

06
Д 54

ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Збірник наукових праць

Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Випуск 17

2020 – рік 90-річчя Університету!

2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Национального университета «Львівський державний університет імені Михайла Коцюбинського»
Львів

МОСТЫ ТА ТУНЕЛИ: ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА, ПРАКТИКА

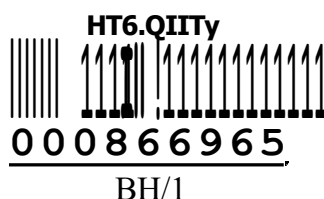
36 страниц. 1 иллюстрация.
Лекции по курсу «Мосты и тоннели»
для студентов специальности «Инженерное дело»
3-го курса. Львов, 2011

НАУКОВА БІБЛІОТЕКА

За 3-м підписом: 0. М. Ільїнська

Зачислено у 2011 році

Bunyc» 17



Львів
2020

YJU(624.21 + 624.19(066)

EEK 39.112

Ж 54

3ACHOBHHK TA BH,aABEI(l,:

L{HHIIOBCI>KHH HAQIOHAJil:,Hili YHHBEPCHTET 3AJI3HMtIHOrO TPAHCIIOPTY
IMEHI AK MIKA B. JIA3APfIIA

3amBepo:»ceuo o o opyzypiweHHRM B'lenoi'paou,l(11Jnp06cbKozo Hm1iona.Jl&Ho20 yniBepcumemy
3ajli:JHU'IHozo mpancnopmy iMeHi aKaOeMiKa B. JI mapma Bio 18.05.2020p., npomOKOPM 8

BKJ110'leHo o o IlepelliK)' nayKOBUX rj>axoBux Buoanb YKpai.ilu (Kamezopbi «E»)
HaKCI3OM *MiuicmepcmBa oceimu i* HayKu YKpaiiu Bio 28.12.2019p.N91643
(mexni1111i *cnetliaJlbHocmi-* 192)

To noea pe)laKU,IBHoi Pa.IUI)'HiBepcHTepu - .n;mcrop TexttiqJIHX Ha)'K 0. M IlwiHbKo

Pe.n;aKa;iifHa KonepiR:

ronoBHHH pe)laKTop - .JI;OKTOp TeXHicmix Hayx 0. JI. T10m&KiH
a¼noei.zlam.HHii ceICpeTap - H K EonoapeHKO

qJieHH pe,u;aKu;iitHoi Konepii:

.JI;OKTOp <pi3HKO-MaTeMaTHfHHX Hayic B. M AxyH006,
,n:orropH TexHitHHX Hayic IO. JI. BuHHUKOB, I'. 1 I'auKo,
C. M I'aneeB, H. H. JIY"Ko, M L Hemeca, B p. Ilempen,co,
A. A. IlJ1yzin, A. B. PaoKeeutt, A. C. CaMMAJlb, Bollllex <l>panyc,
.n;mcrop q>in:ocoq>ii AxMai> AAXijyp

A 54 MocTR Ta yYBejii: -reopm. .JI;OCJIYOKeHHI, npaICTBKa : 36ipHHK HayicoBHX npa .,(HinpoBCLICOpO Ha -
nioHapn.Horo yuiaepcHTe-ry 3ajU3HH'IHoro TpaHcnop-ry iMeHi aCaJJ;eMiKa B. JIa3apmm. - BH. 17. --
Jl;Hinpo, 2020. - 99 c.
ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)

Y CHTHX BHOBHTeji aaymai .IOCIJbceHHI, BHOBHTI aBTOpMH y JI(HinpoBCKOMY HHMOBHTOMY yHiaepcHTepi 3BJI3HH'IHoro
YnHCOOnTy iMeHi aay.CMixa B. JIa3apHHI Ta iHbix opaH3aBij(X. Cnn:ri .IIPHOBHTI BHpiweHHIO ainyam.HHX .IITHI B npo6ne11
no3payHXia, npo6ne11aHHI, 6yJIbBHQTa, etcnryanufl. Ta peKOHCTpyaui wocTia, T'HejjiB i HMHX iHneHephHX cnonyJI, 311epo-
BaHDI cyqachix 6yiaej11.HHX MaTepiaB i TexHOJIOia 6yJIbBHQTa, nowKy .IJUDUB nullBHkeHHI HazifiHocTi nt .IOIOBHCHH noa-
poBTIHOCTi imKeeephHX cnonyJI.

36ipHHK eayicoaHX npaCT. CIBOHHT urrepec .IJI npauiBemdB eacmnaTUIimnx i eayicoa-IJocminmx opaH3aIIOA, BHKJJananB
310aIB BHOCi OOBH, .IOCTOpamB, acnipamB, Maric-paHria TI .IDeHePHO-TCXHfHHX npauiBHIXB.

The articles reflect the scientific research carried out by the authors at the Dni o National University of Railway Transport
named after Academician V. Luaryan and other organizations. The articles are devoted to the solution of topical issues on the prob-
lems of calculations, design, construction, operation and reconstruction of bridges, tunnels and other engineering structures, the use of
modern building materials and construction technologies, the search for ways to increase reliability and extend the durability of engi-
neering structures.

The collection of scientific papers is of interest to workers of operational and research organizations, teachers of higher educa-
tional institutions, doctoral students, graduate students, undergraduates and engineering ad technical workers.

B CHTHX OTpaEaW Ha)'TITe HCIOIOBaHHI, BUIOMeHHWe 3BTOpMH B JI(HinpoBCKOM HHMOBHTOM YHHBepcHTeTC ICeji-3-
HOIOOnTOpO YpaHCIOOnT HMOH &KIMED B. JI3ap11aa H.IJpHX opaH3aBHX Cran.H .IOCBH(CHI peweHHJO 8nyJIJIi.HIX ao-
npocaa IO npo6neMae: paCTOB, npocTHPOBaHHI, CTpHTeJICTIB, 3KCTyATOBH H peKOHCTpyiHCK MOCTOB, TOHHIeA H OpoHX
HHKCHephHX COOpy)(Cmfl, npHMOCHH COBpeMeHHX CTpHTeJICTHX MaTepiaOB HTXHOJIOH CTpHTeJICTBa, IOCKY nyreA no-
aweHHI HHKCHOCTH HpoBHCHHI .IOIOBCTHOCTH HIOCHephWX coopY)Kemt.

C6opHHX Hay(HWX TII)OB .IJCICTaBIMCT HHTpec .IJI pa6oHmxoa 3KMyapaHOHHHX H HayHO-HCOJleJOBaTqJI.CCHX onum-
3EHA DpenoJlallaTqJI 3EBOCHT Bwewepo o6pa3OBHHI YCOHIX, .IOKTOpaTOB, acHpaHTB, MaHeapaHTOB H HIOCHephO-
TCXHfHHCHX pa6oHuroB.



ISSN 2413-6212 (Online), ISSN 2227-1252 (Print)

© JI:HinpoBCLK. HaJJ,)'H-T 3aJIOH.
,paHcn. iM. aCaJJ; B. JIa:iapum, 2020

266.965- 866.965- 61

ЗМІСТ

I. A. APYTIOIDIH, A. B. liAilAX, € . E. APYTIOIDIH METO,nonorm Orrr:HML3AUil 6Yt(IBEJihHOro BHP0:6HML..{IBA B YMOBAX II.UJibHOI 3AEY,AOBH.....	6
I. A. APYTIOIDIH, M. I. KOBAJIEHKO AJirOPHTM TA METO).JHKA BHPiIIEHIDI 3A,AAIiI 3AHe3TIEI1EHIDI liY,nIBEJibHMX 06'€KTIB MATEPWibHHMH PECYPCAMH 3 BPAXYBAIII-IJlIvt BIIJIHBY 11ACOBMX «b»AKTOPIB	13
A. A.)0>03.11; O. B. WTARmiPEW, T. M. TA, 0. B. rPOMOBAB fJEPCTIEKTHBH 3ACTOCYBAHIDI PE,AHCIEPCIAH.Hx IPOPOIIIK1B AJUI PEIYJil()BAI-II-UI BJIACHTHBOCTE'tt r m co BMX CYMillIE:A	22
B. B. KOBAJILtfYIC OLdHJ(A H E cy q o I 3.IIAIBOCTI TYHEJibHoro I.IDUIXOilPOBOW B METAJIEBHx r POBAHHX KOHCTPYI<IUA IIM m I m,fHAMJIIHHX HABAHTA)I{EHI, 3AJII3HWIHoro TPAHCilOPTY'''••..	28
A. A. JJ.YIII CO, T. I. liYBIDIK, I :6. KPABEQJ, MEXAHJ:IIHI IIPOQECH Y I'PYHTOBOMY MACHBI IIPH fOPH30ITTAJihIIIX BliPOEKAX (OfJ15Ut)	41
I. A, IIABJIOB, M. 0. DOJITABEUL, Ck. I. DABJIOB CHCTEMHE YilPAB.JIIHHJI OPrAHI3AUOOIO- TEXHOJIOIBHOIO ICTIO BliP06JIBliI-IX IIPOI]ECIB.B EY,nIBHIB.{fBI	53
B. A DETPEHI{O, JI, 0. J;AIDII:KOB, M. L HETECA rEOO>l3WIHI ,AOCIIJL,)ICEHIDI TA YKPIIIJIEHIDI IIAPYBATOrO TA BO,AOHACWIEHOfo II>YHTOBOfo MACHBY B YMOBAX ICMIBChKOfo METPOIIIOJITEHY	62
A. B. PA,IUCEBIN, II. IL JilfIIEBHA, K. M. MIIDYK. BH3HAlfii.HIDI KOHKYPEHT03,IIAr n o r o H AilP.HMKY BJ)IHOBJIEHIDI EKcfJJYATA.QlttHOI TIPHJIAIBOCTI M' .ffKliX TIOKPffIEJih	73
O. JL TIOTLKIИ, B. A. MIPOIIHHI(IIOPIBIDIJihHH:0' AHAI13 CTIEUWibHMX CHOC06ffi IIUJ; tIAC fIPOXO,AKH BEPTHKAJibfliX BHP060K	81
B. B. MAPOL.fKA, C. I. 00:6OIDKO IfIICEJihHHtt AHAIjil3 IIIJ;CHJIEHIDI JU]UIHOK 3 IIEP E:xmHHM IOKA3HHKOM)(OPCTKOCTI HA III,II XO.IIAX AO 3AJI13lffitIIMX MOCTffi	91

TABLE OF CONTENTS

I. A. ARIRIUNJAN, A. V. BANAKH, YE. E. ARUTIUNIAN METHODOLOGY OF OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION INDUSTRY UNDER DENSE DEVELOPMENT CONDITIONS	6
I. A. ARUTYUNYAN, M. G. KOVALENKO AN ALGORITHM AND TECHNIQUE FOR SOLVING THE PROBLEM OF PROVIDING CONSTRUCTION OBJECTS WITH MATERIAL RESOURCES, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF TIME FACTORS	13
A. A. DROZD, O.V. STEINBRECH, T. M. DEHTA, O. V. GROMOVA PROSPECTS FOR THE USE OF REDISPERSION POWDERS FOR THE REGULATION OF PROPERTIES OF GYPSUM MIXES	22
V. V. KOVALCHUK ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF THE TUNNEL UNDERPASS MADE OF METAL CORRUGATED STRUCTURES DURING DYNAMIC LOADS OF RAILWAY TRANSPORT	28
J. J. LUCHKO, T. I. BUBNYAK, I. B. KRAVETS MECHANICAL PROCESSES IN THE SOIL MASS FOR HORIZONTAL DEVELOPMENTS (REVIEW)	41
I. D. PAVLOV, M. O. POLTAVETS, F. I. PAVLOV SYSTEM MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL- TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF PRODUCTION PROCESSES IN BUILDING	53
V. D. PETRENKO, D. O. BANNIKOV, M. I. NETESA GEOPHYSICAL STUDIES AND STRENGTHENING A LAYERED AND WATER-SATURATED SOIL MASS IN THE KYIV METRO CONDITIONS	62
A. V. RADKEVICH, P. P. BICHEVOY, E. N. MISHUK DETERMINATION OF THE COMPETITIVE DIRECTION OF RESTORATION OF OPERATIONAL SUITABILITY OF SOFT ROOFS	73
O. L. TIUTKIN, V. A. MIROSHNYK COMPARATIVE ANALYSIS OF SPECIAL METHODS DURING VERTICAL WORKS	81
V.V.MAROCHKA,S.H.BOBOSHKO NUMERICAL ANALYSIS OF REINFORCEMENT OF SECTIONS WITH TRANSITIONAL RIGIDITY ON APPROACHES TO RAILWAY BRIDGES	91

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 711.4:519.168:[658.5.012.34:69]

І. А. АРУТЮНЯН^{1*}, А. В. БАНАХ², Є. Е. АРУТЮНЯН³

^{1*} Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (066) 900 78 28, ел. пошта iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

² Кафедра міського будівництва і господарства, Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. + 38 (095) 0762862, ел. пошта andrew.banakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0517-2157

³ Кафедра міського будівництва і господарства, Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (095) 599 11 56, ел. пошта arutyanyanegen@gmail.com, ORCID 0000-0002-0502-6651

МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ ЩІЛЬНОЇ ЗАБУДОВИ

Мета. Дослідження теоретико-методологічних основ розвитку та функціонування будівельної галузі в розрізі застосування інструменту логістики та системотехніки, як сучасного підґрунтя вирішення організаційно-технологічних завдань, враховуючи умови щільної міської забудови та суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України. **Методика.** Важливу роль в організації будівельного виробництва займає можливість застосування сучасних методів та механізмів будівельної логістики та системотехніки. У сучасних умовах розвитку та функціонування будівельної галузі виникає потреба у застосуванні інноваційних методів в управлінні та організації будівельних процесів в умовах щільної міської забудови. У цих умовах особливої актуальності набуває застосування концепції логістики у будівництві, враховуючи функціонально-планувальну інфраструктуру міст України. **Результати.** В роботі проведено аналіз сучасного стану організації будівництва в умовах щільної міської забудови, враховуючи функціонально-планувальну інфраструктуру міст України, який чітко дає зрозуміти про необхідність застосування інструментарію заснованого на підґрунті знань «логістики» та «системотехніки», це в разі удосконалив організаційні процеси будівельного виробництва. Застосувавши принципів та відповідних концепції логістики дозволить сформувати систему поглядів на вдосконалення процесів організації будівельного виробництва, враховуючи умови щільної міської забудови, суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України та стан мереж автомобільних доріг, шляхом оптимального управління потоко-ресурсами. Все це ефективно вплине на розвиток будівельної галузі на рівні країн Євросоюзу. **Наукова новизна.** Сформовано теоретико-методологічні напрямки на базі інструменту логістики та системотехніки, як сучасного інноваційного підґрунтя вирішення організаційно-технологічних завдань будівельного виробництва, враховуючи умови щільної міської забудови та суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України. **Практична значимість.** Застосування сучасного науково-методичного інструментарію заснованого на використанні галузі знань «логістики», що дає можливість формування механізму вибору раціональних управлінських рішень, спрямованих на вирішення організаційно-технологічних завдань будівельного виробництва враховуючи умови щільної міської забудови та суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України.

Ключові слова: будівельна галузь; логістика; системотехніка; щільна забудова; функціонально-планувальна інфраструктура; організаційно-технологічні завдання

Вступ

Перехід до ринкових відносин супроводжується глибокими перетвореннями як в самих будівельних організаціях, так і в середовищі їх функціонування у будівельному комплексі.

У сучасних умовах розвитку та функціонування будівельної галузі виникає потреба у застосуванні інноваційних методів управління та організації будівельних процесів в умовах щільної міської забудови. У цих умовах особ-

ливої актуальності набуває застосування концепції логістики у будівництві, враховуючи функціонально-планувальну інфраструктуру міст України. У межах будівельного виробництва в умовах щільної забудови є концепції логістики, які дозволяють покращити методи управління та організації будівництва, застосовуючи логістичні потоки та процеси, які відбуваються на певній території враховуючи умови забудови. Логістика стає інструментом, що забезпечує оптимізацію та раціоналізацію умов

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

управління та організації будівельного виробництва враховуючи інфраструктуру міста та мережу автомобільних доріг згідно з роботами (Абрамов, & Минаєнкова, 1999; Moller, & Johansen, 2005; Jonsons, & Wood, 2007; Кудрицька, 2010; Авдєєва, & Тустановська, 2016; Кулицький, 2017; Банах, & Полтавець, 2019). Враховуючи і мережу автомобільних доріг міста, як одну із складових логістичного інструментарію (логістичних концепцій), що дає ефект з розширення економічних зв'язків між ланками будівельного комплексу (будівельна, промислово-виробнича та інфраструктурна ланки).

Все наведене об'єктивно вказує на нагальну необхідність поглибленого дослідження теоретичних, методологічних і практичних здобутків, що в цілому дозволить наростити потенціал будівельних організацій.

В умовах сьогодення більш актуальним є можливість застосування логістичних та системотехнічних підходів до вирішення організаційно-технологічних завдань будівельного виробництва, враховуючи умови щільної міської забудови та суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України.

Мета

Згідно проаналізованої проблеми витікає необхідність в більш детальному дослідженні програм розвитку будівельної галузі в розрізі застосування інструменту логістики та системотехніки, що є суттєвим чинником покращення методів управління та організації будівельних процесів, враховуючи умови щільної міської забудови та функціонально-планувальну інфраструктуру міст України.

Методика

Трансформація ринково-економічних стосунків суб'єктів будівельного комплексу потребує суттєвих реформувань, які дозволять активізувати ефективний розвиток будівельної галузі на рівні країн Євросоюзу (Кирнос, Залунин, & Дадиверина, 2005; Беркута, Осинська, Галінський, & Вахович, 2010).

Необхідною умовою використання принципу оптимальності до вирішення організаційно-технологічних завдань будівельного виробництва, враховуючи умови щільної міської забудови та суттєві чинники функціонально-

планувальної інфраструктури міст України, є гнучкість, альтернативність виробничо-господарських ситуацій та транспортних мереж, в умовах яких необхідно приймати раціональні управлінські рішення. У зв'язку з цим практика організації будівельного виробництва має потребу в адекватному економічному інструментарії – логістика, що дозволяє більш ефективно використати науковий потенціал, і в подальшому розвитку і розробці інструментів аналізу методів і моделей формування організаційно-технологічних рішень будівельного виробництва враховуючи основний факт це функціонально-планувальну інфраструктуру міст. Оцінка стану питання традиційних моделей управління та організації будівельного виробництва здобуває особливу актуальність, на основі методів і принципів аналізу досліджень галузі будівництва, присвячені праці В. М. Кірноса, В. Р. Млодецького, І. Д. Павлова, В. О. Поколенка, А. В. Радкевича, В. Н. Стаханова, В. І. Торкатюка, О. А. Тугая, Р. Б. Тяна та інші. Незважаючи на високий рівень професіоналізму названих науковців, ще існує широкий спектр проблем щодо удосконалення процесів управління та організації будівельного виробництва на базі логістичних та системотехнічних підходів.

Вирішенню складних організаційно-технологічних завдань будівельного виробництва, враховуючи умови щільної міської забудови та суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України, сприяють системотехнічні та логістичний підходи (Стаханов, В. Н. (Ред.), 1998; Арутюнян, 2013; Павлов, Полтавець, & Павлов, 2018; Арутюнян, 2019).

Проблеми будівельного виробництва в умовах щільної міської забудови з урахуванням функціонально-планувальної інфраструктури міст покликана вирішувати не тільки логістика, але і системотехніка і між ними простежується об'єктивний зв'язок. Так за визначенням системотехніки – наука, що вивчає організаційні, технічні, економічні та інші виробничі системи і міжсистемні зв'язки (Арутюнян, І. А. (Ред.), 2017; Павлов, Полтавець, & Павлов, 2018; Арутюнян, 2019), що сприяють досягненню результатів діяльності. Сучасні проблеми виробництва є суто системотехнічними, що виникають на стику окремих систем або підсистем. Всі про-

блеми взаємозв'язані, взаємодоповнюють один одного, а їх вивчення і рішення повинні бути суто системотехнічними.

Але важливу роль у своєчасному та якісному виконанні будівельних процесів грають комерційні служби, тобто промислово-виробнича ланка будівельного комплексу, яка відповідає за забезпечення матеріально-технічними потоко-ресурсами будівельних об'єктів, враховуючи міську забудову, функціонально-планувальну інфраструктуру та мережу автомобільних доріг. Збої в матеріально-технічному забезпеченні приводять до цілого ряду негативних моментів: зриваються графіки будівництва; виникають втрати робочого часу робочих; з'являються простої будівельних машин і устаткування; зростає вартість будівництва; не виконуються договірні зобов'язання; падає авторитет фірми (Радкевич, & Арутюнян, 2014; Арутюнян, І. А. (Ред.), 2017).

Тому управління організаційними процесами будівельного виробництва полягає, перш за все, в забезпеченні матеріальними потоками будівельних ресурсів (Абрамов, & Минаєнкова, 1999; Кирнос, Залуїн, & Дадиверина, 2005; Арутюнян, 2013; Радкевич, & Арутюнян, 2014; Арутюнян, І. А. (Ред.), 2017).

Дослідивши визначення терміну «логістика» вітчизняними і зарубіжними вченими-фахівцями у багатьох наукових працях (Стаханов, В. Н. (Ред.), 1998; Арутюнян, 2013; Радкевич, & Арутюнян, 2014; Арутюнян, І. А. (Ред.), 2017), ми прийшли до висновку, що більш за все будівельній галузі, в розрізі управління та організації будівельними процесами, гармонує термін «логістика» – наука про організацію, планування, управління і контроль за рухом матеріальних і супроводжуючих їх інформаційних, фінансових потоків на основі системного підходу в будь-яких логістичних системах (Стаханов, В. Н. (Ред.), 1998; Арутюнян, 2019).

Результати

Дослідивши існуючі методи організації будівельного виробництва ми ще раз переконалися в тому, що необхідно впроваджувати інструментарій логістики та системотехніки, враховуючи умови щільної міської забудови, суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України та стан мереж автомобільних доріг; це дозволить вирішувати складні організаційно-технологічні завдання (рис. 1).



Рис. 1. Інструмент логістики та системотехніки як підґрунтя вирішення організаційно-технологічних завдань

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Принципи логістики дозволяють:

1. Саморегулювання (збалансованість будівельного виробництва).
2. Гнучкість (можливість внесення змін в графік закупівлі матеріалів, зміна в термінах постачання будівельних матеріалів, конструкцій, деталей).
3. Мінімізація об'ємів запасів будівельних матеріалів, конструкцій, деталей.
4. Моделювання руху матеріальних потоків будівельних матеріалів, конструкцій, деталей.
5. Управління матеріальними потоками будівельних матеріалів, конструкцій, деталей.
6. Надійність в забезпеченні будівельними матеріалами, конструкціями, деталями.
7. Економічність (скорочення рівня запасів будівельних ресурсів, а також враховуючи дефіцит ресурсів).
8. Розрахунок раціонального плану маршрутизації (мінімізація транспортних витрат, своєчасна доставка будівельних ресурсів на будівельні майданчики).
9. Раціональний вибір постачальника, враховуючи якість ресурсів, цінову політику, достовірність.

Застосовувавши принципи та відповідні концепції логістики ми можемо сформулювати систему поглядів на вдосконалення процесів організації будівельного виробництва, враховуючи умови щільної міської забудови, суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України та стан мереж автомобільних доріг, шляхом оптимального управління потоком-ресурсами.

Розглянемо можливість концепції «Точно-вчасно». Логістична концепція «Just-In-Time» (JIT), що й перекладається як «Точно-вчасно», є найбільш поширеною. Її поява відноситься до кінця 50-х років минулого століття. Одна з перших спроб упровадження концепції «Точно-вчасно» – система КАНБАН (Стаханов, В. Н. (Ред.), 1998; Арутюнян, 2013).

Графік постачань за схемою «точно-вчасно», разом з тим, сприяє концентрації основних постачальників будівельних ресурсів. Для цієї концепції взагалі важлива невелика кількість постачальників, що відрізняються високим ступенем надійності, а при реалізації концепції JIT («Точно-вчасно») постачальники стають по суті партнерами будівельних органі-

зацій (Стаханов, В. Н. (Ред.), 1998; Арутюнян, 2013).

Застосування даної концепції в будівництві дозволить:

- значно поліпшити умови організації будівельного виробництва;
- знизити собівартість будівельного виробництва;
- практично скоротити страхові запаси;
- прискорити оборотність оборотного капіталу будівельної фірми;
- відмовитись частино, або повністю від складських приміщень;
- скоротити термін будівництва.

Наукова новизна та практична значимість

Базовими системами, заснованими на концепції RP у виробництві та постачанні, є системи MRP I і MRP II – Materials Requirements Planning / Manufacturing Resource Planning: система планування потреб в матеріалах / Виробниче планування потреб у ресурсах), а в розподілі DRP I і DRP II – Distribution Requirements Planning / Distribution Resource Planning: системи планування розподілу продукції і розподілу ресурсів відповідно (Стаханов, В. Н. (Ред.), 1998; Арутюнян, 2013).

Основними цілями MRP є:

- задоволення потреб в матеріалах, конструкцій та виробів для планування будівельного виробництва;
- підтримка низьких рівнів запасів будівельних ресурсів, незавершеного виробництва, готової будівельної продукції;
- планування будівельного виробництва, розкладу доставки, закупівельних операцій.

Система MRP починає свою роботу з визначення, строку будівництва, потім визначається час і необхідна кількість будівельних ресурсів для задоволення потреб будівельного виробництва, враховуючи етапи будівництва.

Розглянуті концепції дозволять вирішити складні організаційно-технологічних завдання, враховуючи умови щільної міської забудови та суттєві чинники функціонально-планувальної інфраструктури міст України.

