оси $t = T_K$: 0–0,1 – минимальный; 0,1–0,3 – ма-

лый; 0,3–0,4 (0,5) – средний; 0,4 (0,5)–0,7 – высокий; 0,70–0,85 – критичный; 0,85–1,00 – катастрофический уровни относительного риска.

Для правильной оценки рисков необходимо учитывать общую наработку оборудования T_n на начало очередного планово-предупредительного периода и длительность этого периода T_n , т. е. $T_k = T_n + T_n$. Это позволяет по желаемому уровню риска $P_k^*(t = T_k)$ оценить верхнюю допустимую границу длительности планово-предупредительного периода $\sup\{T_n\}$:

$$1 - e^{-(T_n + \sup\{T_n\}) \sup\{\mu\}} \leq P_k^*(t = T_k),$$

откуда $\sup\{T_n\} \leq -[\sup\{\mu\}]^{-1} \ln[1 - P_k^*(t = T_k)] - T_n$.

Таким образом, при прочих равных условиях уменьшение относительного риска катастрофы объективно может быть достигнуто за счет уменьшения верхней границы интенсивности объединенного потока $\sup\{\mu\}$, а также за счет сокращения длительности планово-предупредительного периода $\sup\{T_n\}$.

Представляет интерес рассмотрение особенностей изменения анализируемых параметров на конкретном примере. При интенсивности потока катастроф на уровне $\sup\{\mu\} = 6,9442 \cdot 10^{-6}$ 1/ч при $T_n = 43800$ ч (около пяти лет круглосуточного функционирования) и длительности планово-предупредительного периода $\sup\{T_n\} = 8928$ ч (годовой ресурс рабочего времени при круглосуточном функционировании) относительный риск $P_k^*(t = T_k = 52728)$ оценивается на уровне 0,3066. Уменьшение интенсивности потока катастроф $\sup\{\mu\}$ до уровня $3,4721 \cdot 10^{-6}$ 1/ч при тех же T_n и $\sup\{T_n\}$ позволяет снизить относительный риск катастрофы P_k^* до уровня 0,1673. С целью обеспечения $P_k^*(t = T_k)$ на уровне 0,5 необходимо, чтобы длительность планово-предупредительного периода составляла $\sup\{T_n\} \leq 155820$ ч. Для обеспечения снижения $P_k^*(t = T_k)$ до уровня 0,3 нужно, чтобы $\sup\{T_n\}$ было менее 58949 ч.

Средняя величина ожидаемого ущерба U может быть определена значением математического ожидания

$$U = \sum_{i=1}^N P_i U_{i3},$$

где $P_i = \mu_i / \sup\{\mu\}$; $\sum_{i=1}^N P_i = 1$; P_i – условная вероятность развития катастрофы по i -му сценарию; U_{i3} – экспертная оценка ожидаемого уровня ущерба при развитии i -го сценария.

Отдельные j -е состояния макроструктурного уровня аварийно опасного объекта образуют множества $\{X_j(t)\}$, $j = 1, 2, \dots, n$. В циклах мониторинга состояние объекта естественно оценивать совокупностями текущих значений контролируемых параметров (характеристик) внутренних микросостояний

$$X_j(t) = [\alpha_{j1}(t), \alpha_{j2}(t), \dots, \alpha_{jr}(t), \dots, \alpha_{ja}(t), \alpha_{jb}(t), \dots].$$

Некоторое количество R из них относится к категории критических и оказывает существенное влияние на возникновение аварий и катастроф.

При построении интеллектуальной модели исключительное значение имеют мнения и интуитивные оценки экспертов – высококвалифицированных профильных аналитиков в области создания и эксплуатации оборудования и систем различного функционального назначения. Состав критических параметров должен определяться по результатам шкалирования мнений экспертов и последующего обобщения их оценок. Значения отдельных параметров характеризуют возможные микросостояния объекта, которые соответствуют тем или иным аспектам протекания внешних и внутренних процессов и формируются измерительными трактами на основании сигналов сенсоров. Точность представления контролируемых параметров зависит от чувствительности сенсоров, характеристик трактов измерения, достоверности передачи информации по системным каналам, технической надежности аппаратуры, алгоритмов оцифровки и обработки данных [8]. На стадии системного анализа целесообразно полагать координаты вектора взаимно независимыми, что соответствует наиболее сложным условиям оценки энтропии возможных состояний объекта.