Висновки

Сформовано теоретико-методологічні напрямки на базі застосування сучасного науко-

во-методичного інструментарію, заснованого на використанні галузі знань «логістика», що дає можливість формування механізму вибору раціональних управлінських рішень, спрямованих на вирішення складних організаційно-технологічних завдань будівельного виробництва, враховуючи умови щільної міської забудови, суттєві чинники та особливості функціонально-планувальної інфраструктури міст України, а також стан мережі автомобільних доріг.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Jonsons, J. C., & Wood, D. F. (2007). *Contemporary Logistics*. New York: MacMillan.
- Moller, C., & Johansen, J. (2005). *Paradigms in Logistics*. Department of Production. Denmark: University of Aalborg.
- Абрамов, Л. И., & Минаенкова, Э. А. (1999). *Организация и планирование строительного производства. Управление строительной организацией*. Москва: Стройиздат.
- Авдеева, М. С., & Тустановська, Л. В. (2016). Особливості проектування житлових будинків в умовах щільної забудови. *Проблеми розвитку міського середовища*, 2, 3-9.
- Арутюнян, І. А. (2013). *Організація та управління будівельним комплексом на основі логістичних моделюючих умов*. Запоріжжя: ЗДІА.
- Арутюнян, І. А. (Ред.). (2017). *Наукові основи розвитку будівельної галузі України*. Запоріжжя: Запорізька державна інженерна академія.
- Арутюнян, І. А. (2019). Управління потоковими процесами в організаційно-технологічно-економічних системах підприємств будівельної галузі з метою підвищення їх конкурентоспроможності в умовах нестійкого ринку. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 39, 71-78.
- Банах, А. В., & Полтавець, М. О. (2019). Аналіз взаємного впливу параметрів природної та антропогенної містобудівних систем. *Містобудування та територіальне планування*, 69, 8-13.
- Беркута, А. В., Осинська, В. А., Галінський, О. М., & Вахович, І. В. (2010). Організаційні та економічні аспекти зарубіжного досвіду саморегулювання в будівництві. *Будівельне виробництво*, 52, 3-8.
- Кирнос, В. М., Залунин, В. Ф., & Дадиверина, Л. Н. (2005). *Организация строительства*. Днепропетровск: Пороги.
- Кудрицька, Н. В. (2010). *Транспортно-дорожній комплекс України: сучасний стан, проблеми та шляхи розвитку*. Київ: Національний транспортний університет.
- Кулицький, С. (2017). Проблеми розвитку мережі автомобільних доріг в Україні. *Україна: події, факти, коментарі*, 22, 56-65.
- Стаханов, В. Н. (Ред.). (1998). *Логистическая организация капитального строительства*. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет.
- Павлов, І. Д., Полтавець, М. О., & Павлов, Ф. І. (2018). Системологічне управління виробничими системами в будівництві. *Наукові вісті Дніпровського університету* (електронне наукове фахове видання), Сєверодонецьк, 14. URL: https://nvdu.000webhostapp.com/arxiv/2018_14/pdf/12.pdf
- Радкевич, А. В., & Арутюнян, І. А. (2014). Організація системи матеріального забезпечення будівництва. *Наука та прогрес транспорту*, 3 (51), 146-159.

И. А. АРУТЮНЯН^{1*}, А. В. БАНАХ², Е. Э. АРУТЮНЯН³

^{1*} Кафедра промышленного и гражданского строительства, Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (066) 900 78 28, эл. почта iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

² Кафедра городского строительства и хозяйства, Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. + 38 (095) 0762862, эл. почта andrew.banakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0517-2157

³ Кафедра городского строительства и хозяйства, Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (095) 599 11 56, эл. почта arutyanevgen@gmail.com, ORCID 0000-0002-0502-6651

МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ УПЛОТНЕННОЙ ЗАСТРОЙКИ

Цель. Исследование теоретико-методологических основ развития и функционирования строительной отрасли в разрезе применения инструмента логистики и системотехники, как современной основы решения организационно-технологических задач с учетом условий уплотненной городской застройки и существенных факторов функционально-планировочной инфраструктуры городов Украины. **Методика.** Важную роль

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

в организации строительного производства занимает возможность применения современных методов и механизмов строительной логистики и системотехники. В современных условиях развития и функционирования строительной отрасли возникает потребность в применении инновационных методов управления и организации строительных процессов в условиях уплотненной городской застройки. В этих условиях особую актуальность приобретает применение концепций логистики в строительстве с учетом функционально-планировочной инфраструктуры городов Украины. **Результаты.** В работе проведен анализ современного состояния организации строительства в условиях уплотненной городской застройки с учетом функционально-планировочной инфраструктуры городов Украины, который четко дает понять о необходимости применения инструментария основанного на базе «логистики» и «системотехники», что в разы усовершенствует организационные процессы строительного производства. Применение принципов и соответствующих концепций логистики позволит сформировать систему взглядов на совершенствование процессов организации строительного производства, учитывая условия уплотненной городской застройки, существенные факторы функционально-планировочной инфраструктуры городов Украины и состояние сетей автомобильных дорог, путем оптимального управления потоко-ресурсами. Все это эффективно повлияет на развитие строительной отрасли на уровне стран Евросоюза. **Научная новизна.** Сформированы теоретико-методологические направления на базе инструмента логистики и системотехники, как современной инновационной основы решения организационно-технологических задач строительного производства, учитывающих условия уплотненной городской застройки и существенные факторы функционально-планировочной инфраструктуры городов Украины. **Практическая значимость.** Применение современного научно-методического инструментария, основанного на использовании отрасли знаний «логистика» дает возможность формирования механизма выбора рациональных управленческих решений, направленных на решение организационно-технологических задач строительного производства, учитывая условия плотной городской застройки и существенные факторы функционально-планировочной инфраструктуры городов Украины.

Ключевые слова: строительная отрасль; логистика; системотехника; уплотненная застройка; функционально-планировочная инфраструктура; организационно-технологические задачи

I. A. ARUTIUNIAN^{1*}, A. V. BANAKH², YE. E. ARUTIUNIAN³

^{1*} Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave., Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, phone +38 (066) 9007828, e-mail iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

² Department of Urban Engineering and Development, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave., Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, phone + 38 (095) 0762862, e-mail andrew.banakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0517-2157

³ Department of Urban Engineering and Development, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave., Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, phone +38 (095) 5991156, e-mail arytynyanegen@gmail.com, ORCID 0000-0002-0502-6651

METHODOLOGY OF OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION INDUSTRY UNDER DENSE DEVELOPMENT CONDITIONS

Purpose. The research of theoretical and methodological foundations of development and functioning of the construction industry in the context of using the tool of logistics and systems engineering as a modern basis for solving organizational and technological problems within the dense urban development conditions and significant factors of the functional and planning infrastructure of Ukrainian cities. **Methodology.** An important role in the organization of construction industry plays the ability to apply modern methods and mechanisms of construction logistics and systems engineering. In the modern conditions of development and functioning of the construction industry there is a need to apply innovative methods of management and organization of building processes in the conditions of dense urban development. In these conditions, the application of the concept of logistics in construction becomes especially relevant within the functional and planning infrastructure of Ukrainian cities. **Findings.** The analysis of the current state of the organization of construction in a dense urban development conditions within the functional and planning infrastructure of Ukrainian cities, which is clearly make the need for the use of tools based on the basis of knowledge of «logistics» and «systems engineering», that significantly improves the organizational processes of construction industry. Applying the principles and corresponding concepts of logistics, it will allow to form a system of views on the improvement of the processes of organization of construction industry within the dense urban development conditions, significant factors of functional and planning infrastructure of Ukrainian cities and the state of road network, through optimal flow-resource management. All of this will effectively raise the development of the construction industry at EU level. **Originality.** Theoretical and methodological directions on the basis of the tool

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

of logistics and systems engineering, as a modern innovation basis for solving organizational and technological problems of construction industry within the dense urban development conditions and significant factors of functional and planning infrastructure of Ukrainian cities are formed. **Practical value.** The use of modern scientific and methodological tools based on the knowledge in the field of «logistics», that gives the opportunity to form a mechanism for choosing rational management decisions aimed at solving of organizational and technological problems of construction industry within the dense urban development conditions and significant factors of functional and infrastructure.

Keywords: construction industry; logistics; systems engineering; dense development; functional and planning infrastructure; organizational and technological tasks

REFERENCES

- Jonsons, J. C., & Wood, D. F. (2007). *Contemporary Logistics*. New York: MacMillan. (in English)
- Moller, C., & Johansen, J. (2005). *Paradigms in Logistics*. Department of Production. Denmark: University of Aalborg. (in English)
- Abramov, L. I., & Minaenkova, Ye. A. (1999). *Organizacija i planirovanie stroitel'nogo proizvodstva. Upravlenie stroitel'noj organizaciej*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Avdjjeva, M. S., & Tustanovska, L. V. (2016). Osoblyvosti proektuvannja zhytlovykh budynkiv v umovakh shhil'noji zabudovy. *Problemy rozvytku misjkogho seredovysha*, 2, 3-9. (in Ukrainian)
- Arutjunjan, I. A. (2013). *Orghanizacija ta upravlinnja budivelnym kompleksom na osnovi loghistychnykh modeljujuchykh umov*. Zaporizhzhja: ZDIA. (in Ukrainian)
- Arutjunjan, I. A. (Red.). (2017). *Naukovi osnovy rozvytku budivelnjoi ghaluzi Ukrainy*. Zaporizhzhja: Zaporizkja derzhavna inzhenerna akademija. (in Ukrainian)
- Arutjunjan, I. A. (2019). Upravlinnja potokovymy procesamy v orghanizacijno-tekhnologichno-ekonomichnykh systemakh pidpryjemstv budivelnjoi ghaluzi z metoju pidvyshhennja jikh konkurentospromozhnosti v umovakh nestijkogho rynku. *Shljakhy pidvyshhennja efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannja rynkovykh vidnosyn*, 39, 71-78. (in Ukrainian)
- Banakh, A. V., & Poltavecj, M. O. (2019). Analiz vzajemnogho vplyvu parametriv pryrodnoji ta antropoghennoji mistobudivnykh system. *Mistobuduvannja ta terytorijne planuvannja*, 69, 8-13. (in Ukrainian)
- Berkuta, A. V., Osyns'ka, V. A., Ghalins'kij, O. M., & Vakhovych, I. V. (2010). Orghanizacijni ta ekonomichni aspekty zarubiznogho dosvidu samoreghuljuvannja v budivnytvi. *Budivelnje vyrobnytstvo*, 52, 3-8. (in Ukrainian)
- Kirnos, V. M., Zalunin, V. F., & Dadiverina, L. N. (2005). *Organizacija stroitel'stva*. Dnepropetrovsk: Porogi. (in Russian)
- Kudryc'ka, N. V. (2010). *Transportno-dorozhnij kompleks Ukrainy: suchasnyj stan, problemy ta shljakhy rozvytku*. Kyjiv: Nacional'nyj transportnyj universytet. (in Ukrainian)
- Kulyc'kij, S. (2017). Problemy rozvytku merezhi avtomobilnykh dorog v Ukraini. *Ukraina: podiji, fakty, komentari*, 22, 56-65. (in Ukrainian)
- Stahanov, V. N. (Red.). (1998). *Logisticheskaja organizacija kapital'nogo stroitel'stva*. Rostov-na-Donu: Rostovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet. (in Russian)
- Pavlov, I. D., Poltavecj, M. O., & Pavlov, F. I. (2018). Systemologichne upravlinnja vyrobnychymy systemamy v budivnytvi. *Naukovi visti Dalivsjkogho universytetu* (elektronne naukove fakhove vydannja), Sjevjerodoneck, 14. URL: https://nvdu.000webhostapp.com/arxiv/2018_14/pdf/12.pdf. (in Ukrainian)
- Radkevych, A. V., & Arutjunjan, Y. A. (2014). Orghanizacija systemy materialnogho zabezpechennja budivnytstva. *Nauka ta prohres transportu*, 3 (51), 146-159. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 26.03.2020.

Прийнята до друку 24.04.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 658.5:69:[519.168]

І. А. АРУТЮНЯН^{1*}, М. Г. КОВАЛЕНКО²

^{1*} Кафедра «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38(066) 900 78 28, ел. пошта iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

² Кафедра «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, вул. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38(096) 076 00 59, ел. пошта kmg.zp.city@gmail.com, ORCID 0000-0002-8044-5792

АЛГОРИТМ ТА МЕТОДИКА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ МАТЕРІАЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЧАСОВИХ ФАКТОРІВ

Мета. Складання алгоритму вирішення задачі забезпечення будівельних об'єктів матеріальними ресурсами з врахуванням впливу часових факторів в будівництві, для визначити цільової функції на транспортування будівельних матеріалів з врахуванням додаткових витрат. **Методика.** Аналіз наукових праць дає змогу сказати, що існуючі алгоритми вирішення задач забезпечення матеріальними ресурсами в повній мірі не охоплюють всіх детермінованих та недетермінованих факторів впливу будівельної галузі, що викликає необхідність у створенні нового алгоритму вирішення таких задач з врахуванням всіх особливостей будівельної галузі. **Результати.** Результатами даної роботи, є складання нового алгоритму та методики вирішення задач забезпечення будівельних об'єктів матеріальними ресурсами з врахуванням часових факторів. Даний алгоритм дає змогу визначити цільову функцію на забезпечення будівельних об'єктів матеріальними ресурсами, з врахуванням додаткових витрат від простою транспортної, будівельної чи обох організацій одночасно. **Наукова новизна.** Даний алгоритм та методика вирішення задач забезпечення будівельних об'єктів матеріальними ресурсами з врахуванням часових факторів розроблено вперше. **Практична значимість.** Даний алгоритм та методика дає змогу визначити реальну цільову функцію завдання постачання матеріальних ресурсів на будівельний об'єкт з додатковими витратами на простої.

Ключові слова: детерміновані фактори; недетерміновані фактори; транспортування; затримки в часі; будівництво; алгоритм; оптимізаційно-організаційні процеси

Вступ

При формулюванні цільової функції організаційно-технологічного завдання велику роль відіграє врахування всіх можливих факторів впливу на цільову функцію, оскільки саме цільова функція відображає збитки чи прибуток будівельної фірми (підприємства, організації).

Через випадкові та непередбачувані фактори та чинники можуть спричинити великі збитки як малому так і великому бізнесу будівельної галузі (Смирнова, 2008; Кузьмін, 2014; Косенко, 2017). Найчастіше перераховані фактори впливають на час, а саме викликають затримки, що в свою чергу створюють простой і як наслідок додаткові витрати будівельного виробництва.

У роботах (Коробов, 2002; Бронштейн, & Заико, 2010; Казаков, & Лемперт, 2011; Плотников, & Подвальный, 2012; Гладков, & Гладкова, 2014) були наведені алгоритми вирішення транспортних задач з врахуванням випадкових затримок в часі, але ці алгоритми є загальними,

і як наслідок, вони не відображають повної картини збитку від затримок в залежності від галузі будівельного комплексу та будівельної галузі в цілому.

У роботах (Кирнос, Залунин, & Дадиверина, 2005; Агуреев, Митюгин, & Пышный, 2014; Радкевич, & Арутюнян, 2014; Павлов, Полтавець, & Павлов, 2018) було розглянуто основні особливості будівельного комплексу при формуванні транспортних систем з врахуванням детермінованих та недетермінованих факторів.

Мета

Складання алгоритму вирішення задачі забезпечення будівельних об'єктів матеріальними ресурсами з врахуванням впливу часових факторів, за рахунок аналізу існуючих алгоритмів вирішення задач транспортування матеріалів, аналізу детермінованих та недетермінованих факторів впливу на постачання матеріалу у будівельному комплексі та враховуючи їх вплив на час транспортування визначити цільову фу-

нкцію на транспортування будівельних матеріалів з врахуванням додаткових витрат.

Методика

Для визначення особливостей, що впливають на часові характеристики при складанні задач з транспортування матеріалів у будівельному комплексі, слугували наукові роботи авторів Павлов І. Д., Агурєєв І. Є., Радкевич А. В., Мітюгін В. А., Пишний В. А., де було розглянуто детерміновані та недетерміновані фактори, що явно чи неявно впливають на часові характеристики задач.

Платформою для складання алгоритму (методики) вирішення задачі забезпечення будівельних об'єктів матеріальними ресурсами з врахуванням впливу часових факторів (характеристик), слугували вже існуючі алгоритми вирішення задач з транспортування матеріалів, які були наведені в наукових роботах авторів Косенко О. В., Гладков Л. А., Александров А. Е., Бронштейн Е. М. та ін.

Але зважаючи на особливості будівельної галузі, наведені алгоритм не можуть в повній мірі врахувати вплив факторів затримки в часі. Саме не здатність існуючих алгоритмів вирішити поставлене питання слугувало основою для розробки нового алгоритму вирішення задач забезпечення будівельних об'єктів матеріалами з врахуванням впливу часових факторів.

Існуючі алгоритми вирішення задач з забезпечення матеріальними ресурсами з врахуванням впливу часових факторів (характеристик) в повній мірі не можуть враховувати особливостей кожної галузі.

Окрім різниці в основних детермінованих та недетермінованих факторах, будівельна галузь має свої часові обмеження в залежності від матеріалу, типи роботи чи характеристик машин та механізмів. Так, затримка постачання бетонної суміші, може викликати втрату неї необхідної пластичності, що унеможливить її використання в бетононасосі і, як наслідок, спричинить великі збитки.

В даній статті буде складено новий алгоритм вирішення задач з забезпечення будівельних об'єктів матеріальними ресурсами з врахування часових факторів (характеристик), за допомогою якого, можливо більш повно оцінити збитки від простою, затримок та втрати будівельних матеріалів.

Результати

В роботах (Левин, 2012; Арутюнян, & Коваленко, 2019) було розглянуто основні детерміновані та недетерміновані фактори, що можуть впливати на складання математичної моделі задач оптимізаційно-організаційних процесів в будівництві.

Для того, щоб визначити вплив кожного фактору на цільову функцію, при транспортуванні матеріальних ресурсів до будівельного об'єкту, необхідно розглядати кожний класифікований фактор окремо. В даній статті буде розглянуто вплив затримки в часі при транспортуванні матеріальних ресурсів на цільову функцію вартості будівельного об'єкту.

Згідно Левину (2012) частина факторів, що впливають на час транспортування можуть бути віднесені як до детермінованих, так і до недетермінованих.

До детермінованих факторів відносяться: час очікування в черзі, навантаження та розвантаження, оформлення документів та ін.), кількість перевезень на один транспортний засіб (при збільшенні кількості доставок, важко прорахувати час, від першого до другого споживача і до останнього).

До недетермінованих факторів відносяться: поломки транспорту; аварії; погодні умови; при великих відстанях транспортування заздалегідь дуже важко визначити стан дороги; час завантаження та розвантаження; час який транспорт перебуває у споживача після розвантаження; простой через невивлати; поломки машин та механізмів; неякісні матеріали; затримки в субпідрядних організаціях; затримка та залежність від державних органів (акт на відкриття будівництва, органи мереж електро- та газопостачання); корегування проектно-кошторисної документації в залежності від вибраних матеріалів або побажань замовника.

Нехай час транспортування матеріалу в загальному вигляді буде t_i , тоді час транспортування в певний проміжок буде $\tau_{ij}(t_i)$ з початком в точці τ_i та кінцем в точці τ_j . Оскільки час транспортування матеріалу впливають різні фактори, позначмо $\phi_{ij}(t_i)$ як випадковий проміжок часу, який в залежності від різних чинників може змінювати знак. Тоді загальний розкид в часі в певний проміжок матиме вигляд лінійної функції $\tau_{ij}(t_i) \pm \phi_{ij}(t_i)$. У першому випадку, коли

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$\tau_{ij}(t_1) + \varphi_{ij}(t_1)$, функція матиме залежність затримки, тобто збільшення часу транспортування і як наслідок додаткові витрати на простой будівельної організації. У другому випадку, коли $\tau_{ij}(t_1) - \varphi_{ij}(t_1)$, функція матиме залежність раннього прибуття, тобто виникають додаткові витрати на затримку транспорту.

Також необхідно враховувати, що є певні обмеження на максимальний ($t_{\max}$) та мінімальний ($t_{\min}$) час транспортування будівельних матеріалів. Це пов'язано з особливістю будівельної галузі, оскільки, наприклад, при запізненні транспортування бетонної суміші, вона може втратити необхідну пластичність, і її доставка через бетононасос унеможливується. І навпаки, не можна привезти бетонну суміш раніше зведеної опалубки, оскільки може виникнути затримка на возведення опалубки, і бетонна суміш буде стояти в міксері, що знову ж таки може призвести до втрати бетонної суміші необхідних характеристик.

Графік характерної функції $\tau_{ij}(t_1) \pm \varphi_{ij}(t_1)$ показано на рис. 1.

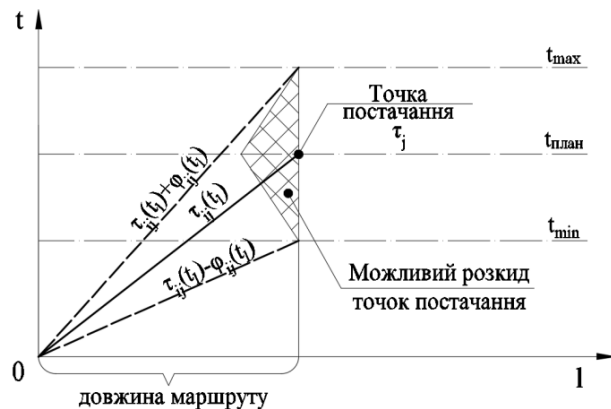


Рис. 1. Графік функції $\tau_{ij}(t_1) \pm \varphi_{ij}(t_1)$

Проаналізувавши графік функції $\tau_{ij}(t_1) \pm \varphi_{ij}(t_1)$, виникають наступні обмеження: час транспортування будівельного матеріалу не повинен перевищувати $t_{\max}$ та не бути меншим ніж $t_{\min}$.

$$\tau_{ij}(t_1) + \varphi_{ij}(t_1) \leq t_{\max} \quad (1)$$

$$\tau_{ij}(t_1) - \varphi_{ij}(t_1) \geq t_{\min} \quad (2)$$

Оскільки кінцева точка транспортування будівельних матеріалів τ_j є також точкою початку робіт, є можливість затримки початку будівельних робіт і як наслідок додаткові витрати на простой працівників, через що виникає необхідність розглянути можливий розкид точок

початку використання будівельних матеріалів. Нехай час виконання будівельних робіт в загальному вигляді буде t_2 , тоді час виконання робіт в певний проміжок буде $\tau_{j+1,j+n}(t_2)$ з початком в точці τ_{j+1} та кінцем в точці τ_{j+n} . Відхилення від графіку в часі виконання робіт позначмо як ω_{ij} , яке в залежності від кінцевої точки часу транспортування матеріалів може змінювати знак. Тоді максимальний та мінімальний початок робіт буде в діапазоні $\tau_{j+1,j+n}(t_2) \pm \omega_{j+1,j+n}(t_2)$. Коли функція матиме вид $\tau_{j+1,j+n}(t_2) + \omega_{j+1,j+n}(t_2)$ виникає необхідність у додаткових витратах на простій працівників, а коли функція матиме вигляд $\tau_{j+1,j+n}(t_2) - \omega_{j+1,j+n}(t_2)$ виникатиме необхідність у додаткових витратах на простій транспорту. Графік функції $\tau_{j+1,j+n}(t_2) \pm \omega_{j+1,j+n}(t_2)$ показано на рис. 2.

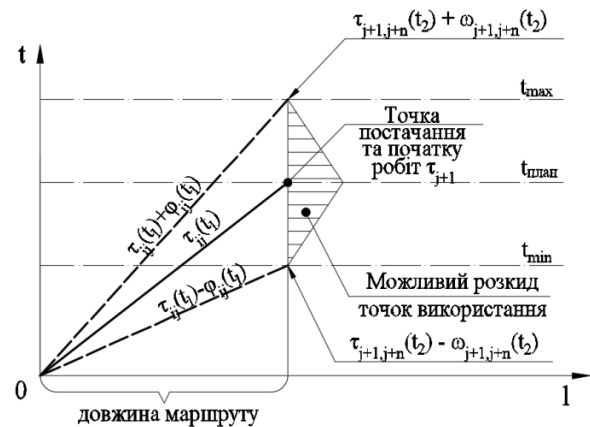


Рис. 2. Графік можливого розкиду точок використання $\tau_{ij}(t) \pm \omega_{ij}(t)$

При цьому обмеження на час початку робіт такий же як і для постачання:

$$\tau_{j+1,j+n}(t_2) + \omega_{j+1,j+n}(t_2) \leq t_{\max} \quad (3)$$

$$\tau_{j+1,j+n}(t_2) - \omega_{j+1,j+n}(t_2) \geq t_{\min} \quad (4)$$

Як видно з графіку є залежність, а саме перетин, кінцевих точок транспортування матеріалів та точок початку виконання будівельних робіт. Виходячи з цього можливо зробити висновок, що максимальна кількість точок перетину буде знаходитися відповідно до графіку постачання та виконання робіт, а мінімальна кількість біля максимального та мінімального часу транспортування. Якщо можливі точки перетину, при яких втрати від простою будуть мінімальні, будуть випадки розбіжності кінцевої точки транспортування та точок початку робіт.

Розглянемо можливі випадки перетину кінцевих точок транспортування та точок початку робіт, для визначення найбільших та найменших збитків від простою будівельної або транспортної організації. Відповідно до Александрова, & Якушева (2006) можливо чотири випадки перетину:

1) постачання матеріалу з запізненням та ранній початок робіт, графік виконання робіт опережає запланований (витрати від простою будівельної організації будуть приближатися до максимуму). Графік залежності від постачання з запізненням та раннього початку робіт показано на рис. 3;

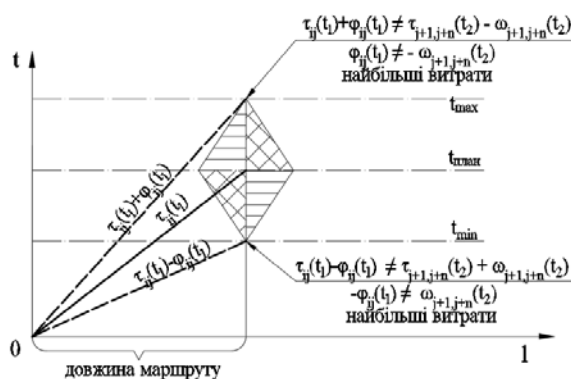


Рис. 3. Графік розбіжності точок кінця постачання матеріалів та початку робі

2) раннє постачання матеріалу та пізній початок виконання робіт (витрати від простою транспортної організації будуть приближатися до максимуму). Транспортування будівельних матеріалів була виконана раніше запланованого, а графік виконання робіт йде з відставанням. Графік залежності від раннього постачання та початку робіт з запізненням (див. рис. 3);

3) постачання матеріалу з запізненням та початок робіт з запізненням (витрати при запізненні постачання будівельних матеріалів будуть приближатися до мінімуму). Графік залежності від постачання матеріалу з запізненням та пізній початок робіт показано на рис. 4;

4) раннє постачання матеріалу та ранній початок робіт (витрати від простою транспортної організації будуть приближатися до мінімуму).

Графік залежності від ранньої доставки та раннього використання будівельного матеріалу показано на рис. 4.

Проаналізувавши графіки можливо сказати наступне: якщо транспортування матеріалу та

початок робіт виконуються за планом, то втрати при цьому будуть приближатися до нуля; якщо відставання або випередження графіку відбувається одночасно (перетин точок), то втрати також будуть приближатися до нуля; якщо є розбіжності в точках постачання і початку робіт то втрати будуть наближатися до максимуму.

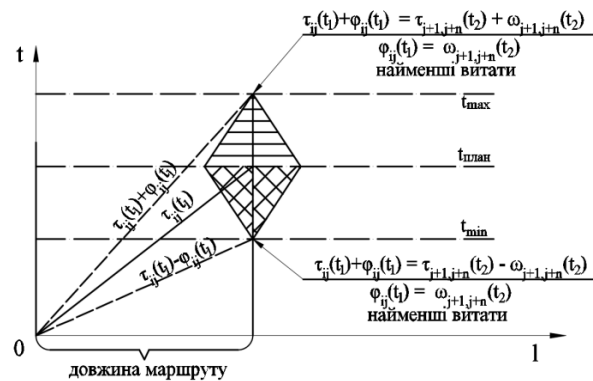


Рис. 4. Графік перетину точок кінця постачання матеріалів та початку робіт

Визначимо цільову функцію витрат на постачання матеріалу та роботу по ньому без витрат на затримку в часі:

$$L(x) = c_1 \cdot u + c_2 \cdot u \cdot t_{ij} +$$

$$+ c_3 \cdot \tau_{j,j+1} \cdot u \rightarrow \min;$$

$$\tau_{i,j} \in t_1;$$

$$\tau_{j,j+1} \in t_2,$$

де c_1 – вартість матеріалу; c_2 – вартість транспортування за одиницю часу; c_3 – витрати на заробітну плату працівникам за одиницю часу; u – кількість поставок та кількість роботи по ним.

Вартість транспортування за одиницю часу (c_2) та витрати на заробітну плату працівникам за одиницю часу (c_3) нам відомо завчасно, оскільки перші витрати нам диктує транспортна організація, а другі витрати визначає сама будівельна організація.

Визначимо цільову функцію витрат на постачання матеріалу та роботу по ньому з додатковими витратами на затримку в часі:

$$L_1(x) = c_1 \cdot u + c_2 \cdot u \cdot (t_{ij} + \varphi_{ij}) +$$

$$+ c_3 \cdot (\tau_{j+1,j+n} - \omega_{j+1,j+n}) \cdot u \rightarrow \min;$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$L_2(x) = c_1 \cdot u + c_2 \cdot u \cdot (t_{ij} - \varphi_{ij}) + c_3 \cdot (\tau_{j+1,j+n} + \omega_{j+1,j+n}) \cdot u \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$L_3(x) = c_1 \cdot u + c_2 \cdot u \cdot (t_{ij} + \varphi_{ij}) + c_3 \cdot (\tau_{j+1,j+n} + \omega_{j+1,j+n}) \cdot u \rightarrow \min; \quad (10)$$

$$L_4(x) = c_1 \cdot u + c_2 \cdot u \cdot (t_{ij} - \varphi_{ij}) + c_3 \cdot (\tau_{j+1,j+n} - \omega_{j+1,j+n}) \cdot u \rightarrow \min; \quad (11)$$

$$L_1(x) > L_3(x); \quad L_4(x); \quad (12)$$

$$L_2(x) > L_3(x); \quad L_4(x); \quad (13)$$

$$\tau_{ij} \in t_1; \quad (14)$$

$$\tau_{j+1,j+n} \in t_2. \quad (15)$$

Оскільки в нас існує чотири можливих випадки перетину і розбігу точок транспортування та початку робіт, то виникає чотири цільових функцій. При чому всі функції приближаються до мінімуму, оскільки замовник намагається заплатити як найменше, але потрібно зазначити, що функції $L_1(x)$ та $L_2(x)$ більші ніж функції $L_3(x)$ та $L_4(x)$.

Якщо враховувати перетин точок постачання матеріалу та початку робіт, то можливо сказати, що:

$$L_3(x) > L(x); \quad (16)$$

$$L_4(x) < L(x). \quad (17)$$

З чого можливо зробити висновок, що в залежності від виду затримки та різних чинників, алгоритм вирішення задач з транспортування будівельних матеріалів в лінійній постановці може змінюватися. В загальному вигляді алгоритм матиме наступний вигляд:

1) визначаємо вихідні дані (вартість матеріалу; вартість транспортування за одиницю часу; витрати на заробітну плату працівникам за одиницю часу; кількість поставок та кількість роботи; максимальний, мінімальний та запланований час роботи);

2) визначаємо фактичний кінцевий час транспортування;

3) якщо фактичний час кінцевий транспортування відрізняється від запланованого, знаходимо різницю запланованого та фактичного кінцевого часу, і визначаємо який знак має фактичний кінцевий час прибуття матеріалу (затримка чи випередження);

4) визначаємо фактичний час початку робіт;

5) якщо фактичний час початку робіт відрізняється від запланованого, знаходимо різницю запланованого та фактичного часу початку робіт (затримка чи випередження);

6) визначаємо різницю між фактичним часом кінця транспортування та фактичного часу початку робіт (якщо значення приближається до нуля, має місце перетину; якщо значення більше або менше нуля, має місце розбігу);

7) в залежності від отриманого результату різниці між фактичним часом кінця транспортування та фактичного часу початку робіт, обираємо формулу визначення цільової функції;

8) визначаємо цільову функцію з додатковими витратами на затримки в часі.

Блок-схема алгоритму вирішення задач з транспортування будівельних матеріалів в лінійній постановці показана на рис. 5.

Наукова новизна та практична значимість

Полягає у розробці вирішення задачі з забезпечення будівельних об'єктів матеріальними ресурсами з врахуванням часових факторів, що дає змогу більш повно визначити цільову функцію на транспортування будівельних матеріалів, з врахуванням витрат (втрати) грошових коштів від простою як транспортної, так і будівельної організації.

Висновки

Проаналізувавши детерміновані та недетерміновані фактори, що впливають на час транспортування будівельних матеріалів до об'єктів, був розроблений алгоритм вирішення задач на постачання матеріалів, який враховує перераховані фактори та може відобразити на цільовій функції втрати від простою як будівельної так і транспортної організації. Що в цілому дає злагоджувальну співпрацю будівельного комплексу.

До переваг розробленого алгоритму можна прирахувати:

1. Відносно простий і дає можливість без великих зусиль (знань) визначити втрати від затримки на транспортування будівельних матеріалів.

2. Алгоритм враховує як затримку транспортної організації так і затримку будівельної організації.

До недоліків даного алгоритму необхідно віднести наступне:

1. Початкові дані можуть змінюватися в залежності від прийнятої транспортної організації (вартість транспортування, час, кількість),

що вимагає повторного перерахування цільової функції.

2. Велика кількість цільових функцій, вибір яких залежить від початкових даних, що дає можливість виконати помилку на людському рівні.

3. Досить велика кількість операцій для вирішення вибору формули цільової функції.

Проаналізувавши недоліки і переваги, можливо сказати, що дану задачу можливо вирішити не тільки в лінійній постановці, а й в динамічній. Склавши алгоритм в стохастичній чи інтервальної постановці дасть змогу уникнути всіх перерахованих недоліків, але ускладнить саму суть постановки даної задачі.

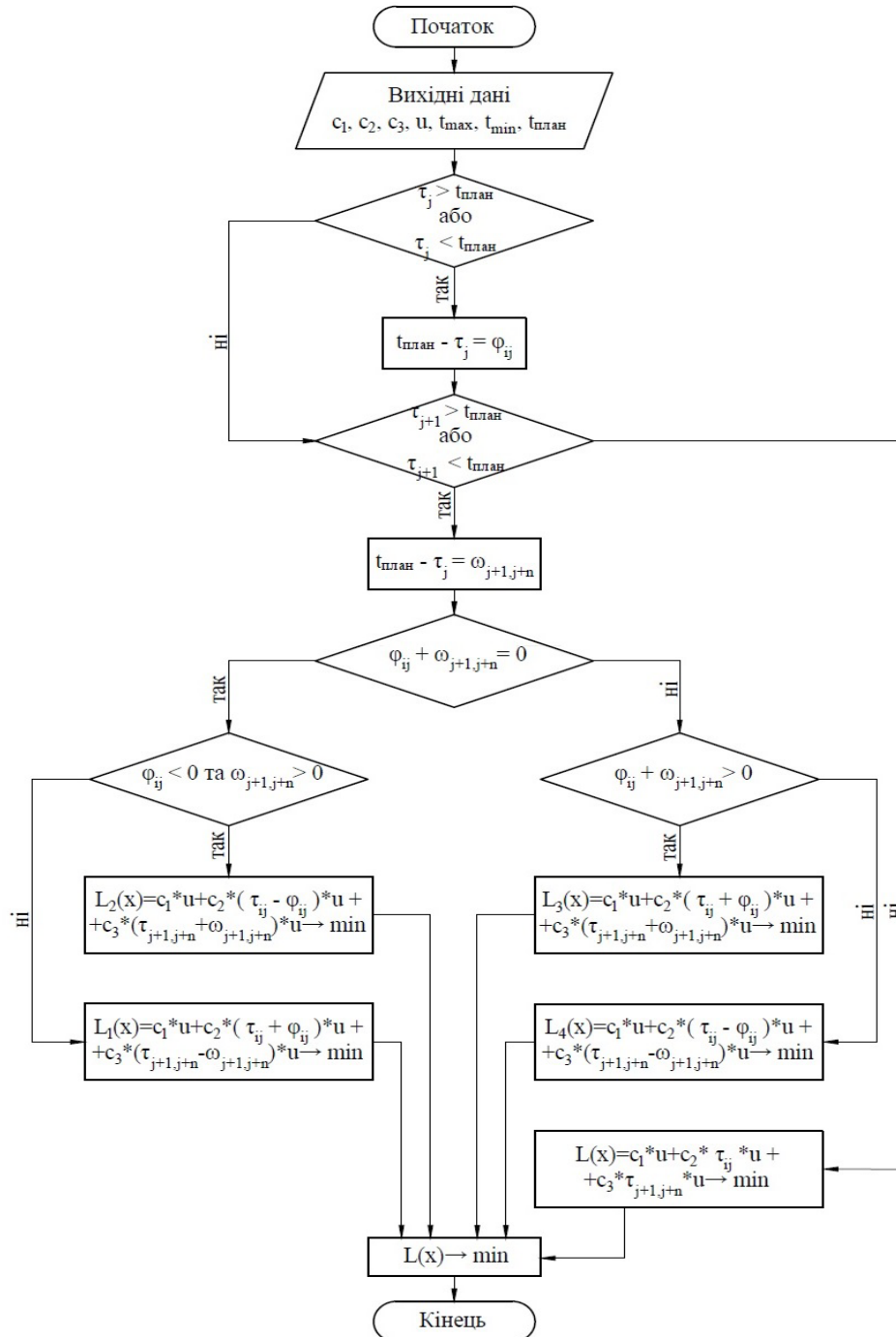


Рис. 5. Блок-схема алгоритму вирішення задач з транспортування будівельних матеріалів в лінійній постановці з затримкою в часі

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Агуреев, И. Е., Митюгин, В. А., & Пышный, В. А. (2014). Подготовка и обработка исходных данных для математического моделирования автомобильных транспортных систем. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 119-127.
- Александров, А. Э., & Якушев, Н. В. (2006). Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления. *Управление большими системами*, 5-14.
- Арутюнян, И. А., & Коваленко, М. Г. (2019). Особливості програмування задач оптимізаційно-організаційних процесів в будівництві за рахунок логістичних методів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин зб. наук. праць*, 39, 1, 114-119.
- Бронштейн, Е. М., & Заико, Т. А. (2010). Детерминированные оптимизационные задачи транспортной логистики. *Автоматика и телемеханика*, 10, 133-147.
- Гладков, Л. А., & Гладкова, Н. В. (2014). Особенности и новые подходы к решению динамических транспортных задач с ограничением по времени. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 178-187.
- Казаков, А. Л., & Лемперт, А. А. (2011). Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике. *Автоматика и телемеханика*, 7, 50-57.
- Кирнос, В. М., Залуин, В. Ф., & Дадиверина, Л. Н. (2005). *Организация строительства*. Днепропетровск: Пороги.
- Косенко, О. В. (2017). *Разработка методов и алгоритмов решения многоиндексных распределительных задач в условиях неопределенности* (Дис. канд. техн. наук). Институт радиотехнических систем и управления, Таганрог.
- Коробов, П. Н. (2002). *Математическое программирование и моделирование экономических процессов*. Санкт-Петербург: СПбГЛТА.
- Кузьмин, Е. А. (2014). Феномен неопределенности в экономических теориях и концепциях. *Вестник НГУЭУ*, 2, 18-36.
- Левин, В. И. (2012). Методы оптимизации систем в условиях интервальной неопределенности параметров. *Информационные технологии*, 4, 52-59.
- Павлов, И. Д., Полтавец, М. О., & Павлов, Ф. И. (2018). Системологічне управління виробничими системами в будівництві. *Наукові вісті Дніпровського університету* (електронне наукове фахове видання), Сєверодонецьк, 14. URL: https://nvdu.000webhostapp.com/arxiv/2018_14/pdf/12.pdf
- Плотников, О. А., & Подвальный, Е. С. (2012). Разработка меметического алгоритма для решения задач оптимального планирования грузоперевозок. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 8, 10.1, 19-24.
- Радкевич, А. В., & Арутюнян, И. А. (2014). Організація системи матеріального забезпечення будівництва. *Наука та прогрес транспорту*, 3 (51), 146-159.
- Смирнова, К. А. (2008). Понятие неопределенности экономических систем и подходы к ее оценке. *Вестник МГТУ*, 11(2), 241-246.

И. А. АРУТЮНЯН^{1*}, М. Г. КОВАЛЕНКО²

^{1*}Кафедра «Промышленного и гражданского строительства», Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38(066) 900 78 28, эл. почта iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

²Кафедра «Промышленного и гражданского строительства», Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38(096) 076 00 59, эл. почта kmg.zp.city@gmail.com, ORCID 0000-0002-8044-5792

АЛГОРИТМ И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННЫХ ФАКТОРОВ

Цель. Составление алгоритма решения задачи обеспечения строительных объектов материальными ресурсами с учетом влияния временных факторов в строительстве, для определения целевой функции на транспортировку строительных материалов с учетом дополнительных затрат. **Методика.** Анализ научных работ позволяет сказать, что существующие алгоритмы решения задач обеспечения материальными ресурсами в полной мере не охватывают всех детерминированных и недетерминированных факторов влияния строительной отрасли, что вызывает необходимость в создании нового алгоритма решения таких задач с учетом всех особенностей строительной отрасли. **Результаты.** Результатами данной работы, является составление нового алгоритма решения задач по обеспечению строительных объектов материальными ресурсами

сами с учетом временных факторов. Данный алгоритм позволяет определить целевую функцию на обеспечение строительных объектов материальными ресурсами, с учетом дополнительных расходов от простоя транспортной, строительной или обеих организаций одновременно. **Научная новизна.** Данный алгоритм решения задач по обеспечению строительных объектов материальными ресурсами с учетом временных факторов разработан впервые. **Практическая значимость.** Данный алгоритм позволяет определить реальную целевую функцию на поставку материальных ресурсов на строительный объект с дополнительными расходами на простои.

Ключевые слова: детерминированные факторы; недетерминированные факторы; транспортировки; задержки во времени; строительство; алгоритм; оптимизационно-организационные процессы

I. A. ARUTYUNYAN^{1*}, M. G. KOVALENKO²

^{1*} Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhya National University, Sobornyj ave., 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006, tel. +38(066) 900 78 28, e-mail iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

² Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhya National University, Sobornyj ave., 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006, tel. +38(066) 900 78 28, e-mail iranaarutunan@gmail.com, ORCID 0000-0002-5049-3742

AN ALGORITHM AND TECHNIQUE FOR SOLVING THE PROBLEM OF PROVIDING CONSTRUCTION OBJECTS WITH MATERIAL RESOURCES, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF TIME FACTORS

Purpose. Drawing up an algorithm for solving the problem of providing construction objects with material resources, taking into account the influence of temporary factors in construction, to determine the target function for the transportation of building materials, taking into account additional costs. **Methodology.** An analysis of scientific works allows us to say that the existing algorithms for solving problems of providing material resources do not fully cover all deterministic and non-determinant factors of influence of the construction industry, which necessitates the creation of a new algorithm for solving such problems, taking into account all the features of the construction industry. **Findings.** The results of this work are an analysis of existing deterministic and non-deterministic factors, on the basis of which a schedule of possible points of the final delivery of building materials was compiled, taking into account these factors. The maximum, minimum and planned transportation time are determined based on the analysis of the construction industry. The schedule of possible starting points of the construction industry is drawn up, because due to deterministic and non-deterministic factors, the starting point of the works can take on larger values than planned, and the possible advance of the schedule should be taken into account. On the basis of these two graphs, it was possible to draw up the graphs of the possible intersection and running of the points of final supply of materials and the points of beginning of work. Analyzing the schedules, it was determined that when the delivery points and the start of works are taken up, the costs of simple transport and construction organizations will be close to the maximum, and at their intersection, they will be reduced to a minimum. As a result, a new algorithm and method for solving the problems of providing construction objects with material resources, taking into account time factors, was compiled. This algorithm allows you to determine the objective function of providing construction objects with material resources, taking into account the additional costs of idle transport, construction or both organizations at the same time. **Originality.** This algorithm for solving problems of providing construction objects with material resources, taking into account time factors, was developed for the first time. **Practical value.** This algorithm allows you to determine the real objective function for the supply of material resources to a construction site with additional costs for downtime.

Keywords: deterministic factors; non-deterministic factors; transportation; time delays; construction; algorithm; optimization and organizational processes

REFERENCES:

- Agureev, I. E., Mitjugin, V. A., & Pyshnyj, V. A. (2014). Podgotovka i obrabotka ishodnyh dannyh dlja matematicheskogo modelirovaniya avtomobil'nyh transportnyh sistem. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*, 119-127. (in Russian)
- Aleksandrov, A. Je., & Jakushev, N. V. (2006). Stohasticheskaja postanovka dinamicheskoy transportnoj zadachi s zaderzhkami s uchetom sluchajnogo razbrosa vremeni dostavki i vremeni potreblenija. *Upravlenie bol'shimi siste-*

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

mami, 5-14. (in Russian)

Arutjunjan, I. A., & Kovalenko, M. Gh. (2019). Osoblyvosti proghramuvannja zadach optymizacijno-orghanizacijnykh procesiv v budivnyctvi za rakhunok loghystichnykh metodiv. *Shljakhy pidvyshhennja efektyvnosti budivnyctva v umovakh formuvannja rynkovykh vidnosyn zb. nauk. pracj*, 39, 1, 114-119. (in Ukrainian)

Bronshtejn, E. M., & Zaiko, T. A. (2010). Determinirovannye optimizacionnye zadachi transportnoj logistiki. *Avtomatika i telemekhanika*, 10, 133-147. (in Russian)

Bronshtejn, E. M., & Zaiko, T. A. (2010). Determinirovannye optimizacionnye zadachi transportnoj logistiki. *Avtomatika i telemekhanika*, 10, 133-147. (in Russian)

Gladkov, L. A., & Gladkova, N. V. (2014). Osobennosti i novye podhody k resheniju dinamicheskikh transportnykh zadach s ogranicheniem po vremeni. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 178-187. (in Russian)

Kazakov, A. L., & Lempert, A. A. (2011). Ob odnom podhode k resheniju zadach optimizacii, vznikajushhix v transportnoj logistike. *Avtomatika i telemekhanika*, 7, 50-57. (in Russian)

Kirnos, V. M., Zalunin, V. F., & Dadiverina, L. N. (2005). *Organizacija stroitel'stva*. Dnepropetrovsk: Porogi. (in Russian)

Kosenko, O. V. (2017). *Razrabotka metodov i algoritmov reshenija mnogoindeksnykh raspredelitel'nykh zadach v uslovijah neopredelennosti* (Dis. kand. tehn. nauk). Institut radiotekhnicheskikh sistem i upravlenija, Taganrog. (in Russian)

Korobov, P. N. (2002). *Matematicheskoe programmirovanie i modelirovanie jekonomicheskikh processov*. Sankt-Peterburg: SPbGLTA. (in Russian)

Kuz'min, E. A. (2014). Fenomen neopredelennosti v jekonomicheskikh teorijah i koncepcijah. *Vestnik NGUJeU*, 2, 18-36. (in Russian)

Levin, V. I. (2012). Metody optimizacii sistem v uslovijah interval'noj neopredelennosti parametrov. *Informacionnye tehnologii*, 4, 52-59. (in Russian)

Pavlov, I. D., Poltavecj, M. O., & Pavlov, F. I. (2018). Systemologhichne upravlinnja vyrobnychymy systemamy v budivnyctvi. *Naukovi visti Dalivsjkogho universytetu* (elektronne naukovе fakhove vydannja), Sjevjerodonecjk, 14. URL: https://nvdu.000webhostapp.com/arxiv/2018_14/pdf/12.pdf. (in Ukrainian)

Plotnikov, O. A., & Podval'nyj, E. S. (2012). Razrabotka memeticheskogo algoritma dlja reshenija zadach optimal'nogo planirovanija gruzoperevozok. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 8, 10.1, 19-24. (in Russian)

Radkevych, A. V., & Arutjunjan, Y. A. (2014). Orghanizacija systemy material'nogho zabezpechennja budivnyctva. *Nauka ta proghres transportu*, 3 (51), 146-159. (in Ukrainian)

Smirnova, K. A. (2008). Ponjatie neopredelennosti jekonomicheskikh sistem i podhody k ee ocenke. *Vestnik MGTU*, 11(2), 241-246. (in Russian)

Надійшла до редколегії 26.03.2020.

Прийнята до друку 24.04.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 691.23-027.45:666.9

А. А. ДРОЗД¹, О. В. ШТАЙНБРЕШ², Т. М. ДЕХТА³, О. В. ГРОМОВА^{4*}

¹ ТОВ «Тадалс-буд», пров. Біологічний, 2, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 744 52 52, ел. пошта Li2kondik@ukr.net, ORCID 0000-0001-7588-5569

² Кафедра «Технологія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (096) 242 64 41, ел. пошта ov.shapovalova@mail.ru, ORCID 0000-0001-7742-2445

³ Кафедра «Технологія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (096) 242 64 41, ел. пошта dehta.tatyana75@gmail.com, ORCID 0000-0001-5023-3070

^{4*} Кафедра «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, ел. пошта elenagromova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5149-4165

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ РЕДИСПЕРСІЙНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІПСОВИХ СУМІШЕЙ

Мета. Розробка сухих будівельних сумішей на основі гіпсу і збільшення терміну їх придатності за рахунок введення складних добавок на основі негашеного вапна та дисперсії [ПВАД] полівінілацетату. **Методика.** У роботі використані стандартні методи дослідження для визначення фізико-механічних властивостей гіпсових в'язучих і якості комплексних добавок згідно з ДСТУ Б В.2.7-82-99, ДСТУ Б В.2.7-23-95, ДСТУ Б В.2.7-65-97. Дослідження фазового складу матеріалів, мікро- та макроструктури проводились за допомогою рентгенофазового аналізу, електронної і світлової мікроскопії. **Результати.** Досліджено вплив основних складових добавки (дисперсії полівінілацетату та вапна) на властивості напівводного гіпсу. Запропоновано та встановлено хімізм взаємодії компонентів складової добавки, згідно з яким лужний гідроліз полівінілацетату призводить до утворення полівінілового спирту, особливістю структури, молекули якої - наявність гідрофільних ОН- груп і гідрофобний компонент – вуглеводородневий радикал. Гідрофільна частина молекули, будучи іонною, адсорбується на поверхні часток в'язучого, утворює мономолекулярну плівку, орієнтовану гідрофобною частиною від часток гіпсу. Можливо також утворення ацетату кальцію $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, що підвищує концентрацію іонів кальцію в розчині. Комбінована дія продуктів гідролізу значно знижує розчинність напівгідрату, швидкість утворення центрів кристалізації, тим самим забезпечуючи ефект сповільнення. **Наукова новизна.** Теоретично обґрунтована та експериментально доказана можливість отримання сухої добавки-сповільнювача утворення гіпсу на основі негашеного вапна і полівінілацетатної дисперсії внаслідок утворення полівінілового спирту і солей ацетату кальцію в результаті лужного гідролізу дисперсії (ПВАД) полівінілацетату під час гасіння вапна в гідратне вапно-пушонку. **Практична значимість.** Результати роботи реалізовано у виробництві сухих гіпсових сумішей.

Ключові слова: суха гіпсова суміш; добавка; міцність; час придатності; строки схоплювання; розчинність

Вступ

В останні роки інтерес до матеріалів на основі гіпсу істотно зріс. Використання сухих гіпсових сумішей показує їх високу ефективність і переваги в порівнянні з традиційними методами ведення оздоблювальних робіт. Вони забезпечують стабільно високий рівень якості обробки, зниження витрат на транспортування, легку переробку матеріалів (Алексеев, 1972; Парикова, 2006; ДСТУ Б В.2.7-126:2006, 2006).

При виготовленні сухих гіпсових сумішей необхідними складовими частинами є добавки, які регулюють строки схоплювання, життєзда-

тність суміші і міцність покриттів. Гіпсові в'язучі є швидко схоплювальними і рішення задачі збільшення придатності полягає в правильному виборі спеціальних добавок – уповільнювачів схоплювання.

В Україні, на жаль, вітчизняна промисловість не приділяє достатньої уваги виробництву високоефективних добавок. І хоча оптимізації, розробці складів і виробництва сухих будівельних сумішей з вітчизняне сировини присвячено значна кількість робіт Ратинів В. Б., Будніков П. П., Пашенко А. А., Бабушкін В. І., Ушеров-Маршак А. В., Мchedlov-Петросян О. П., Рунова

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Р. Ф., Кривенко П. В. та інші, все ж питання розробки вітчизняних добавок є досить гострим.

В Україні представлені різні види функціональних добавок у вигляді редисперсійних полімерних порошків в основному закордонного виробництва, вартість яких становить значну частину собівартості суміші (Балмасова, & Мешков, 2006; Бердов, & Парикова, 2006). Тому питання розробки і дослідження редисперсійних полімерних добавок, для спрямованого регулювання властивостей розчинних сумішей на основі гіпсу, є актуальним науково-технічним напрямком в будівельному матеріалознавстві.

Мета

Розробити склади добавок на основі полівінілацетатної дисперсії (ПВАД) і негашеного вапна для сповільнення термінів твердіння гіпсу.