Для оценки возможных микросостояний по каждому из параметров или каждой характеристике объекта задаются пределы (границы) допусков безаварийного функционирования

$$\alpha_{jr}(t) \in (\alpha_{jrн}, \alpha_{jrв}),$$

где $\alpha_{jrн}$, $\alpha_{jrв}$ – требуемые нижний и верхний пределы допуска параметра или характеристики $\alpha_{jr}(t)$ для $r = 1, 2, \dots, R$ [9].

Выполнение этой задачи достигается расчетным или экспертным путем.

Внедрение интеллектуальных методов цифрового управления позволяет оперативно выявлять зарождение аварийно опасных тенденций в возможных миграциях значений критических параметров и характеристик к индивидуальным границам допусковых диапазонов [10]. Для выполнения контрольных операций целесообразно выделить следующие области возможного расположения значений каждого параметра или характеристики:

- рабочую область (РО) штатного функционирования объекта при размещении значения контролируемого параметра или характеристики между верхней и нижней границами данной области;

- верхнюю (ВП) и нижнюю (НП) предупредительные области выработки штатных управленческих воздействий при достижении контролируемым параметром границы рабочей области штатного функционирования объекта (соответственно верхней и нижней);

- верхнюю (ВА) и нижнюю (НА) аварийные области выработки экстренных управленческих воздействий при достижении контролируемым параметром соответственно верхней границы верхней предупредительной области или нижней границы нижней предупредительной области.

Взаимное расположение областей, границ между ними и траектория миграции относительного значения некоторого параметра или характеристики $\alpha_{jr}^*(t)$ показаны на рис. 1. При указанной схеме расположения допусковых диапазонов рабочая область – это единственный диапазон, который может рассматриваться как область гарантированного безаварий-

ного функционирования или жизнедеятельности объекта. Объединение рабочей и предупредительных областей соответствует диапазону условного безаварийного функционирования с абсолютной шириной $2W_{jr} = \alpha_{jrв} - \alpha_{jrн}$, при этом используется относительная шкала значений параметра с размахом ± 1 :

$$\alpha_{jr}^*(t) = \left\{ \alpha_{jr}(t) - \left(\alpha_{jrн} / 2 + \alpha_{jrв} / 2 \right) \right\} / W_{jr}.$$

Предупредительные области следует рассматривать как диапазоны преимущественной реализации управленческих процессов. Границы областей в общем случае должны устанавливаться конкретно для каждого параметра или характеристики. Чаще всего ширина предупредительных областей ВП и НП одинакова и составляет 20–30 % от размаха относительной шкалы.

Траектория миграции относительного значения параметра или характеристики $\alpha_{jr}^*(t)$ в процессе своего развития может достигать предельных значений предупредительной области и пересекать ее границы. Если не будут приняты эффективные управленческие действия в потенциально опасных точках траектории (рис. 1, точки *B*, *C*) по принудительному возвращению текущего значения параметра или характеристики в рабочую область, то спонтанный или спровоцированный переход в аварийную область будет сопровождаться реальной угрозой возникновения катастрофы. Точки *F* и *G* на рис. 1 соответствуют моментам времени начала управленческих действий по предотвращению негативного развития траектории.