Методика

Отриманий редисперсійний полімерний порошок (РПП) в результаті переведення ПВАД в сухий стан (полівінілхлорид) за рахунок тепла, що виділяється в процесі гасіння вапна, вимагає проведення досліджень дії його на процес гідратації напівводного гіпсу. Вплив добавок на властивості гіпсових в'язучих досліджували за основними властивостями, що визначають ефективність добавок: за нормальною густотою, термінами схоплювання, межею міцності при вигині і стиску. Вміст добавки варіювався в межах від 1 % до 3 %.

Водогіпсове відношення для всіх складів брали однакове і відповідно нормальної густоти чистого гіпсу (Голунов, 2004; Ушерев-Маршак, & Залуцкая, 2005).

Склади і властивості досліджуваних сумішей наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Склади і властивості досліджуваних сумішей в залежності термінів схоплювання, міцності при вигині і стиску від змісту добавки (РПП)

Індекс	Склади сумішей			В/Г	Властивості			
	Гіпс, %	Добавка РПП, більш 100 %	Вміст ПВАД в добавці, %		Терміни схоплювання, хв.		Міцність, МПа	
					початок	кінець	при вигині	при стиску
Контр.	100	–	29	0,6	9	13	2,99	5,1
РП 1.1	100	1,0	29	0,6	26	30	3,59	7,17
РП 1.2	100	1,5	29	0,6	28	33	3,3	6,08
РП 1.3	100	2,0	29	0,6	24	30	2,63	5,58
РП 1.4	100	2,5	29	0,6	24	27	2,6	5,38
РП 1.5	100	3,0	29	0,6	23	25	2,51	5,25
РП 2.1	100	1,0	35	0,6	30	32	3,25	6,35
РП 2.2	100	1,5	35	0,6	28,5	35	3,1	5,49
РП 2.3	100	2,0	35	0,6	24	33	2,7	5,45
РП 2.4	100	2,5	35	0,6	23	31	2,53	5,4
РП 2.5	100	3,0	35	0,6	22	29	2,42	5,25
РП 3.1	100	1,0	41	0,6	31	34	3,19	5,65
РП 3.2	100	1,5	41	0,6	35	40	3,0	5,5
РП 3.3	100	2,0	41	0,6	26	32	2,86	5,4
РП 3.4	100	2,5	41	0,6	25	30	2,6	5,3
РП 3.5	100	3,0	41	0,6	23	28	2,45	5,27

Результати

Дослідженнями встановлено, що введення добавки 1...1,5 % дозволяє збільшити час початку схоплювання до 30...35 хв, при вмісті ПВАД в суміші 35 % і 41 %, що є цілком прийнятним для забезпечення живучості гіпсової суміші.

У той же час для цих складів спостерігається і зростання міцності, як при стиску, так і при вигині. Введення до складу гіпсової суміші добавки від 2 % до 3 % викликає деяке сповільнення процесу гідратації в'язучого і, як результат, уповільнення термінів схоплювання, при незначному підвищенні міцності при стиску і зниженні міцності при вигині. Отже, споча-

тку можна зробити висновок, що вміст добавки повинен бути в межах 1...1,5 %. Підвищення термінів схоплювання пояснюється наявністю в редисперсійному полімерному порошку полівінілового спирту, що утворився в результаті лужного гідролізу ПВАД при гасінні вапна. Механізм реакції, якої може бути представлений наступною схемою (рис. 1).

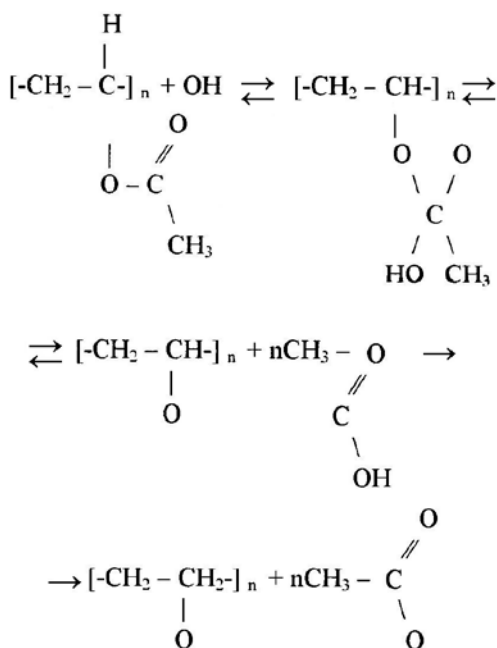


Рис. 1. Механізм реакції лужного гідролізу ПВАД при гасінні вапна

Особливістю будови молекули полівінілового спирту є наявність гідрофільних груп – OH, що володіють більшою спорідненістю до іонних і полярних структур. З іншого боку вуглеводневий радикал неполярний і є гідрофобною складовою молекули.

Можна припустити, що гідрофільна частина молекули полівінілового спирту, будучи іонногенною, буде адсорбуватися на поверхні частинок гіпсового в'язучого, утворюючи мономолекулярну плівку, орієнтовану своєю гідрофобною частиною на поверхні частинок гіпсу. Результатом цього є уповільнення процесу гідратації гіпсового в'язучого і збільшення термінів схоплювання.

Крім полівінілового спирту в результаті реакції гідролізу утворюється ацетат кальцію за схемою (рис. 2.).

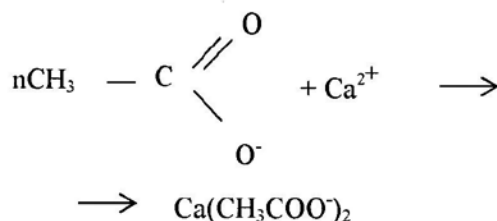


Рис. 2. Механізм реакції гідролізу

Ацетат кальцію сприяє зниженню розчинності гіпсового в'язучого, так як забезпечує підвищену концентрацію іонів кальцію в розчині, що забезпечує зниження швидкості утворення центрів кристалізації ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) і, як результат, уповільнення термінів схоплювання гіпсових в'язучих (Рунова, & Носовський, 2007; Василик, & Голубев, 2009). Тепловиділення при гідратації будівельного гіпсу з добавками РПП в кількості 1,5 % за масою гіпсу значно відрізняється від тепловиділення напівводного гіпсу без добавок (рис. 3).

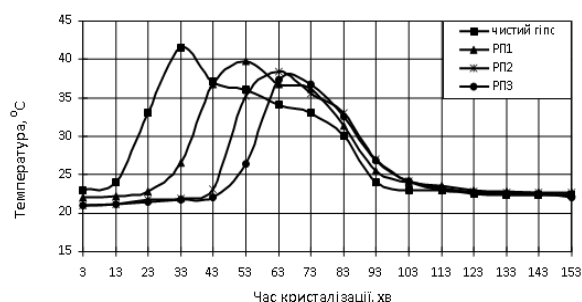


Рис. 3. Зміна температури процесу гідратації напівводного гіпсу в присутності добавок

Температурний пік термодинамічної процесу гідратації гіпсу будівельного з добавками РПЗ на 3...5 °C нижче, ніж чистого і становить 40...38 °C.

Період підйому температури приблизно дорівнює різниці в часі між початком і кінцем схоплювання. Час зниження температури починається приблизно через 1,0..1,5 год, що пов'язано із закінченням процесів гідратації в'язучого.

Уповільнення процесу гідратації гіпсових в'язучих підтверджується результатами дослідження розчинності сумішей гіпсу з добавкою редисперсійного полімерного порошку. До складу редисперсійного порошку входить гід-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

роксид кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$. При змішуванні гіпсового в'язучого з добавкою РПП відповідно змінюється концентрація іонів кальцію Ca^{2+} у розчині (Козлов, 2000; Карапузов, Лутц, & Герольд, 2000).

Дійсно (Алексеев, 1972; Коровяков, 2008; Урецкая, Плотникова, & Кухта, 2006) добуток розчинності, добуток концентрацій (точніше активностей) іонів будь-якого малорозчинного електроліту в насиченому розчині його представляє собою величину, постійну при даній температурі і дорівнює добутку розчинності електроліту, в нашому випадку $\text{CaSO}_4 : [\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{SO}_4^{2-}] = PP_{\text{CaSO}_4} = 25 \cdot 10^{-6}$, а розчинність CaSO_4 визначається:

$$P_{\text{CaSO}_4} = \frac{\sqrt{PP}}{[\text{Ca}^{2+}]} = \frac{\sqrt{25 \cdot 10^{-6}}}{[\text{Ca}^{2+}]} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{[\text{Ca}^{2+}]},$$

де $[\text{Ca}^{2+}] = \frac{m_{\text{CaO}} - \epsilon - p - pe}{M_{\text{CaO}}}$ – концентрація

іонів кальцію у розчині; m – маса оксиду CaO у розчині, г; M – молекулярна маса CaO = 56 г/моль.

Розрахунки розчинності CaSO_4 за вище наведеними формулами в залежності від витрати (редисперсійних полімерних порошоків і, відповідно, від маси CaO в розчині) наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Розчинність гіпсових в'язучих від змісту РПП

Зміст РПП у гіпсовій суміші, %	Співвідношення CaO : ПВАД в РПП	Маса CaO в РПП, г	Концентрація іонів Ca у розчині	Розчинність, моль/л
1	1,3:1	1,7	0,0304	0,164
1,5	1,3:1	2,54	0,045	0,111
2	1,3:1	3,4	0,0607	0,0823
2,5	1,3:1	4,24	0,0757	0,066
3	1,3:1	5,1	0,091	0,0549

Дані табл. 2 підтверджують, що збільшення концентрації іонів Ca^{2+} в розчині за рахунок введення редисперсійних полімерних добавок знижує розчинність сульфату кальцію і, як результат, уповільнює терміни схоплювання.

Наукова новизна та практична значимість

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість отримання сухої добавки-сповільнювача тужавлення гіпсу на основі негашеного вапна та полівінілацетатної дисперсії за рахунок утворення полівінілового спирту та солей ацетату кальцію в результаті лужного гідролізу полівінілацетатної дисперсії (ПВАД) при гасінні вапна в гідратне вапно – пушонку. Результати роботи реалізовано у виробництві сухих гіпсових сумішей.

Висновки

Результати досліджень підтвердили можливість використання запропонованих складів редисперсійних добавок для регулювання властивостей гіпсових в'язучих.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Алексеев, В. Н. (1972). *Количественный анализ*. Москва: Химия.
- Балмасова, Г. Ф., & Мешков, П. И. (2006). Сравнительный анализ европейского и азиатского рынков химических добавок для сухих строительных смесей. *Строительные материалы*, 3, 9-11.
- Бердов, Г. И., & Парикова, Е. В. (2006). Влияние природных минеральных добавок на свойства гипсовых смесей. *Строительство и архитектура*, 9, 9-12.
- Василик, П. Г., & Голубев, В. И. (2009). Новые эфиры целлюлозы для производства гипсовых штукатурок. *Строительные материалы*, 1, 36-38.
- Голунов, С.А. (2004). Модификация плиточных клеев редисперсионными полимерными порошками VINNAPAS. *Строительные материалы*, 3, 47-49.
- ДСТУ Б В.2.7-126:2006 (2006). *Смеси строительные сухие модифицированные. Общие технические условия*. Киев: Мин. строит., архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Украины.
- Карапузов, Е. К., Лутц, Г., & Герольд, Х. (2000). *Сухие строительные смеси. Справочное пособие*. Киев: Техника.
- Козлов, В. В. (2000). *Сухие строительные смеси. Учебное пособие*. Москва: АСВ.
- Коровяков, В. Ф. (2008). Гипсовые сухие смеси. *Сухие строительные смеси*, 4, 10-13.
- Парикова, Е. В. (2006). Модифицирование сухих гипсовых смесей введением комплексной добавки на основе метилцеллюлозы. *Строительные материалы*, 3, 18-19.
- Рунова, Р. Ф., & Носовский, Ю. Л. (2007). *Технология модифицированных строительных розчинів*. Київ: КНУБА.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Урецкая, Е. А., Плотникова, Е. А., & Кухта, Т. М. (2006). Теория и практика создания конкурентоспособных материалов на основе гипсовых вяжущего. *Строительная наука и техника*, 5, 70.
- Ушеров-Маршак, А. В., & Залуцкая И. А. (2005). Добавки в бетон. Систематика и оценка эффективности. *Строительные материалы и изделия*, 3, 15-18.

А. А. ДРОЗД¹, О. В. ШТАЙНБРЕШ², Т. Н. ДЕХТА³, Е. В. ГРОМОВА^{4*}

¹ ООО «Тадалс-буд», пер. Биологический, 2, Днепр, Украина, 49005, тел. +38(056) 744 52 52, эл. почта Li2kondik@ukr.net, ORCID 0000-0001-7588-5569

² Кафедра «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38(067) 760 65 71, эл. почта ov.shapovalova@mail.ru, ORCID 0000-0001-7742-2445

³ Кафедра «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (096) 242-64-41, эл. почта dehta.tatyana75@gmail.com, ORCID 0000-0001-5023-3070

^{4*} Кафедра «Архитектурное проектирование, землеустройство и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38(056) 373 15 46, эл. почта elenagromova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5149-4165

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕДИСПЕРСИОННЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ГИПСОВЫХ СМЕСЕЙ

Цель. Разработка сухих строительных смесей на основе гипса и увеличение сроков их пригодности за счет введения сложных добавок на основе негашеной извести и дисперсии [ПВАД] поливинилацетата. **Методика.** В работе использованы стандартные методы исследования для определения физико-механических свойств гипсовых вяжущих и качества комплексных добавок согласно ДСТУ Б В.2.7-82-99, ДСТУ Б В.2.7-23-95, ДСТУ Б В.2.7-65-97. Исследование фазового состава материалов, микро- и макроструктуры проводились методами рентгенофазового анализа, электронной и световой микроскопии. **Результаты.** Исследовано влияние основных составляющих добавки (дисперсии поливинилацетата и извести) на свойства полуводного гипса. Предложен и установлен химизм взаимодействия компонентов составляющей добавки, согласно которого в результате щелочного гидролиза поливинилацетата образуется поливиниловый спирт, особенностью структуры, молекулы которой является наличие гидрофильных ОН-групп и гидрофобный компонент – углеводородный радикал. Гидрофильная часть молекулы, являясь ионной, адсорбируется на поверхности частиц вяжущего, образуя мономолекулярную пленку, ориентированную гидрофобной частью от частиц гипса. Возможно также образование ацетата кальция $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, который повышает концентрацию ионов кальция в растворе. Совместное действие продуктов гидролиза значительно снижают растворимость полугидрата, скорость образования центров кристаллизации, тем самым обеспечивая замедляющий эффект этих добавок. **Научная новизна.** Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность получения сухой добавки-замедлителя образования гипса на основе негашеной извести и поливинилацетатной дисперсии вследствие образования поливинилового спирта и солей ацетата кальция в результате щелочного гидролиза дисперсии (ПВАД) поливинилацетата при гашении извести в гидратную известь-пушонку. **Практическая значимость.** Результаты работы реализованы в производстве сухих гипсовых смесей.

Ключевые слова: сухая гипсовая смесь; добавка; прочность; время пригодности; сроки схватывания; растворимость

А. А. ДРОЗД¹, О. В. ШТАЙНБРЕШ², Т. М. ДЕХТА³, О. В. ГРОМОВА^{4*}

¹ Limited Liability Company «Tadals-bud», lane Biological, 2, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744 52 52, e-mail Li2kondik@ukr.net, ORCID 0000-0001-7588-5569

² Department «Technology of Building Materials, Products and Constructions», State Higher Educational Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», str. Chernyshevskogo, 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (067) 760 65 71, e-mail ov.shapovalova@mail.ru, ORCID 0000-0001-7742-2445

³ Department «Technology of Building Materials, Products and Constructions», State Higher Educational Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», str. Chernyshevskogo, 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (096) 242 64 41, e-mail dehta.tatyana75@gmail.com, ORCID 0000-0001-5023-3070

^{4*} Department «Architectural design, land management and building materials», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, str. Lazaryan, 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 46, e-mail elenagromova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5149-4165

© А. А. Дрозд, О. В. Штайнбреш, Т. М. Дехта, О. В. Громова, 2020

PROSPECTS FOR THE USE OF REDISPERSION POWDERS FOR THE REGULATION OF PROPERTIES OF GYPSUM MIXES

Purpose. The development of dry building mixes based on gypsum and time increase of time of their conformance through adding of complex additives on the basis of burnt lime and polyvinyl acetate dispersions [PVAD]. **Methodology.** The study used standard research techniques to determine physical and mechanical properties of gypsum binders and quality of complex additives according to ДСТУ Б В.2.7-82-99, ДСТУ Б В.2.7-23-95, ДСТУ Б В.2.7-65-97. Study of phase composition of materials, micro- and macrostructure was carried out by x-ray diffraction, electron and light microscopy. **Findings.** The influence of the main components of the additive (polyvinyl acetate dispersion and lime) on the properties of hemihydrate gypsum is investigated. The chemistry of the interaction of components of the complex additive, according to which the result of alkaline hydrolysis of polyvinyl acetate is formed: polyvinyl alcohol, a feature of its molecules structure is the presence of hydrophilic OH-groups and the hydrophobic component – a hydrocarbon radical. The hydrophilic part of the molecule being ion adsorbed on the surface of the particles of the binder, forms a monomolecular layer that is oriented with the hydrophobic part of the gypsum particles. It is also possible the formation of calcium acetate $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, which increases the concentration of calcium ions in solution. The combined effect of hydrolysis products significantly reduce the solubility of hemihydrate, the rate of formation of crystallization centers, due to the slowing effect of these supplements. **Originality.** The results is theoretically substantiated and experimentally confirmed the possibility of obtaining a dry additive-retarder of gypsum setting based on lime and polyvinyl acetate dispersions due to the formation of polyvinyl alcohol and salts of calcium acetate in the result of alkaline hydrolysis of polyvinyl acetate dispersion (PVAD) with the slaked lime in hydrated lime. **Practical value.** The results of the work implemented in the production of dry gypsum mixes.

Keywords: dry gypsum mixture; additive; strength; availability time; setting time; solubility

REFERENCES

- Alekseev, V. N. (1972). *Kolichestvennyj analiz*. Moskva: Himija. (in Russian)
- Balmasova, G. F., & Meshkov, P. I. (2006). Srovnitel'nyj analiz evropejskogo i aziatskogo rynkov himi-cheskih dobavok dlja suhix stroitel'nyh smesej. *Stroitel'nye materialy*, 3, 9-11. (in Russian)
- Berdov, G. I., & Parikova, E. V. (2006). Vlijanie prirodnyh mineral'nyh dobavok na svojstva gipsovyh smesej. *Stroitel'stvo i arhitektura*, 9, 9-12. (in Russian)
- Vasilik, P. G., & Golubev, V. I. (2009). Novye jefiry celjulozy dlja proizvodstva gipsovyh shtukатурок. *Stroitel'nye materialy*, 1, 36-38. (in Russian)
- Golunov, S.A. (2004). Modifikacija plitocnyh kleev redispersionnymi polimernymi poroshkami VINNAPAS. *Stroitel'nye materialy*, 3, 47-49. (in Russian)
- DSTU B V.2.7-126:2006 (2006). *Smesi stroitel'nye suhie modifizirovannye. Obshhee tehicheskie uslovija*. Kiev: Ministerstvo stroitel'stva, arhitektury i zhilishhno-komunal'nogo hozjajstva Ukrainy. (in Russian)
- Karapuzov, E. K., Lutic, G., & Gerol'd, H. (2000). *Suhie stroitel'nye smesi. Spravochnoe posobie*. Kiev: Tehnika. (in Russian)
- Kozlov, V. V. (2000). *Suhie stroitel'nye smesi. Uchebnoe posobie*. Moskva: ASV. (in Russian)
- Korovjakov, V. F. (2008). Gipsove suhie smesi. *Suhie stroitel'nye smesi*, 4, 10-13. (in Russian)
- Parikova, E. V. (2006). Modifizirovanie suhix gipsovyh smesej vvedeniem kompleksnoj dobavki na osno-ve metil-celjulozy. *Stroitel'nye materialy*, 3, 18-19. (in Russian)
- Runova, R. F., & Nosovskij, Ju. L. (2007). Tekhnologhija modyfikovanykh budivel'nykh rozchyniv. Kyjiv: KNUBIA. (in Ukrainian)
- Ureckaja, E. A., Plotnikova, E. A., & Kuhta, T. M. (2006). Teorija i praktika sozdanija konkurentosposobnyh materialov na osnove gipsovyh vjazhushhego. *Stroitel'naja nauka i tehnika*, 5, 70. (in Russian)
- Usharov-Marshak, A. V., & Zaluckaja I. A. (2005). Dobavki v beton. Sistematika i ocenka jeffektivnosti. *Stroitel'nye materialy i izdelija*, 3, 15-18. (in Russian)

Надійшла до редколегії 13.04.2020

Прийнята до друку 11.05.2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.712.35:624.195.04:[625.11.015]

В. В. КОВАЛЬЧУК

Кафедра «Рухомий склад і колія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Львівська філія, вул. І. Блажкевич, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, ел. пошта kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756

ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТУНЕЛЬНОГО ШЛЯХОПРОВОДУ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Метою роботи є визначення несучої здатності металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу великого поперечного перерізу при дії динамічних навантажень від залізничного транспорту. Такі дослідження необхідні для обґрунтування можливості застосування металевих гофрованих конструкцій у тілі насипу залізничної колії. **Методика.** Визначення несучої здатності тунельного шляхопроводу проведено за допомогою удосконаленої аналітичної методики оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій великого поперечного перерізу (більше 6,0 м). **Результати.** Результати багатоваріантних розрахунків металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу показали, що максимальні значення напружень у конструкції виникають при проїзді ділянкою залізничної колії локомотива 2М62 і вони становлять 145,45 МПа, а коефіцієнт величини пластичного шарніру становить 0,41. Проведені динамічні випробування металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу від дії рухомого складу залізниці показують, що метал гофрованої конструкції працює у пружній стадії та має 60 % запас несучої здатності. **Наукова новизна.** Вперше проведено оцінювання несучої здатності тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій великого поперечного перерізу при взаємодії з ґрунтовою засипкою та із врахуванням її ступеня ущільнення і величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниці. **Практична значимість.** Отримані результати напружено-деформованого стану тунельного шляхопроводу можуть бути корисними для проектних організацій, які займаються розрахунками подібних конструкцій, що експлуатуються у тілі насипу залізничної колії. Споруди із металевих гофрованих конструкцій можуть використовуватися у залізничному будівництві у вигляді малих мостів, водопропускних труб та шляхопроводів, поперечним перерізом до 14,0 м.

Ключові слова: тунельний шляхопровід; металева гофрована конструкція; динамічне навантаження; вертикальні сили тиску; напруження; коефіцієнт пластичного шарніру

Вступ

Транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій (далі МГК) є перспективними для застосування не тільки на автомобільних дорогах України, а також і на залізничних коліях. Враховуючи часті повені у весняну та

осінню пори року, які спричиняють руйнування мостів та підмивання насипів залізничних колій (рис. 1, а, б), одним із напрямів заміни пошкоджених малих мостів та водопропускних труб є будівництво транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій.



Рис. 1. Пошкодження транспортних споруд на залізницях України в умовах експлуатації:
а – руйнування кам'яного аркового моста; б – розмив насипу залізничної колії під час паводку

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

На ділянці Вадул-Сирет – Держжордон, яка з'єднує Україну з Румунією, під час літніх паводків був зруйнований кам'яний арковий міст. Відновлення ділянки міжнародного значення потрібно було виконати негайно, і тільки завдяки застосуванню труби із МГК діаметром понад шість метрів дозволило її відновити в стислі терміни і зекономити до 7 млн. грн. (Ковальчук, 2015) тільки на будівництві, не враховуючи коштів, які залізниця понесла б у випадку тривалого перекриття руху залізничного транспорту.

Споруди із МГК є ефективними при реконструкції транспортних об'єктів, таких як малі мости і водопропускні труби та є альтернативою малим мостам та шляхопроводам.

Проте, досвід експлуатації МГК на 310 км ділянці Вадул-Сирет – Держжордон Регіональної філії «Львівська залізниця» засвідчив, що після спорудження труби із МГК, горизонтальним діаметром 6,57 м та вертикальним 6,2 м, відбулося просідання залізничної колії над трубою і почалися деформації вертикального та горизонтального діаметрів труби. Залишкова вертикальна деформація труби за пів року експлуатації досягла 3,09 %, а горизонтальна – 1,67 %.

Однією із проблем дефектності споруд із МГК в експлуатації є відсутність достовірних методів оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій великих поперечних перерізів, які зазнають динамічних навантажень від рухомого складу залізниці, що спричиняє допущення помилок при проектуванні даних конструкцій.

Зазначена проблема і вимагає розробки нових методів оцінювання та підвищення несучої здатності транспортних споруд із МГК з метою оцінки можливості їх застосування на залізничній колії при дії динамічних навантажень від рухомого складу залізниці. Цьому питанню і присвячено дане наукове дослідження.

Мета

Метою роботи є визначення несучої здатності тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій великого поперечного перерізу при дії динамічних навантажень рухомого складу залізниці.

Методика

Металеві гофровані конструкції застосовуються для будівництва водопропускних та ін-

ших підземних споруд з кінця XIX століття (Гнедовский, 1938; Жинкин, 2011; Ковальчук, 2015; Luchko, & Kovalchuk, 2016; Kovalchuk, Markul, Pentsak, Parneta, Gajda, & Braichenko, 2017; Kovalchuk, V., Kovalchuk, Yu., Sysyn, Stankevych, & Petrenko, 2018). На даний час накопичений великий досвід експлуатації металевих гофрованих конструкцій, які знаходяться у тілі насипу автомобільних доріг і практично відсутній досвід експлуатації їх у тілі насипу залізничної колії.

При проектуванні МГК інженери зіткнулися з низкою проблем. Так порівнюючи закордонні (Брик, Пенашев, & Болотовский, 1980; AASHTO, 2001; CHBDC, 2002; Handbook of steel drainage and highway construction products, 2002; ОДМ 218.2.001-2009, 2009) та вітчизняні (Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007, 2007) норми проектування були виявлені суттєві відмінності в граничних висотах насипу над МГК при однаковій товщині стінки гофри. Як виявилось, конструкції іноземних проєктів витримують вагу набагато вищих насипів. На початковому етапі припустили, що різниця у несучій здатності МГК зумовлена розходженням фізико-механічних властивостей металу конструкцій. Проте вивчення іноземних норм показало, що марки вітчизняних сталей, які використовуються при будівництві МГК, є міцнішими, аніж за кордоном. Реальна ж причина була у принципових розходженнях норм у частині розрахунку МГК. В Україні розрахунок МГК поперечним перерізом до 3 метрів виконується згідно норм (Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007, 2007). Відповідно яких граничний стан МГК визначається граничною статичною рівновагою взаємодії системи «конструкція-грунт» і, виходячи з якого, можна знайти несучу здатність конструкції. Рекомендована формула містить ряд емпіричних коефіцієнтів та не включає безпосередніх міцнісних характеристик металу конструкції та параметрів ґрунтової засипки.