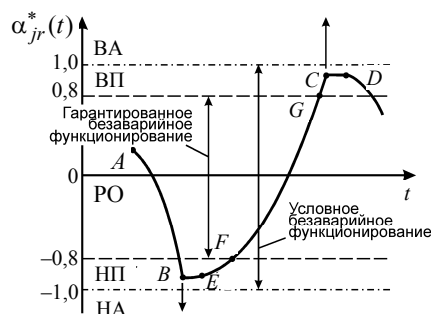


Рис. 1. Расположение областей относительного значения параметра $\alpha_{jr}^*(t)$

Fig. 1. Location of areas for parameter relative value $\alpha_{jr}^*(t)$

Интеллектуальная оценка рисков возникновения техногенной катастрофы

Исходной информацией для выявления тенденций, приводящих к катастрофам, являются временные ряды в виде последовательностей наблюдений в дискретные моменты времени аварийно опасных координат случайных векторов $X_j(t)$ для $t = t_0 + h\Delta t$, $h = 0, 1, 2, \dots$; $\Delta t \leq (2f_{\max})^{-1}$ [11, 12]. Здесь $f_{\max}$ – частота дискретизации параметров, значение которой в соответствии с теоремой Котельникова – Найквиста принимается в качестве граничного для спектральных разложений координат векторов $X_j(t)$. В большинстве случаев для каждого параметра или характеристики $\alpha_{jr}(t)$ уровень h временного ряда можно представить как некоторую аддитивную комбинацию трендового, циклического и случайного компонентов.

В объектах, которым свойственны быстропротекающие процессы (например, в техносистемах), практическое значение при выработке управленческих решений имеют краткосрочные тренды. Для оперативного управления процессами предлагается использовать алгоритм непрерывного динамического отслеживания отдельных временных рядов $\alpha_{jr}(t)$ контролируемых координат векторов $X_j(t)$ на каждом четырехточечном интервале из последовательности интервалов наблюдения за функционированием или жизнедеятельностью объекта, «скользящих» по оси времени. За основу выработки решений целесообразно принять результаты многошагового линейного аналитического сглаживания относительных значений $\alpha_{jr}^*(t)$ в смежных отсчетах для фактически измеренного параметра $\alpha_{jr}(t)$ и последовательного продолжения контролируемой траектории миграции в точках временной оси вплоть до момента ее разрушения [6]:

$$\alpha_{jr}^*(t_h); \alpha_{jr}^*(t_{h+1}); \alpha_{jr}^*(t_{h+2}); \alpha_{jr}^*(t_{h+3});$$

$$\alpha_{jr}^*(t_{h+1}); \alpha_{jr}^*(t_{h+2}); \alpha_{jr}^*(t_{h+3}); \alpha_{jr}^*(t_{h+4});$$

$$\alpha_{jr}^*(t_{h+2}); \alpha_{jr}^*(t_{h+3}); \alpha_{jr}^*(t_{h+4}); \alpha_{jr}^*(t_{h+5}).$$

При этом относительные значения всех отсчетов не должны выходить за границы предуготовительных областей, соответствующих значениям $+1$ и -1 , и объект должен оставаться в диапазоне условного безаварийного функционирования.

Четыре смежных отсчета для «завязки» и последующего продолжения траектории выбраны потому, что они соответствуют минимальному количеству отсчетов, которые позволяют достаточно обоснованно отстроиться от флуктуационных колебаний и выявить факты возникновения, развития и разрушения тенденций целенаправленной миграции значений параметра $\alpha_{jr}(t)$. В случае линейного аналитического сглаживания на интервале времени t_h , $t_{h+3} = t_h + 3\Delta t$ сглаживающая зависимость будет иметь следующий вид [6]:

$$A_{jr}^*(t_h, t) = [K_{tar}^* / D_t] t + M_{ar}^* - [K_{tar}^* / D_t] M_t.$$

Это аппроксимирующий линейный сплайн участка траектории миграции, оптимальные коэффициенты которого выводятся на основе метода наименьших квадратов. Расчеты среднего значения M_t^* и дисперсии D_t^* времени t , среднего значения координаты M_{ar}^* и коэффициента корреляции K_{tar}^* для четырех смежных отсчетов могут выполняться по соотношениям, достаточно простым в части состава арифметических операций и коротким по времени реализации на современных сигнальных процессорах:

$$M_t^* = t_h + 1,5\Delta t;$$

$$D_t^* = 1,25\Delta t^2;$$

$$M_{ar}^* = \{ \alpha_{jr}^*(t_h) + \alpha_{jr}^*(t_h + \Delta t) + \alpha_{jr}^*(t_h + 2\Delta t) + \alpha_{jr}^*(t_h + 3\Delta t) \} / 4;$$

$$K_{tar}^* = \Delta t [-0,375\alpha_{jr}^*(t_h) - 0,125\alpha_{jr}^*(t_h + \Delta t) + 0,125\alpha_{jr}^*(t_h + 2\Delta t) + 0,375\alpha_{jr}^*(t_h + 3\Delta t)].$$

Если локальная тенденция действительно имеет место и отражается зависимостью $A_{jr}^*(t_h, t)$, то при нормальном распределении ошибок измерений с консолидированными среднеквадратическими отклонениями σ_{jr}^* каждое из значений $\alpha_{jr}(t_h)$, $\alpha_{jr}(t_{h+1})$, $\alpha_{jr}(t_{h+2})$, $\alpha_{jr}(t_{h+3})$ с вероятностью не ниже $p = 0,997$ должно находиться внутри зоны тренда

$$Z_{jr}^*(t) = A_{jr}^*(t_h, t) \pm 3\sigma_{jr}^*,$$

что отражается следующей продукцией:

$$\text{IF } A_{jr}^*(t_h, t) - 3\sigma_{jr}^* \leq \alpha_{jr}^*(t) \leq A_{jr}^*(t_h, t) + 3\sigma_{jr}^*$$

$$\text{AND } t \in (t_h, t_h + 3\Delta t) \text{ THEN } \alpha_{jr}^*(t) \in Z_{jr}^*(t).$$

Этот признак целесообразно использовать в качестве критерия «завязки», продолжения или разрушения траектории миграции. Локальная тенденция нарастания по времени координаты $\alpha_{jr}^*(t)$ выявляется при $K_{tar}^* > 0$; напротив, в случае $K_{tar}^* < 0$ наблюдается тенденция убывания данной координаты. Доверительная вероятность указанных событий оценивается значением $P_{дов} = p^4 = 0,988$; четвертая степень вероятности p в данном случае определяется тем, что в обработке используется четыре отсчета.

В том случае, если локальная изменчивость по времени координаты $\alpha_{jr}^*(t)$ проявляется достаточно слабо, то модуль коэффициента корреляции K_{tar}^* оказывается крайне малым или вообще $K_{tar}^* \rightarrow 0$. Подобные ситуации принято называть флэтом (боковым трендом). На рис. 1 участкам флэта могут быть поставлены в соответствие сегменты BE и CD траектории. При техническом анализе на основе экспертных оценок необходимо задать некоторое пороговое значение K_{ϕ}^* , ниже которого (т. е. для $|K_{tar}^*| < K_{\phi}^*$) принимается решение о наличии флэта. Флэт в большинстве случаев – предвестник изменения тенденции развития траектории. Выявление локального флэта или

отсутствия выраженной локальной тенденции не исключает наличие тренда на более продолжительном интервале времени, что требует организации дополнительного контроля.

На следующем шаге рассматриваются отсчеты $\alpha_{jr}^*(t_{h+1} = t_h + \Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+2} = t_h + 2\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+3} = t_h + 3\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+4} = t_h + 4\Delta t)$. По их значениям на интервале времени $t_{h+1} = t_h + \Delta t$; $t_{h+4} = t_h + 4\Delta t$ строится зависимость $A_{jr}^*(t)$ и делается вывод о проявлении локальной тенденции на отрезке, сдвинутом по времени вперед на один квант Δt относительно предыдущего i -го шага. Аналогичным образом проводятся операции с отсчетами $\alpha_{jr}^*(t_{h+2} = t_h + 2\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+3} = t_h + 3\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+4} = t_h + 4\Delta t)$; $\alpha_{jr}^*(t_{h+5} = t_h + 5\Delta t)$, строится и анализируется зависимость $A_{jr}^*(t)$ и т. д. Многошаговому процессу соответствуют точки 1, 2, 3, ..., 9 на рис. 2. Эти действия напоминают технологию формирования скользящего среднего [11, 12].