За кордоном (Брик, Пенашев, & Болотовский, 1980; AASHTO, 2001; CHBDC, 2002; Handbook of steel drainage and highway construction products, 2002; ОДМ 218.2.001-2009, 2009) оцінюють міцність та стійкість стінки гофри конструкції при впливі на склепіння конструкції ваги стовпа ґрунту та тиску від тимчасового навантаження на рівні верху конструкції.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Спільна робота МГК з ґрунтом при достатній висоті засипки над склепінням враховується шляхом уведення знижуючого коефіцієнту до суми тимчасового та постійного навантажень, який залежить від ступеня ущільнення ґрунтової призми навколо споруди. Подібна перевірка міцності та стійкості стінки конструкцій входить у норми (ОДМ 218.2.001-2009, 2009), однак майже ніколи не буває граничною.

По різному визначається і тиск від тимчасового навантаження. При однаковій висоті засипки над конструкцією частка тимчасового навантаження у сумарному тиску на склепіння конструкції, як правило, за українськими нормами (Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007, 2007) буде більшою, хоча в іноземних нормах (AASHTO, 2001; CHBDC, 2002; Handbook of steel drainage and highway construction products, 2002; ОДМ 218.2.001-2009, 2009) враховують динамічні навантаження, а при мінімальних засипках інтенсивність іноземного нормативно-

го навантаження є більшою, ніж аналогічного вітчизняного.

Слід зазначити, що на сьогоднішній день в Україні взагалі відсутні норми проектування та методи розрахунку металевих гофрованих конструкцій, які експлуатуються у тілі насипу залізничної колії. Таким чином, ідеальним рішенням для стимулювання будівництва металевих гофрованих конструкцій на залізницях України було б створення рекомендацій із проектування та оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій, які зазнають навантажень від рухомого складу залізниці.

Результати

На сьогоднішній день на залізницях України експлуатується труба із металевих гофрованих конструкцій на 310 км ділянці Вадул-Сирет – Держкордон Львівської залізниці (рис. 2, а) та тунельний шляхопровід із МГК у м. Кропивницькому (рис. 2, б).



Рис. 2. Транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій на залізницях України:
а – металева гофрована труба на ділянці Вадул-Сирет – Держкордон Львівської залізниці
та б – тунельний шляхопровід у м. Кропивницькому

Поперечні перерізи зазначених споруд є більшими за 6 м, а в Україні взагалі відсутні норми їх проектування під залізничною колією. Тому наведемо методику оцінки несучої здатності таких споруд.

Розрахунок вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції шляхопроводу у залежності від швидкості руху транспортних одиниць. При визначенні несучої здатності МГК за основу прийнято конструкцію, яка експлуатується під залізничною колією і пропускає автомобільний транспорт по вул. Миколи Левитського (Колгоспний) (Новина від 30 січня 2018 року) у м. Кропивницькому (рис. 2, б).

Вихідні дані, які були прийняті для розрахунку еквівалентних сил від дії рухомих транспортних одиниць, наведено в таблиці 1. Геометричні та фізико-механічні параметри металевої гофрованої конструкції та ґрунтової засипки прийнято згідно з джерелом (Звіт з обстеження та випробування тунелю №1838-ЗВ-3, 2019), а саме: поперечний переріз – еліпс із шириною конструкції – 9,23 м та висотою конструкції – 8,12 м; висота ґрунтової засипки – 2,57 м; матеріал засипки гофрованої конструкції – щебено-піщана суміш фракцій 0,01...40 мм. Основними факторами впливу на несучу здатність металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу є нерівність геометрії колії над шляхопро-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

водом та ступень ущільнення ґрунтової засипки (Даніленко, & Рибкін, 2006).

Нерівність геометрії колії розглядається у вигляді задання нерівності, яка утворюється

при перекочуванні колеса рухомого складу залізничного транспорту через рейковий стик, зазор у якому становив 26 мм (Звіт з обстеження та випробування тунелю №1838-3В-3, 2019).

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку еквівалентних сил

№ з/п	Вид вихідних даних	Розмірність	Значення
1	Рухомий склад	—	ЧМЭ 3, 2М62, вантажного вагона із візками типу 4ЦНИИ-ХЗ-0, пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦНИИ
2	Швидкість	км/год	40, 80, 100
3	Тип рейок	—	Р65
4	Тип шпал	—	залізобетонні
5	Рід баластної подушки	—	щебенево-піщана
6	Висота ґрунтової засипки	м	2,57
7	Модуль пружності підрейкової основи	МПа	73,6
8	Відстань між осями шпал	м	0,5
9	α_0	—	0,403
10	γ	—	1
11	α_1	—	0,931
12	ϵ	—	0,332
13	β	—	0,87
14	Момент інерції рейки відносно горизонтальної осі	см ⁴	3548
15	Момент опору рейки відносно горизонтальної осі	см ³	436
16	Опорна площа підкладки	см ²	262,5
17	Довжина шпали	см	270
18	Ширина нижньої постелі шпали	см	27,5

Визначення еквівалентних лінійних навантажень на металеву гофровану конструкцію. Наведемо методику розрахунку еквівалентних сил, які діють на шпали залізничної колії у місці експлуатації металевої гофрованої конструкції у залежності від параметрів геометричної нерівності колії, що утворюється від процесів осідання щебенево-піщаного шару.

Згідно з роботою (Даніленко, & Рибкін, 2006), у розрахунковому перерізі рейки, тобто в перерізі, де визначаються навантаження, діє максимальне ймовірне динамічне колісне нава-

нтаження $P_{розр} = P_{дин}^{max}$, а вплив сусідніх і далі розташованих коліс приймається у вигляді середнього динамічного тиску $\bar{P}_{дин}$. Враховуючи те, що максимум динамічного тиску розрахункового колеса не співпадає з максимумом тиску сусідніх коліс (рис. 3), у практичних розрахунках враховується дія двох сусідніх коліс, розташованих по обидва боки від розрахункового, оскільки далі розташовані колеса практично здійснюють незначний вплив на навантаження (Даніленко, & Рибкін, 2006).

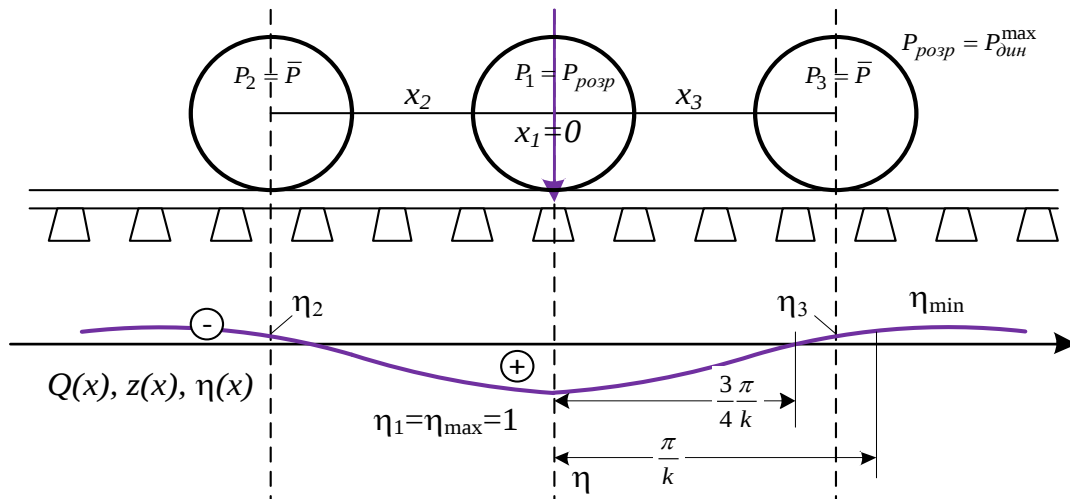


Рис. 3. Лінії впливу прогинів від дії одиничного колісного навантаження $P_1=1$, прикладеного в розрахунковому перерізі при завантаженні лінії впливу тривісним візком (Даніленко, & Рибкін, 2006)

Вплив на рейкову нитку всіх інших коліс поїзда враховується за допомогою завантаження лінії впливу поперечних сил Q (від дії одиничного колісного навантаження $P=1$) системою колісних навантажень $\bar{P}_{дин}$ і визначенням еквівалентних навантажень $P_{екв}^{II}$ за допомогою функції η_s , яка визначає ступінь впливу на розрахунковий переріз кожного з інших коліс поїзда (рис. 3).

Розрахунок еквівалентних динамічних навантажень проводиться згідно з роботою (Даніленко, & Рибкін, 2006) за формулою:

$$P_{екв}^{II} = P_{дин}^{max} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i. \quad (1)$$

Функція η_i знаходиться у залежності від величини kx_i , де x_i – відповідає відстаням від розрахункового перерізу до кожного колеса, яке враховується:

$$\eta_i = e^{-kx_i} (\cos kx_i + \sin kx_i). \quad (2)$$

Сусідні колеса можуть здійснювати як позитивний, так і негативний вплив (внаслідок зміни знаку функції η по довжині балки), тобто вони можуть довантажувати або розвантажувати розрахунковий переріз (Даніленко, & Рибкін, 2006). Сили тиску рейки на розрахункову і сусідні шпали визначаються за формулами:

$$Q_{p1} = \frac{kl_{ш}}{2} \cdot P_{екв(розр)}^{II} = \frac{kl_{ш}}{2} (P_{розр1} + \sum \bar{P} \cdot \eta_{2,3}), \quad (3)$$

$$Q_{c2} = \frac{kl_{ш}}{2} \cdot P_{екв(c2)}^{II} = \frac{kl_{ш}}{2} (P_{розр} \eta_{p2} + \sum \bar{P} \eta_{c2}), \quad (4)$$

$$Q_{c3} = \frac{kl_{ш}}{2} \cdot P_{екв(c3)}^{II} = \frac{kl_{ш}}{2} (P_{розр} \eta_{p3} + \sum \bar{P} \eta_{c3}). \quad (5)$$

При розрахунку сил тиску на шпали Q_{p1} , Q_{c2} і Q_{c3} ординати η_i ліній впливу поперечних сил знаходяться залежно від відстаней до шпал, що розглядаються (для яких визначається тиск Q) до врахування коліс (розрахункового або сусідніх з ним). Так ординати ліній впливу $\eta_{2,3}$ враховують вплив сусідніх коліс на розрахункову шпалу і відповідають відстаням від осі розрахункової шпали до сусідніх коліс (ліворуч і праворуч), тобто для відстаней X_2 і X_3 (рис. 4).

Ординати η_{p2} і η_{p3} враховують вплив навантажень від розрахункового колеса на сусідні шпали і визначаються для відстані розташування розрахункового навантаження від розглядуваної суміжної з розрахунковою шпали (ліворуч або праворуч від неї), тобто для відстані $l_{ш} = \text{const}$; $\eta_{p2} = \eta_{p3}$.

Ординати ліній впливу η_{c2} і η_{c3} враховують вплив сусідніх осей екіпажу на навантаження шпал, сусідніх з розрахунковою, тобто відповідають відстаням розташування відповідно: для η_{c2} – відстаням $X_2 - l_{ш}$ і $X_3 + l_{ш}$; для η_{c3} – відстаням $X_3 - l_{ш}$ і $X_2 + l_{ш}$.

Шляхом суперпозиції нормальних напружень у ґрунтовій засипці над поверхнею металевих гофрованих конструкцій враховується сумарний вплив кожної шпали у вигляді прямокутного навантаження із координатами відносно осі споруди із МГК.

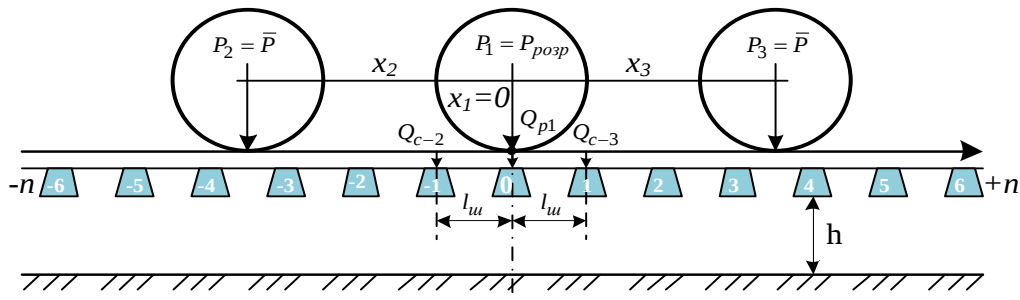


Рис. 4. Розрахункова схема до визначення сил тиску на шпали від поїзного навантаження (Даніленко, & Рибкін, 2006)

Розрахункова схема розташування навантажень від шпал на щебеневу-піщаний баластний шар наведена на рис. 5. Осі Y відповідає вісь колії, а осі споруди із МГК – вісь X .

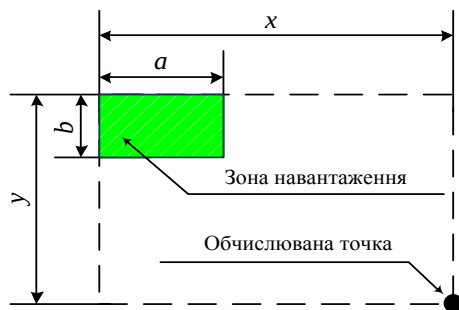


Рис. 5. Схема передачі навантажень на ґрунтову засіпку при прямокутній формі передачі навантажень (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007)

Далі для розрахунку вертикального тиску від прямокутного навантаження, що відповідає одній шпалі за співвідношеннями Буссінеска (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007; Kovalchuk, Markul, Pentsak, Parneta, Gajda, & Braichenko, 2017), визначаємо стискуючі напруження для кутових точок за формулою:

$$\sigma_{zc} = \frac{p}{2\pi} \left[\frac{lbz}{D} \cdot \frac{l^2 + b^2 + 2z^2}{D^2 z^2 + l^2 b^2} + \arcsin \left(\frac{lb}{\sqrt{r^2 + z^2} \sqrt{b^2 + z^2}} \right) \right], \quad (6)$$

де p – інтенсивність рівномірного розподіленого навантаження;

l, b – відповідно довжина і ширина ділянки.

Величина r розраховується за формулою:

$$(D/2)^2 = r^2 = l^2 + b^2 + z^2. \quad (7)$$

Аналогічно визначаємо напруження σ_{z0} під центром завантаженого прямокутника. Згідно з

працями (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007), фактичне навантаження від рухомого складу перетворюється за допомогою формул розподілу напружень у півпросторі Буссінеска в еквівалентне лінійне навантаження, що дає те ж вертикальне напруження на рівні верху металеві гофрованої конструкції. Вертикальні напруження σ_v на глибині z пружного тіла (вертикально під навантаженням), спричинені лінійним навантаженням p на півпросторі, визначаються за формулою:

$$\sigma_v = \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot z}. \quad (8)$$

Для точкового навантаження це співвідношення має вигляд:

$$\sigma_v = \frac{3 \cdot P \cdot h_c^3}{2\pi \cdot s^5}, \quad (9)$$

де s – довжина похилої, відстань між точкою навантаження та розрахунковою точкою;

P – значення точкового навантаження від рухомих транспортних засобів.

Після визначення напружень за формулами (8) і (9) визначаємо еквівалентне лінійне навантаження на вершину металеві гофрованої конструкції за формулою:

$$p_{tr} = \frac{\pi(h_s + h_b)}{2} \sigma_v. \quad (10)$$

Еквівалентне навантаження, визначене за формулою (10), відповідає найбільшому вертикальному навантаженню, яке припадає на вершину металевих гофрованих конструкцій від дії транспортних засобів (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Результати розрахунку вертикального тиску на вершину металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу від локомотивів: ЧМЭ 3, 2М62, вантажного вагона із візками типу 4ЦНІІІ-ХЗ-0

та пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦНІІІ, при швидкості руху рухомого складу 40 км/год наведені на рис. 6 та рис. 7.

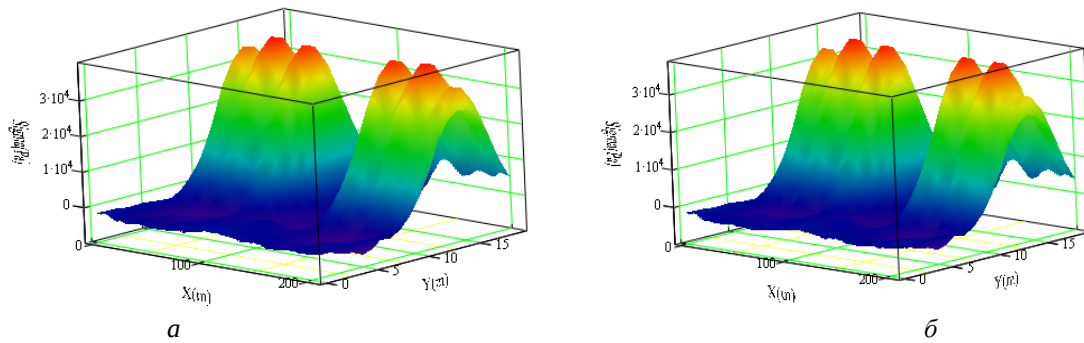


Рис. 6. Розподіл вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції від локомотиву ЧМЭ 3 (а) та від локомотиву 2М62 (б) при швидкості руху 40 км/год

Величина вертикального тиску на вершину шляхопроводу при швидкості руху рухомого складу залізниці 40 км/год від локомотиву ЧМЭ 3 становить 39,31 кПа, від локомотиву

2М62 – 37,55 кПа, від вантажного вагона із візками типу 4ЦНІІІ-ХЗ-0 – 40,96 кПа та від пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦНІІІ – 34,48 кПа.

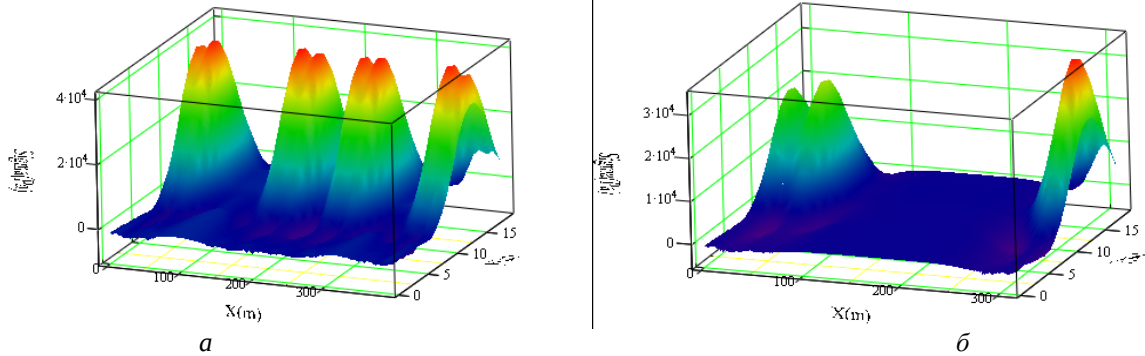


Рис. 7. Розподіл вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції від вантажного вагона із візками типу 4ЦНІІІ-ХЗ-0 (а) та від пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦНІІІ (б) при швидкості руху 40 км/год

Результати розрахунку вертикального тиску на вершину шляхопроводу від локомотивів: ЧМЭ 3, 2М62, від вантажного вагона із візками типу 4ЦНІІІ-ХЗ-0 та від пасажирського вагона

із візками типу КВЗ-ЦНІІІ, при швидкості руху рухомого складу залізниці 80 км/год наведені на рис. 8 та рис. 9.

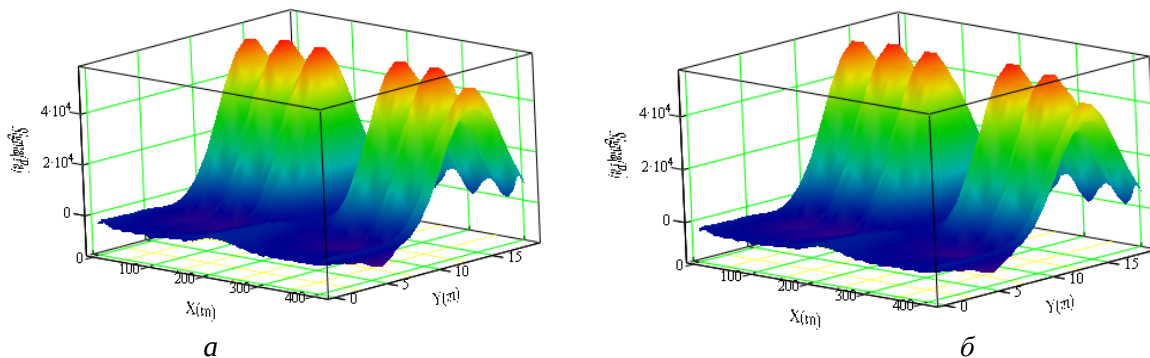
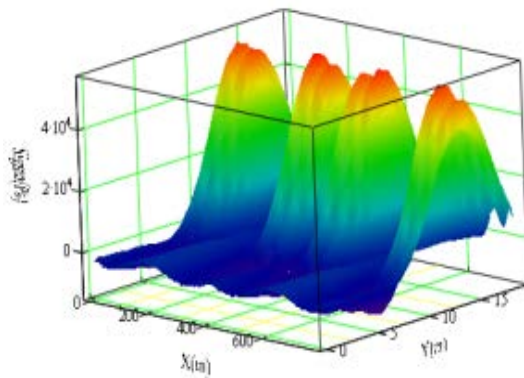


Рис. 8. Розподіл вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції від локомотиву ЧМЭ 3 (а) та від локомотиву 2М62 (б) при швидкості руху 80 км/год

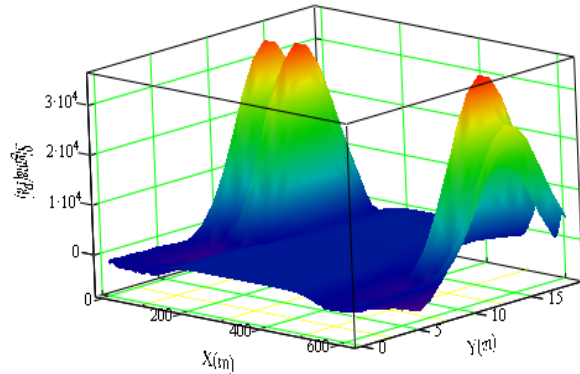
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Величина вертикального тиску на вершину МГК шляхопроводу при швидкості руху рухомого складу залізниці 80 км/год від локомотиву ЧМЭ 3 становить 56,65 кПа, від локомотиву

2М62 – 55,53 кПа, від вантажного вагона із візками типу 4ЦНІИ-ХЗ-0 – 52,47 кПа та від пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦНІИ – 35,23 кПа.



а

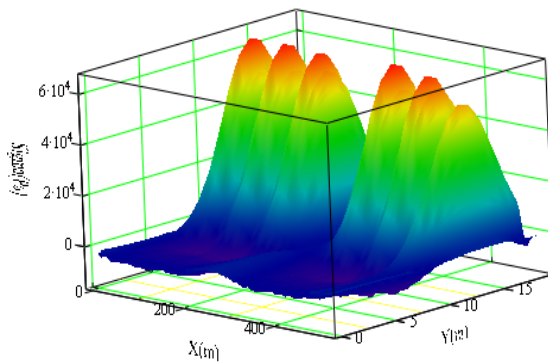


б

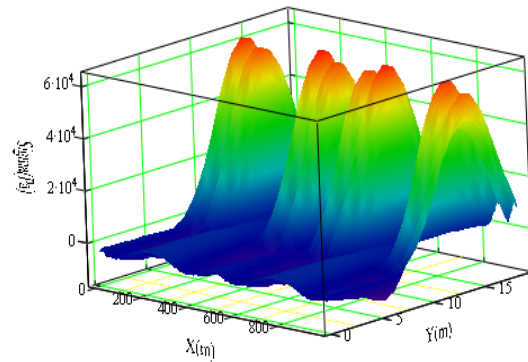
Рис. 9. Розподіл вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції від вантажного вагона із візками типу 4ЦНІИ-ХЗ-0 (а) та від пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦНІИ (б) при швидкості руху 80 км/год

Результати розрахунку вертикального тиску на вершину МГК шляхопроводу від локомотиву 2М62, від вантажного вагона із візками типу 4ЦНІИ-ХЗ-0 та від пасажирського вагона із

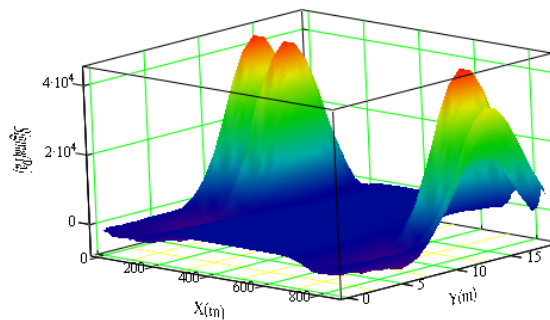
візками типу КВЗ-ЦНІИ, при швидкості руху рухомого складу залізниць 100 км/год наведені на рис. 10.



а



б



в

Рис. 10. Розподіл вертикального тиску на вершину металевої гофрованої конструкції від локомотиву 2М62 (а), вантажного вагона із візками типу 4ЦНІИ-ХЗ-0 (б) та пасажирського вагону із візками типу КВЗ-ЦНІИ (в) при швидкості руху 100 км/год

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Величина вертикального тиску на вершину МГК шляхопроводу при швидкості руху рухомого складу залізниць 100 км/год від локомотиву 2М62 становить 65,56 кПа, від вантажного вагона із візками типу 4ЦНИИ-ХЗ-0 – 63,31 кПа та від пасажирського вагона із візками типу КВЗ-ЦНИИ – 43,96 кПа.

Далі виконуємо багатоваріантний розрахунок перевірки металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу на допустимі напруження та величини коефіцієнту пластичного шарніру за розрахованими значеннями еквівалентних сил від локомотивів ЧМЭ 3 та 2М62, вантажного вагона із візками 4ЦНИИ-ХЗ-0 та пасажирського вагона із візками КВЗ-ЦНИИ відповідно до удосконаленої аналітичної методики.