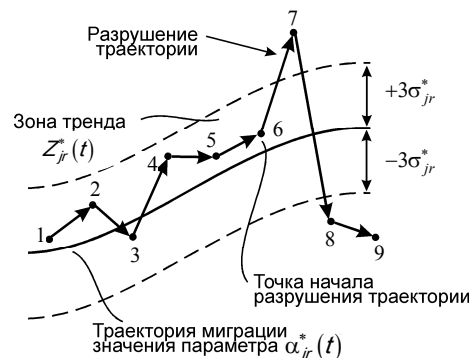


Рис. 2. Развитие и разрушение траектории миграции значения параметра $\alpha_{jr}^*(t)$

Fig. 2. Development and destruction of migration path for parameter $\alpha_{jr}^*(t)$

Правомерно допустить, что выраженная локальная тенденция или флэт считаются выявленными только в том случае, если из четырех смежных отсчетов имеет место выход из допустимой зоны не более одного значения. В случае, если локальная тенденция или флэт вообще отсутствуют, по крайней мере, два, три или

даже четыре результата наблюдений координаты $\alpha_{jr}^*(t)$ будут находиться вне рассматриваемой зоны тренда $Z_{jr}^*(t)$. Миграция координаты при этом обусловлена, скорее всего, хаотическими случайными колебаниями, а траектория «завязана» или продолжена быть не может. Последнее обстоятельство указывает на возможное разрушение траектории (рис. 2, точки 7–9).

При выходе значения параметра или характеристики за границы рабочей области критичным является время его пребывания в предупредительной области. С увеличением этого времени возрастает вероятность перехода в верхнюю аварийную область при тенденции нарастания координаты $\alpha_{jr}^*(t)$ или в нижнюю аварийную область при тенденции убывания данной координаты. Оценить уровень угрозы такого перехода можно только методом построения шкалы экспертных оценок, соответствующих конкретным физическим особенностям развития процесса. С помощью этой шкалы достигается решение следующих задач:

- определяется допустимая длительность выработки и реализации управленческих действий по возврату значения параметра или характеристики в рабочую область;
- обеспечиваются передача информации о складывающейся ситуации производственному персоналу и выработка адекватных сигналов для реализации управления и оповещения.

Динамику угрозы возникновения катастрофы предлагается оценивать с помощью следующих количественных показателей, которые имеют нечеткую природу: уровень угрозы возникновения катастрофы $\text{Alarm}[t, R = m]$ при миграции аварийно опасных параметров; интервал времени ΔT_K , отсчитываемый от текущего момента астрономического времени t до ожидаемого момента наступления аварии $t_{ав}$ при заданном предельно допустимом уровне A_{jr}^* угрозы возникновения катастрофы.

Рассмотрим нечеткую переменную «экспертный уровень угрозы возникновения ката-

строфы $\text{Alarm}[t, R = 1]$ при миграции одного аварийно опасного параметра (характеристики) $\alpha_{jr}^*(t)$ ». Экспертный уровень угрозы имеет область значений $[0; +1]$. Конкретное значение этой нечеткой переменной определяются следующими возможными событиями: непрерывным нахождением (при изменении во времени) значения параметра в предупредительной области при его движении по траектории без выхода в аварийную область и без возврата в рабочий диапазон: в случае верхней предупредительной и аварийной областей – для $K_{тар}^* > 0$; в случае нижнего предупредительного и аварийного диапазонов – для $K_{тар}^* < 0$.