Перевірка металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу за допустимими напруженнями та величини коефіцієнту пластичного шарніру. При дослідженні несучої здатності МГК тунельного шляхопроводу враховується ступень ущільнення ґрунтової засипки та динамічне навантаження від рухомого складу. Удосконалена методика оцінки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій наведена у дисертаційній роботі автора (2019).

Максимальні напруження у стінці металевої гофрованої конструкції розраховуються за формулою:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{\xi M}{W} < f_{yd}, \quad (11)$$

де N, M – осьові сили та моменти сил у стані нормальної експлуатації конструкції; A, W – площа поперечного перерізу та момент опору перерізу на одиницю довжини конструкції; f_{yd} – границя текучості сталі металевої гофрованої конструкції.

Важливим моментом оцінки несучої здатності МГК є перевірка умови утворення пластичного шарніру у склепінні конструкції.

Згідно із працями (Pettersson, Leander, & Hansing, 2002; Pettersson, & Sundquist, 2007), перевірка розвитку пластичного шарніру на максимально завантажену ділянку конструкції виконується за формулою:

$$\left(\frac{N_{d,u}}{\omega f_{yd} A} \right) + \left(\frac{M_{d,u}}{M_u} \right) \leq 1,0, \quad (12)$$

де $N_{d,u}, M_{d,u}$ – нормальна сила та момент сил у гранично можливому стані експлуатації конструкції; M_u – допустиме значення згинального моменту одиниці довжини профілю конструкції, при якому досягаються напруження текучості.

Перевірку металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу на допустимі напруження та величини коефіцієнту пластичного шарніру проведено при ступені ущільнення ґрунтової засипки рівному $RP=97\%$ та модулю пружності підрейкової основи 73,6 МПа. Результати розрахунків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Перевірка шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій на допустимі напруження та величини коефіцієнту пластичного шарніру при модулю пружності підрейкової основи 73,6 МПа

Експлуатаційні навантаження	Ступень ущільнення ґрунтової засипки		
	$RP=97\%$		
Швидкість рухомого складу залізниць, км/год	40	80	100
Локомотив ЧМЭ 3	99,02/0,243	129,68/0,353	–
Локомотив 2М62	95,91/0,232	127,82/0,307	145,45/0,41
Вантажний вагон із візками 4ЦНИИ-ХЗ-0	101,94/0,254	127,69/0,307	141,45/0,395
Пасажирський вагон із візками КВЗ-ЦНИИ	90,49/0,213	91,81/0,218	107,24/0,272

Примітка: У чисельнику наведені значення напружень, а в знаменнику – значення величин коефіцієнту пластичного шарніру

Аналіз результатів багатоваріантного розрахунку напружень, які виникають у вершині склепіння металевих гофрованих конструкцій, показав, що максимальне значення напружень

виникає при проходженні ділянкою залізничної колії локомотива 2М62 і вони становлять 145,45 МПа, що є меншим за 355 МПа. При цьому коефіцієнт величини пластичного шар-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ніру становить 0,41, що є меншим за 1,0. Отже, перевірка умови на виникнення пластичного шарніру у металевих гофрованих конструкціях шляхопроводу при ступені ущільнення ґрунтової засипки $RP=97\%$ та дії динамічних навантажень від рухомих транспортних одиниць залізниці виконується, оскільки умова виникнення пластичного шарніру є меншою за допустиму величину, одиницю.

Наукова новизна та практична значимість

Проведені динамічні розрахунки металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу від дії рухомих транспортних одиниць показують, що метал гофрованої конструкції працює у пружній стадії та має достатній запас несучої здатності.

Отже, підсумовуючи, хочу зазначити, що металеві гофровані конструкції є перспективними транспортними спорудами для застосування на залізниці України, що сприятиме економії коштів держави у випадках природних катастроф та при реконструкції транспортних об'єктів таких, як малі мости та водопропускні труби. Також споруди із МГК можуть використовуватися при капітальному будівництві, оскільки вони мають великий запас несучої здатності і їх застосування надасть державі можливість зекономити витрати коштів на транспортне будівництво.

Висновки

На основі проведеної оцінки несучої здатності тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій, при дії динамічних навантажень від рухомого складу залізниць, отримано наступні висновки:

1. Швидкість рухомих транспортних одиниць має значний вплив на несучу здатність споруд із металевих гофрованих конструкцій. При збільшенні швидкості на 40 км/год напруження у металевих гофрованих конструкціях збільшуються на 35 %. Тому у початковий період експлуатації споруд із металевих гофрованих конструкцій рекомендується обмежувати швидкість руху транспортних одиниць залізниці до 40 км/год протягом півроку з моменту введення їх в експлуатацію.

2. Встановлено, що максимальні напружень у металевій гофрованій конструкції виникають при проходженні ділянкою залізничної колії

локомотива 2М62 і складають 145,45 МПа, що є меншим за 355 МПа. При цьому коефіцієнт величини пластичного шарніру становить 0,41, що є меншим за 1,0.

3. Проведені розрахунки несучої здатності металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу при дії рухомих транспортних одиниць показують, що метал гофрованої конструкції працює у пружній стадії та має достатній запас несучої здатності. Тому такі конструкції можуть використовуватися у транспортному будівництві на залізницях України при умові забезпечення якісного виконання комплексу будівельних робіт стосовно забезпечення нормативного ступеня ущільнення ґрунтової засипки (97 %) та недопущення розвитку експлуатаційних нерівностей на рейковій колії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- AASHTO (2001). *Standard Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- CHBDC (2002). *Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7 – Code, Buried Structures (Final)*.
- Handbook of steel drainage and highway construction products* (2002). Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute.
- Kovalchuk, V., Kovalchuk, Yu., Sysyn, M., Stankevych, V., & Petrenko, O. (2018). Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate MP 150 during interaction with backfill soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1 (91), 18-26.
- Kovalchuk, V., Markul, R., Pentsak, A., Parneta, B., Gajda, O., & Braichenko, S. (2017). Study of the stress-strain state in defective railway reinforced-concrete pipes restored with corrugated metal structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/1 (89), 37-44.
- Luchko, J. & Kovalchuk, V. (2016). Methods of assessing the bearing capacity of corrugated metal structures. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 3(83), 79-90.
- Pettersson, L., Leander, J., & Hansing, L. (2002). Fatigue design of soil steel composite bridges. *Archives of institute of civil engineering*, 12, 237-242.
- Pettersson, L. & Sundquist, H. (2007). *Design of soil steel composite bridges*. Structural Design and Bridges, Stockholm.
- Брик, А. Л., Пенашев, А. В., & Болотовский, Р. Г. (1980). Об особенностях работы металлических гофрированных труб в теле насыпи. *Улучшение эксплуатационных качеств и содержания мостов и водопропускных труб*, 92-100.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Гнедовский, В. Н. (1938). *Трубы под железнодорожными насыпями*. Москва: Трансжелдориздат.
- Даніленко, Е. І., & Рибкін, В. В. (2006). *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість* (ЦП/0117; Затверджено наказом Укрзалізниця від 13. 12. 2004 р. № 960 ЦЗ). Київ: Транспорт України.
- Жинкин, А. (2011). Проблемы и перспективы типового проектирования металлических гофрированных конструкций. *Транспорт Российской Федерации*, 2, 53-54.
- Звіт з обстеження та випробування тунелю №1838-3В-3 (2019). *Науково-технічний супровід будівництва тунелю із збірної оцинкованої конструкції у м. Кропивницькому з розрахунком, обстеженням і випробуванням по об'єкту: Реконструкція проїжджої частини вул. Ельворті, вул. Миколи Левитського (Колгоспної) в м. Кропивницький (1 черга об'єкту будівництва)*.
- Ковальчук, В. В. (2015). Перспективи застосування металевих гофрованих конструкцій на залізничних та автомобільних дорогах України. *Залізничний транспорт України*, 2 (111), 32-37.
- Ковальчук, В. В. (2019). *Несуча здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації* (Дис. докт. техн. наук). Одеська державна академія будівництва та архітектури.
- Новина від 30 січня 2018 року. У міській раді Кропивницького презентували майбутній шляхопровід між вулицями Ельворті і Миколи Левитського. – [Електронний ресурс], режим доступу: <http://www.kr-rada.gov.ua/news/u-miskiy-radi-kropivnitskogo-prezentovali-maybutniy-shlyahoprovid-mizh-vulitsyami-elvorti-i-mikoli-levitskogo.html>
- ОДМ 218.2.001-2009 (2009). *Рекомендации по проектированию водопропускных металлических гофрированных труб*: Распоряжение Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. № 252-р.
- Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007 (2007). *Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування*.

В. В. КОВАЛЬЧУК

Кафедра «Подвижной состав и путь», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Львовский филиал, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, эл. почта kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТУННЕЛЬНОГО ПУТЕПРОВОДА ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Цель. Целью работы является определение несущей способности металлических гофрированных конструкций туннельного путепровода большого поперечного сечения при действии динамических нагрузок от железнодорожного транспорта. Такие исследования необходимы для обоснования возможности применения металлических гофрированных конструкций в теле насыпи железнодорожного пути. **Методика.** Определение несущей способности туннельного путепровода проведено с помощью усовершенствованной аналитической методики оценки несущей способности металлических гофрированных конструкций большого поперечного сечения (более 6,0 м). **Результаты.** Результаты многовариантных расчетов металлических гофрированных конструкций туннельного путепровода показали, что максимальные значения напряжений в конструкции возникают при проезде участком железнодорожного пути локомотива 2М62 и они составляют 145,45 МПа, а коэффициент величины пластического шарнира составляет 0,41. Проведенные динамические испытания металлических гофрированных конструкций путепровода от действия движущихся транспортных единиц показывают, что металл гофрированной конструкции работает в упругой стадии и имеет 60 % запас несущей способности. **Научная новизна.** Впервые проведена оценка несущей способности туннельного путепровода из металлических гофрированных конструкций большого поперечного сечения при взаимодействии с грунтовой засыпкой с учетом степени уплотнения грунтовой засыпки и величины динамической нагрузки от подвижного состава. **Практическая значимость.** Полученные результаты напряженно-деформированного состояния туннельного путепровода могут быть полезными для проектных организаций, которые занимаются расчетами подобных конструкций, эксплуатируемых в теле насыпи железнодорожного пути. Сооружения из металлических гофрированных конструкций могут использоваться в железнодорожном

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ном строительстве в виде малых мостов, водопропускных труб и путепроводов, поперечным сечением до 14,0 м.

Ключевые слова: туннельный путепровод; металлическая гофрированная конструкция; динамическая нагрузка; вертикальные силы давления; напряжения; коэффициент пластического шарнира

V. V. KOVALCHUK

Department of Rolling stock and track, Dnipro national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lviv branch, I. Blazhkevych Str. 12 a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (097) 223 72 43, e-mail kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756

ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF THE TUNNEL UNDERPASS MADE OF METAL CORRUGATED STRUCTURES DURING DYNAMIC LOADS OF RAILWAY TRANSPORT

Purpose. The purpose of this work is to determine the load-bearing capacity of metal corrugated structures of a tunnel underpass with a large cross-section under the influence of dynamic loads from railway transport. Such studies are necessary to substantiate the possibility of using corrugated metal structures in the body of a railway track embankment. **Methodology.** Determination of the bearing capacity of a tunnel underpass was carried out with the help of an advanced analytical method of estimation of the bearing capacity of metal corrugated structures with large cross-section (more than 6.0 m). **Findings.** The results of multivariate calculations of metal corrugated structures of a tunnel underpass showed that the maximum stresses in the structure occur when locomotive 2M62 passes a section of the railway track and they correspond to 145.45 MPa, while the coefficient of plastic hinge is 0.41. The calculations of the bearing capacity of metal corrugated structures of the tunnel overpass under the action of moving transport units show that the metal of the corrugated structure operates in the elastic stage and has a sufficient margin of bearing capacity. Dynamic tests of metal corrugated structures of an underpass from the action of moving transport units show that the metal of a corrugated structure works at the elastic stage and has a 60 % margin of bearing capacity. **Originality.** For the first time, the load-bearing capacity of a tunnel underpass made of corrugated metal structures with large cross-sections was evaluated during its interaction with soil backfill, with respect to the degree of ground backfill compaction and the magnitude of the dynamic load from the rolling stock. **Practical value.** The obtained results of the stress-strain state of a tunnel underpass can be useful for project organizations engaged in calculation of similar structures in the body of the railway track. Corrugated metal structures can be used in railway construction in the form of small bridges, culverts and underpasses with cross-sections up to 14.0 m.

Keywords: tunnel underpass; corrugated metal structure; dynamic loading; vertical pressure forces; stresses; coefficient of plastic hinge

REFERENCES

- AASHTO (2001). *Standard Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials. (in English)
- CHBDC (2002). *Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7 – Code, Buried Structures (Final)*. (in English)
- Handbook of steel drainage and highway construction products* (2002). Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. (in English)
- Kovalchuk, V., Kovalchuk, Yu., Sysyn, M., Stankevych, V., & Petrenko, O. (2018). Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate MP 150 during interaction with backfill soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1 (91), 18-26. (in English)
- Kovalchuk, V., Markul, R., Pentsak, A., Parneta, B., Gajda, O., & Braichenko, S. (2017). Study of the stress-strain state in defective railway reinforced-concrete pipes restored with corrugated metal structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/1 (89), 37-44. (in English)
- Luchko, J. & Kovalchuk, V. (2016). Methods of assessing the bearing capacity of corrugated metal structures. *Біжнік Тернопільського національного технічного університету*, 3(83), 79-90. (in English)
- Pettersson, L., Leander, J., & Hansing, L. (2002). Fatigue design of soil steel composite bridges. *Archives of institute of civil engineering*, 12, 237-242. (in English)
- Pettersson, L. & Sundquist, H. (2007). *Design of soil steel composite bridges*. Structural Design and Bridges, Stockholm. (in English)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Brik, A. L., Penashev, A. V., & Bolotovskij, R. G. (1980). Ob osobennostjah raboty metallicheskih gofriro-vannyh trub v tele nasypi. *Uluchshenie jekspluatacionnyh kachestv i sodержaniya mostov i vodopropusknyh trub*, 92-100. (in Russian)

Gnedovskij, V. N. (1938). *Truby pod zheleznodorozhnymi nasypjami*. Moskva: Transzheldorizdat. (in Russian)

Danilenko, E. I., & Rybkin, V. V. (2006). *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoji koliji na micnistj i stijkistj* (CP/0117; Zatverdzheno nakazom Ukrzaliznyci vid 13. 12. 2004 r. № 960 CZ). Kyjiv: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)

Zhinkin, A. (2011). Problemy i perspektivy tipovogo proektirovanija metallicheskih gofrirovannyh konstrukcij. *Transport Rossijskoj Federacii*, 2, 53-54. (in Russian)

Zvit z obstezhennja ta vyprobuvannja tunelju №1838-ZV-3 (2019). *Naukovo-tekhnichnyj suprovid budivnytva tunelju iz zbirnoji ocynkovanoji konstrukciji u m. Kropyvnyckomu z rozrakhunkom, obstezhennjam i vyprobuvannjam po ob'jektu: Rekonstrukcija projizhdzhoji chastyny vul. Eljvorti, vul. Mykoly Levytsjkogho (Kolghospnoji) v m. Kropyvnyckyj (1 cherga ob'jektu budivnytva)*. (in Ukrainian)

Kovaljchuk, V. V. (2015). Perspektivy zastosuvannja metalevykh ghofrovanykh konstrukcij na zaliznychnykh ta avtomobilnykh dorogakh Ukrainy. *Zaliznychnyj transport Ukrainy*, 2 (111), 32-37. (in Ukrainian)

Kovaljchuk, V. V. (2019). *Nesucha zdatnistj transportnykh sporud iz metalevykh ghofrovanykh konstrukcij v umovakh ekspluataciji* (Dys. dokt. tekhn. nauk). Odesjka derzhavna akademija budivnytva ta arkhitektury. (in Ukrainian)

Novyna vid 30 sichnja 2018 roku. *U misjkij radi Kropyvnyckogho prezentuvaly majbutnij shljahoprovid mizh vulycjamy Eljvorti i Mykoly Levytsjkogho*. – [Elektronnyj resurs], rezhym dostupu: <http://www.kr-rada.gov.ua/news/umiskiy-radi-kropivnitskogo-prezentuvali-majbutnij-shlyahoprovid-mizh-vulitsyami-elvorti-i-mikoli-levitskogo.html> (in Ukrainian)

ODM 218.2.001-2009 (2009). *Rekomendacii po proektirovaniju vodopropusknyh metallicheskih gofriro-vannyh trub*: Rasporjazhenie Federal'nogo dorozhnogo agentstva ot 21 ijulja 2009 g. № 252-r. (in Russian)

Posibnyk do VBN V.2.3-218-198:2007 (2007). *Sporudy transportu. Proektuvannja ta budivnytvo sporud iz metalevykh ghofrovanykh konstrukcij na avtomobilnykh dorogakh zaghaljnogho korystuvannja*. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 16.04.2020.

Прийнята до друку 05.05.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.131.5/.134.1

Й. Й. ЛУЧКО^{1*}, Т. І. БУБНЯК², І. Б. КРАВЕЦЬ³

^{1*} Кафедра будівельних конструкцій, Львівський національний аграрний університет, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Україна, 80381, тел. +38 (097) 033 18 36, ел. пошта lychko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-3675-0503

² Кафедра вищої математики, Львівський національний аграрний університет, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Україна, 80381, тел. +38 (067) 990 06 67, ел. пошта tbubnyak@gmail.com, ORCID 0000-0002-2814-8571

³ Кафедра мостів та тунелів, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 479 00 50, ел. пошта kravetsivan2017@gmail.com, ORCID 0000-0002-2239-849X

МЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ У ҐРУНТОВОМУ МАСИВІ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ВИРОБКАХ (ОГЛЯД)

Мета. Метою роботи є огляд та аналіз існуючих науково-технічних джерел, які присвячені методам і способам горизонтальних виробок та технологічним процесам, які проходять у ґрунтовому масиві при прокладці інженерних комунікацій на основі досвіду провідних організацій. Дослідити ефективність застосування того чи іншого способу безтраншейної прокладки труб та інженерних комунікацій у сучасних умовах будівництва. **Методика.** На основі аналізу сучасних методів і способів силового впливу на ґрунтовий масив та механічних і технологічних процесів, які відбуваються у ґрунтовому масиві при горизонтальних виробках методом статичного проколу та методом продавлювання. Сформулювати загальні відомості про процеси в ґрунтовому масиві та вплив основних динамічних властивостей ґрунтів на вказані процеси. На основі відомих і існуючих даних для подальших досліджень ми сформулюємо основні теоретичні засади та відповідні припущення для дослідження механічних процесів при проведенні горизонтальних виробок тим чи іншим більш ефективним способом ущільнення ґрунтового масиву. Також вивести нестационарні рівняння руху ґрунту із врахуванням коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труби, та сформулювати розрахункову схему для виведення розрахункових рівнянь рівноваги ґрунтового масиву. **Результати.** Виконано аналіз вітчизняних та закордонних науково-технічних джерел щодо безтраншейних способів прокладки інженерних комунікацій. Зокрема, у вступі описано загальні відомості та актуальність і постановка проблеми дослідження механічних процесів у ґрунтовому масиві при горизонтальних виробках. Розглянуто основні дані літературних джерел, які дали змогу проаналізувати основні методи та способи прокладки інженерних комунікацій та змогу оцінити ефективність застосування того чи іншого способу в конкретній ситуації і умовах. Ґрунтовно проаналізовано можливості ефективного застосування методу статичного проколу методу продавлювання залежно від діаметра виробки. Сформульовані основні задачі, які необхідно розв'язати у майбутньому. **Наукова новизна.** В даній статті на основі аналізу науково-технічних джерел силового впливу на суцільний ґрунтовий масив, вдалось узагальнити результати досліджень впливу механічних і технологічних процесів на ґрунтовий масив. Зокрема, дослідити механічні процеси ущільнення ґрунтового масиву при виконанні виробки методом статичного проколу і методом продавлювання та встановити їх ефективність при прокладці підземних інженерних комунікацій закритим способом. Також, вперше досліджено вплив основних динамічних властивостей ґрунтів на процеси, які проходять у ґрунтовому масиві, при дії силового навантаження використовуючи той чи інший метод підземної виробки. **Практична значимість.** На підставі аналізу науково-технічних джерел силового впливу на ґрунтовий масив отримано дані про можливості ефективно застосовувати закриті (безтраншейні) способи прокладки водопропускних труб, каналізації, теплових трас, підземних переходів під залізничними та автомобільними дорогами та інших інженерних комунікацій, це особливо актуально для мегаполісів, але не всебічно вивчений цей напрямок і деякі аспекти потрібно досліджувати і уточнювати для подальшого практичного застосування.

Ключові слова: продавлювання; прокол ґрунту; ґрунтовий масив; проходка; виробка

Вступ

Найважливішим напрямком економічної політики в світі є підвищення ефективності всіх галузей народного господарства. Вирішення

цього завдання в галузі капітального будівництва інженерних споруд пов'язано із раціональним використанням виділених капітальних вкладень. Особливу увагу має бути звернено на впровадження прогресивних конструкцій і бу-

© Й. Й. Лучко, Т. І. Бубняк, І. Б. Кравець, 2020

дівельних матеріалів на будівництві чи усуненні наслідків руйнування земляного полотна залізничної колії та інших. Оскільки, підвищення ефективності капітальних вкладень значною мірою полягають в обґрунтованості рішень, прийнятих на стадії проектування об'єктів, які збільшать термін служби земляного полотна і штучних споруд та забезпечать надійний пропуск рухомого складу.

Розроблена в ИГД СО РАН класифікація способів спорудження горизонтальних свердловин в ґрунті, дала змогу систематизувати відомі технології та обґрунтувати можливі напрями їх розвитку (Данилов, 2012). В її основу покладено чотири головні ознаки, що відображають фізичну сутність процесу проходки свердловини в ґрунті. Основний з них – спосіб формування свердловини, який може бути реалізований:

- видаленням з масиву обсягу ґрунту по всьому перерізу свердловини;
- ущільненням обсягу ґрунту по всьому перерізу свердловини з витісненням його в масив переважно в радіальному напрямку;
- комбінацією першого і другого варіанту, коли більша частина ґрунту витягується з свердловини, а решта – вдавлюється в її стінки.

Комбінований варіант дає змогу забезпечити тимчасову стійкість свердловини з меншими витратами енергії в порівнянні з другим варіантом і без застосування закріплюючих розчинів, як в першому варіанті.

Перераховані варіанти способу утворення свердловин можуть бути реалізовані статичним, вібраційним і віброударними впливами на робочий орган або їх поєднанням.

Актуальність та постановка проблеми. При прокладці інженерних комунікацій під автомобільними і залізничними дорогами, трамвайними шляхами і іншими перешкодами більш ефективний є закритий метод, який не вимагає влаштування траншеї. У густонаселених та забудованих містах прокладка підземних комунікацій закритим способом не порушує благоустрою і санітарного стану та дезорганізацію у роботі міського транспорту. Тобто доцільність у цих випадках закритого способу прокладки комунікацій – метод безтраншейної прокладки, водопропускних труб, каналізації, теплових трас, переходів під залізничними та автомобільними дорогами очевидна. Основною

вимогою сучасних будівельних і екологічних нормативів є мінімізація впливу будівництва на існуючу інфраструктуру та природню екосистему, що дає поштовх до розвитку закритих (безтраншейних) способів розробки ґрунтових масивів (Рыбаков, 2006; Кравец, Каслин, Руднев, & Супонев, 2008). Потрібно зазначити, що характер ущільнення ґрунту при утворенні свердловин проколом подібний до вдавлювання паль (Васильев, 1964; Супонев, Олексин, & Хачатурян, 2016; Хачатурян, 2013), при цьому максимальне ущільнення ґрунту відбувається на поверхні паль і свердловин та акцентується увага на тому, як веде себе ґрунт на межі де пластичні деформації переходять у пружні. Недостатньо вивчено питання, на нашу думку, і механіки процесу наступного розширення свердловин до потрібного діаметру. Отже, насичена інфраструктура сучасних мегаполісів, жорсткіші будівельні і екологічні нормативи, направлені на мінімізацію втрат, нанесенню існуючим спорудам і природним екосистемам з наступним скороченням об'ємів та витрат при проведенні відновлювальних заходів, висувають на перший план розвиток закритих (безтраншейних) методів (Васильев, 1964; Васильев, & Лещенко, 1993).

Під час повеней у весняну та осінню пори року часто відбувається руйнування мостів та підмивання насипу земляного полотна залізничної колії чи автомобільної дороги. Для усунення наслідків розмиву земляного полотна залізничної колії виділяється велика сума грошей. Крім цього зупинення руху поїздів наносить значних економічних витрат для залізничної галузі через простій вантажних та пасажирських перевезень.

Для підвищення експлуатаційної надійності підтопленого земляного полотна під час повеней у весняну та осінню пори року, які спричиняють руйнування мостів та підмивання колії пропонується будівництво металевих гофрованих конструкцій (МГК) методом проколу масиву земляного полотна без перекривання руху та виконанням робіт у стислі терміни. Застосування водопропускних труб з використанням гофрованого металу для підвищення стійкості та міцності земляного полотна на залізничних та автомобільних дорогах України дасть змогу зменшити витрати коштів на усунення наслідків руйнування, а найголовніше забезпечить

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

безпечний пропуск рухомого складу. Тому робота із розробки технології будівництва (улаштування) металевих гофрованих труб у тілі підтоплювального земляного полотна продавлювання, проколу чи комбінованим методами є актуальною і своєчасною для будівельної галузі держави.

Мета

Метою роботи є огляд та аналіз існуючих науково-технічних джерел, які присвячені методам і способам горизонтальних виробок та технологічним процесам, які проходять у ґрунтовому масиві при прокладці інженерних комунікацій на основі досвіду провідних організацій. Дослідити ефективність застосування того чи іншого способу безтраншейної прокладки труб та інженерних комунікацій у сучасних умовах будівництва.

Методика

На основі аналізу сучасних методів і способів силового впливу на ґрунтовий масив та механічних і технологічних процесів які відбуваються у ґрунтовому масиві при горизонтальних виробках методом статичного проколу та методом продавлювання сформулювати загальні відомості про процеси в ґрунтовому масиві та вплив основних динамічних властивостей ґрунтів на вказані процеси. На основі відомих і існуючих даних для подальших досліджень ми сформулюємо основні теоретичні засади та відповідні припущення для дослідження механічних процесів для проведення горизонтальних виробок тим чи іншим більш ефективним способом ущільнення ґрунтового масиву. Також вивести нестационарні рівняння руху ґрунту із врахуванням коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труби, та сформулювати розрахункову схему для виведення розрахункових рівнянь рівноваги ґрунтового масиву.