Предположим, что траектория миграции значения параметра или характеристики $\alpha_{jr}^*(t)$ «завязана» в момент времени $t = T_0$. Рассмотрим время $T_{ВП}$ и $T_{НП}$ непрерывного пребывания значения параметра или характеристики $\alpha_{jr}^*(t)$ в предупредительных областях (верхней и нижней соответственно). Их значения будут являться элементами двух нечетких множеств, в общем случае имеющих различные функции принадлежности $Q_{ВПjr}(T_{ВП})$ и $Q_{НПjr}(T_{НП})$ [13, 14]. На интервале $(0; +\infty)$ области определения времени $T_{ВП}$ и $T_{НП}$ данные функции будут убывающими, при этом:

$$Q_{ВПjr}(0) = Q_{НПjr}(0) = +1;$$

$$Q_{ВПjr}(t \rightarrow +\infty) = Q_{НПjr}(t \rightarrow +\infty) = 0.$$

В частном случае эти функции могут совпадать. Функции принадлежности могут быть определены экспертами в решетчатом виде и заданы таблицами значений для дискретных аргументов. Технология отслеживания траектории миграции позволяет определять моменты выхода значений параметра или характеристики из рабочей области и перемещения в проблемную область. Для любого момента астрономического времени $t = T_0 + T_{ВП}$ или $t = T_0 + T_{НП}$ экспертный уровень $\text{Alarm}[t, R = 1]$ угрозы возникновения катастрофы при миграции одного параметра (характеристики) может быть оценен дополнением до +1 результатов

фаззификации времени $T_{ВП}$ или $T_{НП}$ по соответствующим функциям принадлежности

$$\text{Alarm}[T^*, R = 1] = 1 - Q_{jr}^*.$$

Здесь и в дальнейшем символ T^* означает одновременное представление $T_{ВП}$ и $T_{НП}$, а Q^* – одновременное представление $Q_{ВП}(T_{ВП})$ и $Q_{НП}(T_{НП})$.

Если установлен или задан предельно допустимый уровень A_{jr}^* угрозы возникновения катастрофы при движении значения по траектории без промежуточного возврата в рабочую область, то интервал времени ΔT_K , отсчитываемый от текущего момента астрономического времени t до ожидаемого момента наступления аварии $t_{авjr}$, оценивается следующим значением:

$$\Delta T_K = t_{авjr} - t, t_{авjr} = T^* + T_0;$$

$$T^* = \{1 - Q_{jr}^*(T = t_{авjr} - T_0)\}^{-1}$$

$$\text{при Alarmjr}(T^*) = A_{jr}^*,$$

где $\{1 - Q_{jr}^*\}^{-1}$ – функция, обратная к функции $1 - Q_{jr}^*$ для соответствующей предупредительной области, которая применяется при дефаззификации (скаляризации) времени T^* по значению функции $\text{Alarm}[t, R = 1] = A_{jr}^*$.

Потенциально это позволяет прогнозировать моменты возникновения катастроф при условии непрерывного отслеживания траектории миграции значения параметра (характеристики) $\alpha_{jr}^*(t)$.

Рассмотрим нечеткую переменную «экспертный уровень угрозы $\text{Alarm}[t, R = m]$ возникновения катастрофы при миграции группы аварийно опасных параметров (характеристик) из m компонентов $\alpha_{ja}^*(t)$, $\alpha_{jb}^*(t)$, $\alpha_{jc}^*(t)$, ..., $\alpha_{jm}^*(t)$ ». Экспертный уровень угрозы, как и в случае одного параметра (характеристики), имеет область значений $[0; +1]$. Конкретное значение этой нечеткой переменной определяют

ся смысловым составом и сочетанием величин параметров группы.

Рассмотрим время $\{T_{ju}^*\}$ ($u = a, b, c, \dots, m$) непрерывного пребывания значений параметров или характеристик $\{\alpha_{jr}^*(t)\}$ в предупредительных областях, начиная с $\{T_{0ju}^*\}$. В любой момент времени конкретный параметр может располагаться только в одной из предупредительных областей или быть за ее пределами. Значения параметров или характеристик будут являться элементами двух групп нечетких множеств, в общем случае имеющих различные убывающие функции принадлежности:

$$\{Q_{ju}^*(T); Q_{ju}^*(0) = +1; Q_{ju}^*(t \rightarrow +\infty) = 0\}.$$

Предположим, что значения параметров или характеристик некоторым случайным образом разложились по $Z_{ВП jr}^*(t)$ и $Z_{НП jr}^*(t)$:

$$\{\alpha_{ju}^*(t) \in Z_{ВП ju}^*(t)\}, u = b, d, f, \dots, m;$$

$$\{\alpha_{ju}^*(t) \in Z_{НП ju}^*(t)\}, u = a, c, e, g, \dots$$

Рассмотрим момент астрономического времени

$$t = T_{0\max R_1} + T_{R_1} < T_{R_1 \rightarrow R_2},$$

где $T_{0\max} = \max \{T_{0ju}^*\}$ ($u = a, b, c, \dots, m$) – момент образования или последнего изменения состава группы R_1 ; T_{R_1} – интервал времени непрерывного пребывания значений группы параметров или характеристик $\{\alpha_{ju}^*(t)\}$ в предупредительных областях до момента очередного изменения состава группы $T_{R_1 \rightarrow R_2}$.

Экспертный уровень $\text{Alarm}[t, R = m]$ угрозы возникновения катастрофы при миграции значений группы параметров (характеристик) может быть оценен дополнением до +1 результатов предварительной фаззификации времени T_{ju}^* по функциям принадлежности и последующего выполнения операций пересечения нечеткой логики [13, 14]:

$$Q_{\text{ВП}}(T_{R_i}) = \min \{Q_{\text{ВП}ju}(T_{R_i})\}, u = b, d, f, \dots, m$$

для $K_{\text{тау}}^* > 0$;

$$Q_{\text{НП}}(T_{R_i}) = \min \{Q_{\text{НП}ju}(T_{R_i})\}, u = a, c, e, g, \dots$$

для $K_{\text{тау}}^* < 0$;

$$\text{Alarm}[t, R = m] = 1 - \min \{Q_{\text{ВП}}(T_{R_i}), Q_{\text{НП}}(T_{R_i})\}.$$

Этот результат вполне согласуется с интуитивным инженерным представлением о том, что с увеличением числа критических параметров в предупредительных зонах уровень угрозы катастрофы возрастает.

Если экспертным путем определен или задан предельно допустимый уровень A_G^* угрозы возникновения катастрофы при движении группы значений по траектории без промежуточного возврата в рабочую область, то интервал времени ΔT_K , отсчитываемый от текущего момента астрономического времени t до ожидаемого момента наступления аварии $t_{\text{ав}G}$, может оцениваться на основе индивидуальных моментов времени перехода значений параметров (характеристик) в аварийные области

$$\Delta T_K = \min \{t_{\text{ав}ju} - t\}, u = a, b, c, \dots, m,$$

где $t_{\text{ав}ju} = T_{ju}^* + T_{0ju}$; $T_{ju}^* = \{1 - Q_{ju}^* (T = t_{\text{ав}ju} - T_{0ju})\}^{-1}$ при $\text{Alarm}ju(T^*) = A_R^*$.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что на макроструктурном уровне для семантического описания катастрофы достаточно эффективно применение древовидной сети сценариев, которая отображает концептуальную схему предметной и проблемной областей катастрофы и основывается на суждениях экспертов, их опыте и интуиции. Это позволяет вероятностными методами оценить потенциальные риски катастрофы с помощью двух количественных показателей, имеющих статистическую природу: первый – это уровень риска в виде вероятности возник-

новения явления в некоторой контрольной точке времени, второй – величина ожидаемого материального ущерба.

2. Для оценки возможных микросостояний по каждому из критических параметров объекта предложено применять аппарат нечеткой логики, экспертным путем задавать пределы (границы) допусков и функции принадлежности к областям безаварийного функционирования объекта.