Результати

Одним із найбільш розповсюджених способів механічного впливу на ґрунтовий масив є горизонтальне буріння, яке являє собою комплексний процес, який складається із декількох операцій. Цей процес включає розробку ґрунтового масиву різанням, транспортуванням розробленого ґрунту у робочий котлован та із нього на поверхню, перехід кріплення вздовж

проведення виробки і влаштування робочого і приймального котлованів. Усі ці операції технологічно взаємопов'язані і вимагають як роздільного так і сумісного розгляду.

Комплексні дослідження цих процесів висвітлено недостатньо, хоч окремі процеси розглянуто всесторонньо. Розробку масиву ґрунту різанням можна знайти у працях Л. Т. Дворнікова і В. С. Данченко (Дворников, & Данченко, 1980), Г. Є. Лаврова (Лавров, & Саттаров, 1973; Лавров, & Саттаров, 1978), а теорію розробки ґрунтів різанням землерийними машинами створено Ю. А. Ветровим (Ветров, 1971) і А. Н. Зелениним (Зеленин, 1968), процес взаємодії робочих органів дорожньо-будівельних машин в праці В. І. Баловнева (Баловнев, 1981).

Ці дослідження дають певне уявлення про залежність зусиль, діючих на робочі органи, від фізичних властивостей масиву, параметрів технологічного процесу і конструктивних особливостей робочих органів. Але використовувати результати цих досліджень для визначення зусиль, які впливають на роботу прохідних установок горизонтального буріння, не є можливим. Зокрема, Н. Є. Косенко і М. І. Гальперин дослідили процес різання скальних порід тонкими стружками (Лавров, & Саттаров, 1973), а Л. Т. Дворніков, В. С. Донченко і Б. І. Прокоф'єв виконали експериментальні дослідження, які встановлювали вплив швидкості на зусилля різання твердих і сипучих ґрунтів землерийними машинами.

У виконанні дослідження ставили мету – встановити оптимальні технологічні параметри роботи землерийних машин великої потужності, які зрізають стружки товщиною, що перевищує у декілька разів товщину ріжучої кромки робочого органу. Більш близькі до процесу, який аналізуємо, дослідження зусилля різання виконані Г. Є. Лавровим. Він встановив залежність зусилля, діючого на робочий орган УГБ. Характерною особливістю технологічного процесу виконання виробок цією установкою є збереження постійної товщини стружки незалежно від довжини виробки (проходки).

На базі основних припущень теорії М. М. Протодяконова дослідження тиску на кріплення виробок, виконаних способом горизонтального буріння, виконані зокрема, Д. І. Олександровим, М. В. Василевим в праці (Лавров, & Саттаров, 1973), В. М. Денисовим, Д. І. Коню-

шковим, Г. П. Кузнецовим, Є. С. Пригожиним, Д. Л. Павловим, Д. І. Шором та іншими. Зокрема Д. І. Олександров, М. В. Василів в праці (Лавров, & Саттаров, 1973), Х. А. Романович і Д. І. Шор досліджували зміну тиску за параметром крену кріплення круглого обрису близько до еліптичного з більшою вертикальною віссю. Розміри еліптичності залежали від фізичних властивостей ґрунтового масиву.

Частковий огляд досліджень і аналіз їх результатів дає змогу зробити висновок, що накопичено великий досвід у вивченні механічних процесів у ґрунтовому масиві при проникненні в нього твердого тіла з різними швидкостями, але реальний механічний процес, викликаний виконанням горизонтальних виробок способом проколу, ще недостатньо досліджений.

Розглянемо аналіз останніх досліджень механічних процесів ущільнення ґрунтового масиву. Питання проколу ґрунту детально досліджено у роботах (Супонев, Олексин, & Хачатурян, 2016; Супонев, & Олексин, 2010; Супонев, 2018a; Супонев, 2018b), а у таких працях, як (Васильєв & Лещенко, 1993; Супонев, 2018a; Кравець, Посмітюха, & Супонев, 2017a) запропоновано конструкції проколюючих наконечників, які в певних умовах забезпечують керування траєкторією руху. Однак слід зазначити, що більшість цих праць націлені на удосконалення сучасних машин для горизонтально спрямованого руху робочого обладнання в ґрунті.

Великі габарити машин, технологічні площі для розгортання робіт, високі ціни на навігаційну систему роблять їх використання ефективним тільки починаючи зі 100 м. У роботах (Супонев, 2018b; Балесный, 2017) наведено технічні рішення, які підтверджують можливість реалізації процесу корекції руху головки під час проколу ґрунту малогабаритною установкою за допомогою гідроциліндру з гвинтовою несамогальмованою парою та проколюючої головки з адаптованою формою наконечника.

Запропонована оригінальна конструкція гідроциліндру з несамогальмованою гвинтовою парою отримала ефективне використання при роботі гвинтових паль двобічної дії в конструкціях опорних контурів машин (Супонев, 2018). Це дає можливість різко знизити масу та енергонасиченість базової установки, а також відмовитися від окремого приводу для обертання ро-

бочого органу та спростити процес керування. Також гідроциліндр можна кріпити до рами установки та забезпечувати поступовий та поступово-обертальний рух робочого органу для включення механізму зміни форми його наконечника.

Дослідження безтраншейної прокладки труб методом проколу, стосовно будівельно-дорожніх машин для визначення їх техніко-економічних параметрів із дослідження процесів взаємодії робочих органів з середовищем, методи подібності та фізичного моделювання були розроблені проф. В. І. Баловнєвим (Баловнєв, 1981). Їх успішно використовують як для виявлення факторів, так і для визначення раціональних параметрів технічних об'єктів, що здійснюють найбільший вплив на експлуатаційні параметри землерийно-транспортних машин (Хачатурян, 2013). У праці (Супонев, Олексин, & Хачатурян, 2016) розглянуто експериментальні дослідження зміни зони структурно-пружних деформацій ґрунту навколо горизонтальної свердловини, яку створено методом статичного проколу. Показано зміну пористості ґрунту при радіальному відхиленні від осі свердловини при її розширенні з 108 до 159 мм.

Результати дослідження визначення величини зони деформування ґрунту конусно циліндричним наконечником і тиску на бічній поверхні подано у праці (Супонев, 2018a). Ґрунтові дослідження фізичного моделювання та багатофакторний експеримент проведено для визначення зусилля проколювання робочим органом активної дії в праці (Хачатурян, 2013), в результаті отримано критеріальне рівняння, що описує процес проколювання ґрунту робочим органом активної дії. В цій праці одержано рівняння регресії, а перевірку адекватності отриманого рівняння експериментальними даними виконано за допомогою критерію Фішера та оцінювання значущості коефіцієнта регресії – за критерієм Стюдента.

Отже, на основі наведеного вище аналізу науково-технічних джерел можна констатувати про необхідність та ефективність закритих способів прокладки підземних інженерних комунікацій незалежно чи методом проколу чи методом продавлювання чи щитовою проходкою. Нижче проаналізовано метод проколу діаметром до 600 мм. Та метод продавлювання до 2000 мм.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

а) метод проколу діаметром від 100 до 600 мм. Використання проколу ґрунту при безтраншейній прокладці труб, керування процесом корекції траєкторії руху робочого органу при статичному проколі ґрунту і технології керування проколом ґрунту та вибір силового приводу установки для її реалізації, досліджувалось багатьма вченими. Зокрема, в праці (Гусев, & Чубаров, 2014) розглянуто одну із основних проблем – керування проколом за допомогою світлового променя або локації на основі радіосигналу. Наведено також наближений математичний опис передаточної функції та запропоновано структурну схему системи керування проколом ґрунту. Керування процесом корекції траєкторії руху робочого органу при статичному проколі ґрунту під час горизонтального проколу ґрунту установками статичної дії, виникає необхідність керувати траєкторією руху робочого органу з конусним наконечником. Показано можливість керування траєкторією руху за допомогою робочого органу з адаптованим наконечником та визначено умови корекції траєкторії його руху. В праці (Супонев, 2018b) подано результати досліджень технології управління проколом ґрунту та вибором силового приводу установки для її реалізації. Технологія статичного проколу ґрунту пов'язана за допомогою установки з можливістю керування траєкторією руху робочого органу, що є важливою умовою ефективності прокладання інженерних комунікацій.

На основі аналізу науково-технічних джерел та досвіду виконання реальних робіт з прокладання підземних комунікацій методом проколу і аналізу технологічних (механічних) процесів ущільнення ґрунтового масиву методом проколу вивчено і обґрунтовано досить добре і їх доцільно застосовувати в таких межах:

- при діаметрі 50...500 мм і довжиною до 80 м у піщаних і глинистих ґрунтах без твердих включень;

- при застосуванні гідропроколу діаметром 100...200 мм і довжиною до 40 м у піщаних ґрунтах і 400...500 мм і довжиною до 20 м у супісках;

- при вібропроколюванні труби діаметром до 500 мм і довжиною до 60 м у незв'язних, піщаних, супісчастих ґрунтах;

- виконання вібропробойками проколу труби діаметром 90...108 мм і довжиною до 60 м,

менші ґрунти до III категорії при проколу з використанням пневмопробійників труби діаметром 300...400 мм, довжина 40...50 м в ґрунтах I-II категорії.

Спостереженнями встановлено, що стійка тенденція росту збільшення об'ємів міського і промислового будівництва, реконструкції міст і промислових підприємств та їх розвиток визначає потребу у спорудженні інженерних комунікацій різного призначення: водопроводів та водовідводів, теплових мереж, прокладання інженерних комунікацій під автомобільними та залізничними дорогами, річками і каналами де використання інших методів недоцільно. Безтраншейні методи мають свою область застосування, яка обмежується розмірами інженерних конструкцій, зокрема для методу проколу використовують труби діаметром до 600 мм, а для методу продавливання – від 600 до 2000 мм.

б) метод продавливання діаметром від 600 до 2000 мм. Незважаючи на багаточисельність комплексів для спорудження трубопроводів методом продавливання з механізованою розробкою ґрунту представлених на ринку (Кантович, Ружицкий, Григорьев, С. М., & Григорьев, А. С., 2008), найчастіше використовують метод розробки ґрунту вручну та просту конструкцію установки для продавливання через її низьку вартість. Тому, зважаючи на зазначене, найбільш перспективним у практиці міського і промислового підземного будівництва є метод статичного і динамічного продавливання, особливо при спорудженні колекторних тунелів діаметром 1220...1620 мм. Зупинимось на технології виконання горизонтальних виробок способом продавливання та аналізу науково-технічних джерел, які висвітлюють теоретичні і експериментальні дослідження безтраншейної прокладки інженерних комунікацій методом продавливання (Кантович, Ружицкий, Григорьев, С. М., & Григорьев, А. С., 2008; Гилета, Тищенко & Ванаг, 2017; Гилета, Ванаг & Тищенко, 2016; Олексин, 2012; Панин, Сарычев, Прохоров, & Савин, 2013).

Технологія виконання горизонтальних виробок способом продавливання, на відміну від способу проколу, передбачає виїмання розробленого ґрунту у забої і його транспортування із виробки. Але так само як і у способі проколу, кріплення яке утримує контур виробки від обвалення, рухається в міру проведення виробки.

Ці особливості технології виконання виробок способом продавлювання обумовлюють діаметр виробки, достатній для розміщення, в ній людей з інструментами та механізмами, а також більш потужними силовими агрегатами для переміщення кріплення.

Способом продавлювання у нашій країні і за кордоном виконано багаточисельні переходи під дорогами і навіть деякі ділянки метрополітенів. Споруджено різної протяжності, розміру і форми каналізаційні колектори. У способі продавлювання удосконалюється як технологія пересування кріплення, так і розробка та прибирання ґрунту із виробки. Інтенсивне використання за кордоном, одержав спосіб продавлювання із закріпленням горизонтальних виробок залізобетонними і пластмасобетонними кільцями.

Із результатів теоретичних і експериментальних досліджень технології та механічних процесів у масиві ґрунту, викликаних продавлюванням, випливає, що цей спосіб зацікавив багатьох вчених як у нашій країні, так і за кордоном і знайшов широке застосування у різних видах підземного будівництва (Червов, 2003; Кондратенко, 2013; Тищенко, 2013; Лучко, 2013; Лучко, Ковальчук & Кравець, 2020).

Зокрема, у праці (Лучко, Ковальчук & Кравець, 2020) наведено комплекс результатів досліджень різних типів ґрунтів та розв'язано низка задач впливу різного типу навантаження на ґрунтовий масив на засадах механіки ґрунтів. Тут також описано теорію гранично напруженого стану ґрунтів і її застосування. Наведено розв'язок задачі про напружений стан ґрунтового масиву при проведенні горизонтальної виробки способом ущільнення, ґрунтового масиву.

Формування горизонтальних свердловин, які використовуються у безтраншейному прокладанні інженерних комунікацій, використовують комбінований метод (Олексин, 2012; Панин, Сарычев, Прохоров, & Савин, 2013), який використовує кращі особливості обох методів: статичного проколу та продавлювання.

У першому випадку мінімізується об'єм ґрунту шляхом його радіального ущільнення конусним наконечником, тим самим відпадає потреба у вилученні його із забою. Крім того, завдяки радіальному ущільненню ґрунту утворюються стійкі щільні стінки, що в подальшому полегшує прокладання (протягування) комунікацій. Але при цьому утворюється велика

зона деформованого ґрунту, яка може пошкодити прилеглі комунікації та споруди.

У другому – навколо продавлюючої труби не формується зона структурно-пружної деформації це пов'язано з тим, що майже увесь розроблений ґрунт за профілем свердловини потрапляє у порожнину труби, а не витісняється в сторони. Основною перевагою цього методу є відсутність руйнівного впливу на існуючі комунікації та споруди. Але даний метод має суттєвий недолік у тому, що кожні 2...3 метри виробку потрібно зупиняти і видаляти ґрунтовий керн, що не завжди можливо в обмежених міських умовах. Це вимагає застосування додаткових пристроїв типу та принцип роботи яких наведено у працях (Червов, 2003; Кондратенко, 2013; Тищенко, 2013).

в) аналіз механізмів проколу та продавлювання. Механічні способи ущільнення ґрунтового масиву знаходять найбільше застосування у будівництві завдячуючи незначному їх впливу на стійкість будівель і споруд які знаходяться поблизу, простоті технології і більшій ступені безпеки у порівнянні з іншими видами ущільнення. Спосіб механічного ущільнення отримав велике (широке) розповсюдження і у спеціальному виді робіт – проведення горизонтальних виробок, які використовують для прокладки у них підземних інженерних комунікацій. Цей спосіб виконується механічним пристосуванням, різними за конструктивною складністю та робочими органами, типи, вибір, область їх застосування, експериментальне дослідження яких детально описано у наукових працях (Червов, 2003; Бреннер, Головин, Пушкарев, Рогачев, & Сарычев, 2006; Кондратенко, 2013; Тищенко, 2013; Кравець, Кованько, & Лук'янчук, 2015; Кравець, Посмітюха & Супонев, 2017a; Кравець, Посмітюха & Супонев, 2017b; Супонев, 2018).

Простіші механічні способи засновані на використанні будівельних машин і механізмів у якості силових агрегатів, які вдавлюють металеві труби в ґрунтовий масив. Більш складні прохідницькі пристрої працюють на енергії стиснутого повітря, височастотної вібрації або з використанням напірної гідравлічної системи (Кантович, Ружицкий, Григорьев, С. М., & Григорьев, А. С., 2008).

Будь-які способи проведення виробки ущільненням засновані на стисканні ґрунтового

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

масиву як головної його властивості, яка зв'язана з іншими фізико-механічними властивостями ґрунтів і технологічними параметрами процесу проведення виробок способом ущільнення.

Найбільш простий і достовірний спосіб встановлення взаємозв'язку між окремими властивостями і їх сукупністю – це експериментальний, який отримав велике розповсюдження у будівництві при вивченні властивостей ґрунтів. Але деякі властивості ґрунтів аналітично виражені одні через інші, що також полегшує аналіз механічних процесів у масиві при проведенні виробок.

Для розрахунку деформацій, оцінки міцності та стійкості ґрунтових масивів, які відбуваються при механічних процесах під час виконання горизонтальних виробок методом проколу, продавлювання (протискування), горизонтальним бурінням чи щитовою проходкою, необхідно знати характеристики механічних властивостей ґрунтів. Під механічними властивостями ґрунту потрібно розуміти ті властивості, що визначають його поведінку як механічної системи, тобто зумовлюють механічні переміщення ґрунтового масиву й окремих його частин у просторі та часі під дією тих чи інших зовнішніх чинників. До показників цих властивостей належать ті, які безпосередньо визначають величину деформації та міцності ґрунтів. Окремо їх будемо називати характеристиками деформативності (стисливості) й міцності. Зокрема, стисливість – найхарактерніша властивість, що відрізняє ґрунти від твердих тіл. Вона зумовлена трьома чинниками – ущільненням, пружністю та зміною фізичного стану.

Під міцністю ґрунтів, розуміють їх властивість у певних умовах сприймати вплив зовнішніх зусиль без повного руйнування, яка визначається межею їх міцності. Зокрема, механічні властивості ґрунтів залежать від їх мінерального та гранулометричного складу, щільності, вологості, температури, умов формування та інше. Нижче зупинимось тільки на тих властивостях, які необхідно знати при розробці підземних свердловин для прокладки інженерних комунікацій, водопропускних труб тощо.

Ґрунт складається із окремих частинок твердого тіла, що утворюють скелет ґрунту і порожнечі різного розміру (Лучко, Ковальчук, &

Кравець, 2020). Порожнечі скелета ґрунту заповнені водою або повітрям, або і тим, і тим. У зв'язку з цим, при вивченні ґрунту, перш за все визначаємо, яку частину об'єму займають тверді частинки, а яку порожнечі. Введемо поняття порожнистості ґрунту, як відношення об'єму порожнечі до повного об'єму. Для визначення порожнистості або іншого параметру ґрунту, потрібно знати інші властивості цього ґрунту (Лучко, 2013; Лучко, Ковальчук & Кравець, 2020).

Наукова новизна та практична значимість

В даній статті, на основі аналізу науково-технічних джерел силового впливу на суцільний ґрунтовий масив, вдалось узагальнити результати досліджень впливу механічних і технологічних процесів на ґрунтовий масив. Зокрема, дослідити механічні процеси ущільнення ґрунтового масиву при виконанні виробки методом статичного проколу і методом продавлювання та встановити їх ефективність при прокладці підземних інженерних комунікацій закритим способом. Також, вперше досліджено вплив основних динамічних властивостей ґрунтів на процеси, які проходять у ґрунтовому масиві при дії силового навантаження використовуючи той чи інший метод підземної виробки.

Висновки

1. Виконано аналіз досліджень впливу технологічних процесів на суцільний масив. Зокрема, описано механічні та технологічні процеси ущільнення ґрунтового масиву методом статичного проколу та методом продавлювання та сформульовано і наведено основні динамічні властивості ґрунтів.

2. Сформульовано основні теоретичні засади для дослідження механічних процесів при виконанні горизонтальної виробки способом ущільнення ґрунтового масиву.

3. Надалі в процесі досліджень потрібно уточнити основні теоретичні засади механічних (технологічних) процесів при проведенні горизонтальних виробок способом ущільнення ґрунтового масиву. Сформулювати основні припущення та побудувати загальну схему дослідження напружено-деформованого стану в стискаючому суцільному ізотропному масиві під дією рівномірно розподіленого навантаження по контуру виробки. Розв'язати задачу нестационарного рівняння руху ґрунту із врахуванням

коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труби. Скласти умови граничної рівноваги Треска-Сен-Венана і умови співпадіння максимальних швидкостей зсуву з напрямком ліній ковзання. Змодельовати динаміку руху ґрунту у циліндричній трубі в умовах плоскої осесиметричної деформації та отримати основні критерії, які повинні виконуватись при певних умовах і властивостях ґрунтів. Дослідити експериментально і визначити коефіцієнт тертя. Дослідити рівняння нестационарного руху суцільного стиснутого середовища з врахуванням сил тертя і сил тяжіння в циліндричних координатах. Визначення зони плинності ґрунту при прокладці труб різного діаметру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Балесный, С. П. (2017). Особенности процессов статического прокола ґрунта. *Вестник Харьковско-го национального автомобильно-дорожного университета*, 76, 138-141.
- Баловнев, В. И. (1981). *Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин*. Москва: Высшая школа.
- Бреннер, В. А., Головин, К. А., Пушкарев, А. Е., Рогачев, А. А., & Сарычев, В. И. (2006). Экспериментальные исследования взаимодействия исполнительного органа прокалывающей установки с ґрунтовым массивом. *Известия ТулГУ. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности*, (8), 158-160.
- Васильев, Н. В. (1964). *Закрытая прокладка трубопроводов*. Москва: Недра.
- Васильев, С. Г. & Лещенко, А. В. (1993). *Технологические процессы проведения горизонтальных выработок*. Львов: Свит.
- Ветров, Ю. А. (1971). *Резание ґрунтов землеройными машинами*. Москва: Машиностроение.
- Гилета, В. П., Ванаг, Ю. В., & Тищенко, И. В. (2016). Повышение эффективности проходки скважин методом виброударного продавливания. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 6, 82-88.
- Гилета, В. П., Тищенко, И. В., & Ванаг, Ю. В. (2017). Повышение эффективности циклической проходки скважин в ґрунте. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*, 3 (55), 21-31.
- Гусев, И. В., & Чубаров, Ф. Л. (2014). Применение управляемого прокола ґрунта при бестраншейной прокладке труб. *Потенциал современной науки*, 2, 30-34.
- Данилов, Б. Б. (2012). Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного ґрунта при горизонтальном бурении скважин. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 3, 82-90.
- Дворников, Л. Т. & Данченко, В. С. (1980). Основные закономерности разрушения горных пород при вращательном бурении скважин малого диаметра машинами ограниченной мощности. *Механика разрушения горных пород: Мат. 6-й Всесоюз. конф, механики горных пород, Фрунзе*, 26-31.
- Зеленин, А. Н. (1968). *Основы разрушения ґрунтов механическими способами*. Москва: Машиностроение.
- Кантович, Л. И., Ружицкий, В. П., Григорьев, С. М., & Григорьев, А. С. (2008). Результаты исследования продавливающих установок для бестраншейной технологии строительства подземных инженерных коммуникаций. *Горное оборудование и электромеханика*, 2, 2-7.
- Кондратенко, А. С. (2013). Удаление ґрунтового керна из трубы с помощью комбинированного воздействия на систему «труба с керном в ґрунте». *Механизация строительства*, (4), 3-5.
- Кравець, С. В., Кованько, В. В., & Лук'янчук, О. П. (2015). *Наукові основи створення землерійно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв*. Рівне: НУВГП.
- Кравець, С. В., Каслин, Н. Д., Руднев, В. К., & Супонев, В. Н. (2008). *Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций*. Харьков: ООО «Фавор».
- Кравець, С. В., Посмітюха, О. П., & Супонев, В. М. (2017а). Визначення еквівалентного та оптимального діаметрів конічно-циліндричного наконечника з виступами для проколювання ґрунту. *Наука та прогрес транспорту*, 4, 89-97.
- Кравець, С. В., Посмітюха, О. П., & Супонев, В. Н. (2017б). Аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного наконечника в ґрунт. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование*, (97), 91-98.
- Лавров, Г. Е. & Саттаров, Т. Х. (1973). Исследование конструктивных и рабочих параметров шнековых установок горизонтального бурения. *Механизация строительства магистральных трубопроводов*, 27.
- Лавров, Г. Е. & Саттаров, Т. Х. (1978). *Механизация строительства, переходов магистральных трубопроводов под автомобильными и железными дорогами*. Москва: ВНИИСТ Главгаза СССР.
- Лучко, Й. Й. (2013). *Ґрунтознавство, механіка ґрунтів та основи і фундаменти*. Львів: Каменяр.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Лучко, Й. Й., Ковальчук, В. В. & Кравець, І. Б. (2020). *Мости і труби з гофрованих металевих конструкцій та моніторинг ґрунтових основ доріг і споруд*. Львів: Світ.
- Олексин, В. И. (2012). Комбинированный метод разработки горизонтальной скважины при бестраншейной прокладке коммуникаций. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 57, 207-213.
- Панин, А. Н., Сарычев, В. И., Прохоров, Н. И., & Савин, И. И. (2013). Обоснование параметров совмещенной схемы прокладки труб бестраншейной технологии. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 12(2), 298-306.
- Рыбаков, А. П. (2006). *Основы бестраншейных технологий (теория и практика)*. Москва: Стройиздат.
- Супонев, В. М. (2018a). Визначення величини зони деформування ґрунту конусоциліндричним наконечником і тиску на бічній поверхні. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 83, 22-28.
- Супонев, В. М. (2018b). Технологія управління проколом ґрунту та вибір силового приводу установки для її реалізації. *Наукові вісті Дніпровського університету*, 15.
- Супонев, В. Н. & Олексин, В. И. (2010). Обоснование параметров установок для бестраншейной прокладки распределительных сетей инженерных коммуникаций методом гидростатического прокола. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, 5 (75), 66-74.
- Супонев, В. Н., Олексин, В. И., & Хачатурян, С. Л. (2016). Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины при ее разработке методом статического прокола. *Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 73, 202-205.
- Тищенко, И. В. (2013). Виброударное продавливание и комбинированный способ очистки труб от грунтового керна. *Строительные и дорожные машины*, 11, 39-42.
- Хачатурян, С. Л. (2013). Фізичне моделювання та багатофакторний експеримент для визначення зусилля проколювання робочим органом активної дії. *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*, 1(1), 237-242.
- Червов, В. В. (2003). Новый способ очистки труб от грунтового керна при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций. *Механизация строительства*, 1.