3. Предложенная технология оценки катастрофы позволяет динамически отслеживать траектории миграции относительных значений параметров объекта и своевременно обеспечивать условия их принудительного возвращения в рабочую область штатного функционирования. При этом обеспечивается количественная оценка потенциальных рисков и динамики угроз возникновения катастроф в объектах производственного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постон, Р. Теория катастроф и ее приложения / Р. Постон, И. Стюарт. М.: Мир, 1980. 608 с.
2. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. М.: Наука, 1990. 128 с.
3. Том, Р. Структурная устойчивость и морфогенез / Р. Том. М.: Логос, 2002. 288 с.
4. Гулай, А. В. Экспертная логико-вероятностная модель интеллектуальной системы управления / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Наука и техника. 2014. № 1. С. 30–37.
5. Гулай, А. В. Концептуальные схемы предметных областей в технологии построения интеллектуальных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Электроника инфо. 2016. № 10. С. 56–61.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: Наука, 1969. 576 с.
7. Риордан, Дж. Вероятностные системы обслуживания / Дж. Риордан; пер. с англ. Е. Г. Коваленко. М.: Связь, 1966. 184 с.
8. Гулай, А. В. Дистанционное отображение сенсорной информации в базе данных интеллектуальной мехатронной системы / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Электроника инфо. 2015. № 2. С. 51–55.
9. Основы технической диагностики / В. В. Карибский [и др.]. М.: Энергия, 1976. 464 с.
10. Гулай, А. В. Оценка состояний системотехнической ситуации при адаптивном ситуационном управлении / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Теоретическая и прикладная механика: Междунар. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2016. Вып. 31. С. 214–220.

11. Питерс, Т. Основы. Тренды / Т. Питерс, М. Барлетта. СПб.: Изд-во Стокгольм. школы экон. в СПб., 2006. 160 с.
12. Мэрфи, Д. Технический анализ фьючерсных рынков / Д. Мэрфи. М.: Альпина Паблишер, 2011. 616 с.
13. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. М.: Мир, 1976. 165 с.
14. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. М.: Горячая линия, 2007. 288 с.

Поступила 15.06.2020

Подписана в печать 17.08.2020

Опубликована онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Poston R., Stewart I. (1978) *Catastrophe Theory and its Applications*. New York, Pitman. 491.
2. Arnold V. I. (1990) *Catastrophe Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg. 79. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96799-3>.
3. Thom R. (1989) *Structural Stability and Morphogenesis*. CRC Press. 404. <https://doi.org/10.1201/9780429493027>.
4. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2014) Expert Logical and Probabilistic Model of Intellectual Control System. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 30–37 (in Russian).
5. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2016) Conceptual Schemes of Subject Areas in the Technology of Building Intelligent Systems. *Elektronika-Info* [Electronics-info], (10), 56–61 (in Russian).
6. Venttsel E. S. (1969) *Theory of Probabilities*. Moscow, Nauka Publ. 576 (in Russian).
7. Riordan J. (1962) *Stochastic Service Systems*. NY, Wiley and Sons. 139.
8. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2015) Remote Display of Sensory Information in the Intelligent Mechatronic System Database. *Elektronika-Info* [Electronics-Info], (2), 51–55 (in Russian).
9. Karibskii V. V., Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S., Khalchev V. F. (1976) *Fundamentals of Technical Diagnostics*. Moscow, Energiya Publ. 464 (in Russian).
10. Gulay A. V., Zaytsev V. M. (2016) Evaluation of the System-Technical Situation States at the Adaptive Situational Control. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Mekhanika: Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Sb.* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, BNTU, 31, 214–220 (in Russian).
11. Peters T., Barletta M. (2006) *Fundamentals. Trends*. Saint-Petersburg, Publishing House of Stockholm Economics School in Saint-Petersburg. 160 (in Russian).
12. Murphy J. *Technical Analysis of the Financial Markets*. Moscow, Alpina Publisher Publ. 616 (in Russian).
13. Zadeh L. *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning*. Moscow, Mir Publ. 165 (in Russian).
14. Shtovba S. D. (2007) *Designing of Fuzzy Systems by Means of MatLab Facilities*. Moscow, Goryachaya Liniya Publ. 288 (in Russian).

Received: 15.06.2020

Accepted: 17.08.2020

Published online: 30.09.2020