И. И. ЛУЧКО^{1*}, Т. И. БУБНЯК², И. Б. КРАВЕЦЬ³

^{1*} Кафедра строительных конструкций, Львовский национальный аграрный университет, ул. В. Великого, 1, г. Дубляны, Украина, 80381, тел. +38 (097) 033 18 36, эл. почта lychko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-3675-0503

² Кафедра высшей математики, Львовский национальный аграрный университет, ул. В. Великого, 1, г. Дубляны, Украина, 80381, тел. +38 (067) 990 06 67, эл. почта tbubnyak@gmail.com, ORCID 0000-0002-2814-8571

³ Кафедра мостов и тоннелей, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 479 00 50, эл. почта kravetsivan2017@gmail.com, ORCID 0000-0002-2239-849X

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ (ОБЗОР)

Цель. Целью работы является обзор и анализ существующих научно-технических источников, посвященных методам и способам горизонтальных выработок, и технологическим процессам, которые проходят в грунтовом массиве при прокладке инженерных коммуникаций на основе опыта ведущих организаций. Исследовать эффективность применения того или иного способа бестраншейной прокладки труб и инженерных коммуникаций в современных условиях строительства. **Методика.** На основе анализа современных методов и способов силового воздействия на грунтовый массив и механических и технологических процессов, которые происходят в грунтовом массиве при горизонтальных выработках методом статического прокола и методом продавливания. Сформулировать общие сведения о процессах в грунтовом массиве и влияние основных динамических свойств почв на указанные процессы. На основе известных и существующих данных для дальнейших исследований мы сформулируем основные теоретические основы и соответствующие предположения для исследования механических процессов при проведении горизонтальных выработок тем или иным более эффективным способом уплотнения грунтового массива. Вывести нестационарные уравнения движения грунта с учетом коэффициента трения к наружной поверхности трубы, и сформулировать расчетную схему для вывода расчетных уравнений равновесия грунтового массива. **Результаты.** Вы-

полнен анализ отечественных и зарубежных научно-технических источников по бестраншейным способам прокладки инженерных коммуникаций. В частности, во введении описаны общие сведения и актуальность и постановка проблемы исследования механических процессов в грунтовом массиве при горизонтальных выработках. Сформулированы цель и методику исследований. Рассмотрены основные данные литературных источников, которые позволили проанализировать основные методы и способы прокладки инженерных коммуникаций и оценить эффективность применения того или иного способа в конкретной ситуации и условиях. Основательно проанализированы возможности эффективного применения метода статического прокола метода продавливания в зависимости от диаметра выработки. Сформулированы основные задачи, которые необходимо решить в будущем и установить критерии их использования для исследования механических процессов при проведении горизонтальных выработок способом уплотнения грунтового массива. **Научная новизна.** В данной статье на основе анализа научно-технических источников силового воздействия на сплошной грунтовый массив, удалось обобщить результаты исследований влияния механических и технологических процессов на грунтовый массив. В частности, исследовать механические процессы уплотнения грунтового массива при выполнении выработки методом статического прокола и методом продавливания и установить их эффективность при прокладке подземных инженерных коммуникаций закрытым способом. Также, впервые исследовано влияние основных динамических свойств почв на процессы, проходящие в грунтовом массиве, при действии силовой нагрузки используя тот или иной метод подземной выработки. **Практическая значимость.** На основании анализа научно-технических источников силового воздействия на грунтовый массив получены данные о возможности эффективно применять закрытые (бестраншейные) способы прокладки водопропускных труб, канализации, тепловых трасс, подземных переходов под железнодорожными и автомобильными дорогами и других инженерных коммуникаций, это особенно актуально для мегаполисов, но не всесторонне изучен это направление и некоторые аспекты нужно исследовать и уточнять для дальнейшего практического применения.

Ключевые слова: продавливание; прокол грунта; грунтовый массив; проходка; выработка

J. J. LUCHKO^{1*}, T. I. BUBNYAK², I. B. KRAVETS³

^{1*} Department of Building Constructions, Lviv National Agrarian University, V. Velykoho Street, 1, Dubliany, Ukraine, 80381, ORCID 0000-0002-3675-0503

² Department of Higher Mathematics, Lviv National Agrarian University, V. Velykoho Street, 1, Dubliany, Ukraine, 80381, ORCID 0000-0002-2814-8571

³ Department of Bridges and tunnels, Dnipro national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan Street, 2, Dnipro, Ukraine, 49010, ORCID 0000-0002-2239-849X

MECHANICAL PROCESSES IN THE SOIL MASS FOR HORIZONTAL DEVELOPMENTS (REVIEW)

Purpose. The aim of the work is to review and analyze the existing scientific and technical sources, which are devoted to the methods and techniques of horizontal workings and technological processes that take place in the soil during the laying of utilities based on the experience of leading organizations. Investigate the effectiveness of a particular method of trenchless pipe laying and engineering communications in modern construction conditions. **Methodology.** Based on the analysis of modern methods and technics of force influence on the soil mass and mechanical and technological processes occurring in the soil mass at horizontal workings by static puncture and pushing method. Formulate general information about the processes in the soil mass and the influence of the main dynamic properties of soils on these processes. On the basis of known and existing data for further research, we will formulate the basic theoretical principles and appropriate assumptions for the study of mechanical processes in the conduct of horizontal workings in one or another more effective way of compacting the soil mass. Also, derive non-stationary equations of soil motion taking into account the coefficient of friction to the outer surface of the pipe, and formulate a design scheme for the output of the calculated equations of equilibrium of the soil mass. **Findings.** The analysis of domestic and foreign scientific and technical sources on trenchless methods of laying utilities is performed. In particular, the introduction describes the general information and the relevance and formulation of the problem of studying mechanical processes in the soil mass at horizontal workings. The purpose and methods of research are formulated. The basic data of literature sources are considered, which made it possible to analyze the main methods and technics of laying engineering communications and the ability to assess the effectiveness of a particular method in a specific situation and conditions. The possibilities of effective application of the static puncture method of the

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

punching method depending on the working diameter are thoroughly analyzed. The main tasks that need to be solved in the future and set the criteria for their use for the study of mechanical processes during horizontal workings by compacting the soil mass are formulated. **Scientific originality.** In this article, based on the analysis of scientific and technical sources of force influence on a solid soil, we managed to generalize the results of studies of the impact of mechanical and technological processes on the soil. In particular, to investigate the mechanical processes of soil compaction during excavation by static puncture and punching and to establish their effectiveness in the laying of underground utilities in a closed way. Also, for the first time the influence of the main dynamic properties of soils on the processes that take place in the soil mass, under the action of power load using a particular method of underground mining was investigated. **Practical value.** Based on the analysis of scientific and technical sources of force impact on the soil, data obtained about the possibility of effectively using closed (trenchless) methods of laying underground pipes, sewers, heating mains, underpasses under the railways and highways and other utilities, this is especially true for cities, but this area has not been thoroughly studied and some aspects need to be investigated and clarified for further practical application.

Keywords: pushing; soil puncture; soil mass; drilling; excavation

REFERENCES

- Balesnyj, S. P. (2017). Osobennosti processov staticheskogo prokola grunta. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 76, 138-141. (in Russian)
- Balovnev, V. I. (1981). *Modelirovanie processov vzaimodejstviya so sredoj rabochih organov dorozhno-stroitel'nyh mashin*. Moskva: Vysshaja shkola. (in Russian)
- Brenner, V. A., Golovin, K. A., Pushkarev, A. E., Rogachev, A. A., & Sarychev, V. I. (2006). Jeksperimental'nye issledovaniya vzaimodejstviya ispolnitel'nogo organa prokalyvajushhej ustanovki s gruntovym massivom. *Izvestija TulGU. Ser. Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*, (8), 158-160. (in Russian)
- Vasil'ev, N. V. (1964). *Zakrytaja prokladka truboprovodov*. Moskva: Nedra. (in Russian)
- Vasil'ev, S. G. & Leshhenko, A. V. (1993). *Tehnologicheskie processy provedeniya gorizontol'nyh vyrabotok*. L'vov: Svit. (in Russian)
- Vetrov, Ju. A. (1971). *Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami*. Moskva: Mashinostroenie. (in Russian)
- Gileta, V. P., Vanag, Ju. V., & Tishhenko, I. V. (2016). Povyshenie jeffektivnosti prohodki skvazhin metodom vibrodarnogo prodavlivaniya. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 6, 82-88. (in Russian)
- Gileta, V. P., Tishhenko, I. V., & Vanag, Ju. V. (2017). Povyshenie jeffektivnosti ciklicheskoj prohodki skvazhin v grunte. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*, 3 (55), 21-31. (in Russian)
- Gusev, I. V., & Chubarov, F. L. (2014). Primenenie upravljajemogo prokola grunta pri bestranshejnoj prokladke trub. *Potencial sovremennoj nauki*, 2, 30-34. (in Russian)
- Danilov, B. B. (2012). Jeksperimental'noe obosnovanie processa transportirovaniya razrushennogo grunta pri gorizontol'nom burenii skvazhin. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*, 3, 82-90. (in Russian)
- Dvornikov, L. T. & Danchenko, V. S. (1980). Osnovnye zakonomernosti razrusheniya gornyh porod pri vrashatel'nom burenii skvazhin malogo diametra mashinami ogranichennoj moshhnosti. *Mehanika razrusheniya gornyh porod: Mat. 6-j Vsesojuz. konf. mehaniki gornyh porod, Frunze*, 26-31. (in Russian)
- Zelenin, A. N. (1968). *Osnovy razrusheniya gruntov mehanicheskimi sposobami*. Moskva: Mashinostroenie. (in Russian)
- Kantovich, L. I., Ruzhickij, V. P., Grigor'ev, S. M., & Grigor'ev, A. S. (2008). Rezul'taty issledovaniya prodavlivajushhih ustanovok dlja bestranshejnoj tehnologii stroitel'stva podzemnyh inženernyh kommunikacij. *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika*, 2, 2-7. (in Russian)
- Kondratenko, A. S. (2013). Udalenie gruntovogo kerna iz truby s pomoshh'ju kombinirovannogo vozdejstviya na sistemu «truba s kernom v grunte». *Mehanizacija stroitel'stva*, (4), 3-5. (in Russian)
- Kravec, S. V., Kovanjko, V. V., & Luk'janchuk, O. P. (2015). *Naukovi osnovy stvorennja zemlerijno-jarusnykh mashyn i pidzemnorukhomykh prystrojiv*. Rivne: NUVGhP. (in Ukrainian)
- Kravec, S. V., Kaslin, N. D., Rudnev, V. K., & Suponev, V. N. (2008). *Mashiny dlja bestranshejnoj prokladki podzemnyh kommunikacij*. Har'kov: OOO «Favor». (in Russian)
- Kravec, S. V., Posmitjukha, O. P., & Suponjev, V. M. (2017a). Vyznachennja ekvivalentnogho ta optymal'nogho diametriv konichno-cylindrychnogho nakonechnyka z vystupamy dlja prokoljuvannja gruntu. *Nauka ta prohres transportu*, 4, 89-97. (in Ukrainian)
- Kravec, S. V., Posmitjukha, O. P., & Suponjev, V. N. (2017b). Analitychnyj sposib vyznachennja oporu zanurennja konusnogho nakonechnyka v grunt. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Serija: Podjomno-*

- transportnye, stroitel'nye i dorozhnye mashiny i oborudovanie, (97), 91-98. (in Ukrainian)
- Lavrov, G. E. & Sattarov, T. X. (1973). Issledovanie konstruktivnyh i rabochih parametrov shnekovyh ustanovok gorizontalnogo burenija. *Mehanizacija stroitel'stva magistral'nyh truboprovodov*, 27. (in Russian)
- Lavrov, G. E. & Sattarov, T. X. (1978). *Mehanizacija stroitel'stva, perehodov magistral'nyh truboprovodov pod avtomobil'nymi i zheleznymi dorogami*. Moskva: VNIIST Glavgaza SSSR. (in Russian)
- Luchko, J. J. (2013). *Gruntoznavstvo, mekhanika gruntiv ta osnovy i fundamenti*. Ljviv: Kamenjar. (in Ukrainian)
- Luchko, J. J., Kovaljchuk, V. V. & Kravecj, I. B. (2020). *Mosty i truby z ghofrovanykh metalevykh konstrukcij ta monitoryng gruntovykh osnov dorigh i sporud*. Ljviv: Svit. (in Ukrainian)
- Oleksin, V. I. (2012). Kombinirovannyj metod razrabotki gorizontal'noj skvazhiny pri bestranshejnoj prokladke kommunikacij. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 57, 207-213. (in Russian)
- Panin, A. N., Sarychev, V. I., Prohorov, N. I., & Savin, I. I. (2013). Obosnovanie parametrov sovmeshhennoj shemy prokladki trub bestranshejnoj tehnologii. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, 12(2), 298-306. (in Russian)
- Rybakov, A. P. (2006). *Osnovy bestranshejnyh tehnologij (teorija i praktika)*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Suponjev, V. M. (2018a). Vyznachennja velychyny zony deformuvannja gruntu konusnocylyndrychnym nakonechnykom i tysku na bichnij poverkhni. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 83, 22-28. (in Ukrainian)
- Suponjev, V. M. (2018b). Tekhnologhija upravlinnja prokolom gruntu ta vybir sylovogho pryvodu ustanovky dlja jiji realizaciji. *Naukovi visti Dalivsjkogho universytetu*, 15. (in Ukrainian)
- Suponev, V. N. & Oleksin, V. I. (2010). Obosnovanie parametrov ustanovok dlja bestranshejnoj prokladki raspredelitel'nyh setej inzhenernyh kommunikacij metodom gidrostaticheskogo prokola. *Jenergosberezenie. Jenergetika. Jenergoaudit*, 5 (75), 66-74. (in Russian)
- Suponev, V. N., Oleksin, V. I., & Hachaturjan, S. L. (2016). Issledovanie processa izmenenija sostojanija grunta vokrug gorizontal'noj skvazhiny pri ee razrabotke metodom staticheskogo prokola. *Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 73, 202-205. (in Russian)
- Tishhenko, I. V. (2013). Vibroudarnoe prodavlivanie i kombinirovannyj sposob ochistki trub ot gruntovogo kerna. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 11, 39-42. (in Russian)
- Khachaturjan, S. L. (2013). Fizychnye modeljuvannja ta baghatofaktornyj eksperyment dlja vyznachennja zusyllja prokoljuvannja robochym orghanom aktyvnoji diji. *Zbirnyk naukovykh pracj [Poltavsjkogho nacional'nogho tekhnichnogho universytetu im. Ju. Kondratjuka]. Serija: Ghaluzeve mashynobuduvannja, budivnyctvo*, 1(1), 237-242. (in Ukrainian)
- Chervov, V. V. (2003). Novyj sposob ochistki trub ot gruntovogo kerna pri bestranshejnoj prokladke podzemnyh kommunikacij. *Mehanizacija stroitel'stva*, 1. (in Russian)

Надійшла до редколегії 24.04.2020.

Прийнята до друку 21.05.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 658.5:69-049.6:[519.863]

І. Д. ПАВЛОВ¹, М. О. ПОЛТАВЕЦЬ^{2*}, Ф. І. ПАВЛОВ³

¹ Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, 69600, ORCID 0000-0002-0412-6351

^{2*} Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, 69600, тел. +38(050) 710 00 58, ел. пошта poltavmar@ukr.net, ORCID 0000-0003-0504-5278

³ Кафедра планування і організації виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, ORCID 0000-0002-4442-9277

СИСТЕМНЕ УПРАВЛІННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЮ НАДІЙНІСТЮ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ В БУДІВНИЦТВІ

Мета. Розробка моделі перспективного управління виробничими системами будівельної галузі на основі загальних законів і принципів системології на шляху досягнення системою кінцевого визначеного результату – організаційно-технологічної надійності будівництва. **Методика.** Використання методів системного аналізу та системотехнічного обґрунтування, використання методів теорії систем, використання методів теорії моделювання з метою перспективного управління виробничими системами будівельної галузі на основі загальних законів і принципів системології на шляху досягнення системою кінцевого визначеного результату – організаційно-технологічної надійності будівництва. **Результати.** Обґрунтовано вплив параметрів календарного графіку на надійність зведення житлових будівель, у взаємозв'язку із управлінням та реалізацією проекту; виконані статистичні випробування дозволяють врахувати імовірнісний характер будівництва і вплив випадкових факторів на процес зведення будинків; виявлені та обґрунтовані чинники низького рівня організаційно-технологічної надійності проектування і вірогідності зниження планового прибутку, які криються в фінансових, часових, просторових і організаційних втратах. **Наукова новизна.** Запропонована оптимізаційна модель вдосконалення загальної методики з ефективною реалізацією організаційно-технологічних можливостей виробничих систем по забезпеченню організаційно-технологічної надійності будівництва. **Практична значимість.** Використання оптимізаційних заходів з підвищення організаційно-технологічної надійності запропоновано реалізовувати за розробленою структурно-логічною схемою, яка визначає пріоритетні напрямки перспективної стратегії управлінської діяльності у контексті системологічного розуміння. **Висновки.** Виконано системотехнічне прогнозування термінів зведення житлових об'єктів на основі імовірнісно-статистичного підходу. Перспективність управлінської стратегії вдосконалена аналітичним дослідженням впливу напруженості робіт календарного графіку на надійність виконання будівельного проекту та розробленими рекомендаціями з оптимізації організаційно-технологічного проектування і зменшення ступеня ризику підрядної організації у процесі функціонування виробничих систем будівництва.

Ключові слова: будівництво; системологія; виробнича система; інформаційні модулі; функції управління; стан системи; надійність системи; організаційно-технологічна надійність; безвідмовність; моделювання

Вступ

Резерви вирішення більшості організаційно-технологічних задач будівельного виробництва знаходяться в комплексі взаємозв'язків його функціональних підсистем. Порушення системної методології з організації виробництва призвело до роз'єднаності підходів в інформаційних і функціональних аспектах, відсутності єдності моделюючого простору і крізної інформаційної підтримки при прийнятті організаційно-технологічних рішень.

У цих умовах предметні області основних управлінських функцій утворюють підсистеми

за базовими видами діяльності, які вимагають якісного управління менеджерами різних рівнів з урахуванням термінів, вартості, витрат, прибутків, закупівель, постачання і розподілу ресурсів, змін і ризиків, інформації і комунікації, запасів і раціоналізації. Управління виробничою системою є організаційно-технологічною проблемою, рішення якої знаходиться на стику і в нічийних зонах комплексу взаємопов'язаних функціональних підсистем виробництва.

Сучасна наукова спільнота з будівництва об'єднується на шляху підвищення ефективно-

сті виробничих систем та необхідності обґрунтування раціонального рівня організаційно-технологічної надійності проектування ще на стадії техніко-економічних обґрунтувань (Оре, 1980; Гусаков, (Ред.), 1999; Пшінько, Радкевич, & М'якенька, 2012; Млодецкий, Тян, Попова, & Мартыш, 2013; Млодецкий, & Цецаревич, 2015; Мартиш, О. О., Мартиш, О. П., Павлов, Ринкевич, & Михайлова, 2017).

У наукових працях зазначено, що організаційно-технологічні, соціально-економічні виробничі системи, де істотну роль грає кінцева мета функціонування системи – це цілеспрямована сукупність елементів або комплекс вибірково залучених елементів, які взаємно сприяють досягненню заданого корисного результату, який приймається основним системоутворюючим чинником (Гусаков, 1983; Судаков, & Гусаков, (Ред.), 2004; Данкевич, 2019).

Мета

Розробка моделі перспективного управління виробничими системами будівельної галузі на основі загальних законів і принципів системології на шляху досягнення системою кінцевого визначеного результату – організаційно-технологічної надійності будівництва.

Методика

Для ефективного управління виробничою будівельною системою необхідно підвищувати організаційно-технологічну надійність зведення об'єктів ще на стадії техніко-економічних обґрунтувань. Підвищення якості, ефективності та надійності будівельних проектів вимагає вдосконалення як наукового, нормативно-методичного забезпечення проектування, так і оснащення проектувальників сучасним комплексом технічних засобів, комп'ютеризації більшості процесів проектування, створення ефективних інформаційних систем, розвинених баз даних та інтелектуальних систем.

Для врахування впливу взаємозв'язків, взаємодії необхідно розробити модель, адекватну умовам задачі з управління виробничою системою, розкрити і врахувати інформаційні, функціональні і інші необхідні міжсистемні зв'язки, які взаємно сприяють досягненню системою кінцевого визначеного результату – підвищення організаційно-технологічної надійності будівництва.

Об'єктом системного дослідження є складні системи, що складаються з взаємопов'язаних елементів у єдине ціле з усіма зв'язками і властивостями.

Система (від др.-грець. – «складене з частин», «з'єднання», від «сполучаю, складаю») – це відокремлена сукупність елементів, що взаємодіють між собою, яка утворює деяку цілісність, володіє певними інтегральними властивостями, що дозволяє їй виконувати в довкіллі певну функцію (Гусаков, 1983; Пшінько, Радкевич, & М'якенька, 2012; Данкевич, 2019).

Системологія – (від др.-грець. – ціле, складене з частин; – «слово», «думка», «сенс», «поняття») – це теорія складних систем; фундаментальна інженерна наука, що встановлює загальні закони потенційної ефективності складних матеріальних систем як технічної, так і біологічної природи (Гусаков, 1983; Гусаков, (Ред.), 1999; Пшінько, Радкевич, & М'якенька, 2012; Данкевич, 2019).

У контексті гармонізації системологічного управління виробничими системами та вдосконаленні перспективних стратегій застосуємо методику керування організаційно-технологічною надійністю. Надійність виробничої системи – це комплексна властивість виробничої системи функціонувати на задовільному рівні впродовж заданого часового терміну, з надбанням кількісних часових характеристик, таких як вірогідність, функціональність, безвідмовність, довговічність, стійкість, живучість, безпека та інше.

Організаційно-технологічна надійність виробничої системи (в будівництві) – це здатність виробничої системи, використовуючи організаційні рішення, регулювати внутрішні технологічні процеси зі збереженням технічних параметрів з заданою вірогідністю за конкретних умов будівельного виробництва, а також у заданих розрахункових межах задля отримання запланованого результату – безперебійного функціонування виробництва.

Встановлена надійність має бути забезпечена на всіх етапах життєвого циклу об'єкта, а саме: вишукування і проектування; виготовлення, транспортування та зберігання будівельних виробів; освоєння будівельного майданчика та зведення об'єкта, приймання об'єкта в експлуатацію; використання об'єкта за призначенням протягом встановленого терміну експлуатації.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

плуатації, оцінка технічного стану, ремонт; реконструкція й подальше використання у нових умовах; ліквідація об'єкта.

Внутрішня архітектура виробничих систем складається з неоднорідних елементів, де кожен несе своє функціональне і специфічне навантаження в досягнення результату. Тому до складу функціональних систем слід включити такі неоднорідні підсистеми, як інженерні дослідження, техніко-економічне обґрунтування, проектування, об'ємно-планувальні і конструктивні рішення проектів, методи їх зведення, управління зведенням, експлуатація. Ці підсистеми діляться на низку неоднорідних складових (елементів), які розглядаються розрізнено і поза єдиною функціональною системою, що призводить до проблем у досягненні спільного корисного результату.

В оцінці результату стала можлива розробка теорії організаційно-технологічної надійності будівельного виробництва. Структура систем, склад елементів, якісні і кількісні зв'язки між елементами, необхідні вхідні і вихідні дані є атрибутами системотехніки. Підхід не має бути жорстко детермінованим, а повинен володіти гнучкістю перебудови задля досягнення основної мети (Менейлюк, Ершов, & Никифоров, 2016).

Визначення надійності в оцінці результату передбачає в необхідних випадках для забезпечення заданого результату структурну перебудову системи і функціональну підміну одних елементів (ненадійних, таких, що відмовили) іншими елементами, що виконували раніше інші функції (Мартиш, О. О., Мартиш, О. П., Павлов, Ринкевич, & Михайлова, 2017).

Послідовність дій перспективного розвитку в управлінні виробничими системами відображається через перелік повних функцій управління, які є системою стереотипів (тобто трафаретних, звичних дій) стосунків і перетворень між інформаційними модулями цієї системи.

Інформаційний модуль управління – це інформаційний стан, який в ту або іншу сторону змінює міру цього елемента, що призводить до нового матеріального змісту цього елемента. Будь-яка передача інформації від одного елемента до іншого є впливом, що управляє. Розглянемо сім інформаційних модулів управління виробничими системами: перший інформаційний модуль (ψ_1) – оцінка стану управління

об'єктом; другий інформаційний модуль (ψ_2) – визначення власного стану суб'єкту управління; третій інформаційний модуль (ψ_3) – визначення стану сусідніх об'єктів, з якими виконується взаємодія; четвертий інформаційний модуль (ψ_4) – стан довкілля, в якому виконується взаємодія елементів системи; п'ятий інформаційний модуль (ψ_5) – стан структури, яка здійснює управління (суб'єкт управління); шостий інформаційний модуль (ψ_6) – вказівки та обмеження від більш вищих структур управління; сьомий інформаційний модуль (ψ_7) – розрізнення-методологія (усвідомлення процесу управління системою через поєднання всіх сім інформаційних модулів).

Повні функції управління означають циркуляцію інформації і перетворення інформації в процесі управління виробничою системою. При розгляді будь-якого виробничого процесу використана методика комплексного уявлення системи управління.

Повні функції управління виробничої системи – це послідовність дій суб'єкту управління у межах перспективної стратегії розвитку: дія перша (X_1) – розпізнавання фактора середовища, тобто фактора, який впливає на систему, з якою стикається інтелект; дія друга (X_2) – формування стереотипу розпізнавання, тобто розпізнавання чинника середовища на майбутнє; дія третя (X_3) – формування вектору цілей відносно кожного чинника середовища і внесення часткового вектора до загального вектора; дія четверта (X_4) – формування цільової функції (концепції), управління на основі рішення задачі стійкості за передбаченістю; п'ята дія (X_5) – організація структури, яка управляє та несе в собі цільову функцію управління; шоста дія (X_6) – контроль, спостереження за діяльністю структури системи в процесі управління; сьома дія (X_7) – підтримання працездатності або ліквідація – підтримка працездатності структури в процесі управління або її ліквідація (при необхідності).

Повні функції управління виробничої системи можуть бути реалізовані тільки в інтелектуальній схемі управління, яка припускає творчість системи управління, наявність інтелекту керівника, який зобов'язаний вирішити наступні завдання: завдання перше (χ_1) – виявлення чинників середовища, які впливають на виробничу систему (без творчого підходу це зробити

неможливо); завдання друге (χ_2) – формування векторів цілей (це також творчий процес); завдання третє (χ_3) – формування нових концепцій управління (як усе це зробити, якими новітніми засобами користуватися, якими перспективними силами?); завдання четверте (χ_4) – вдосконалення методології прогнозу та корекції при вирішенні завдань стійкості по передбаченості за схемою «предиктор – коректор»; завдання п'яте (χ_5) – здатність керуючої системи самотужки виробляти новий інформаційний модуль на основі системології управління.

Результати

Управління виробничими системами може вдало виконуватись за допомогою структурно-логічної комплексної моделі управління виробничою системою (рис. 1).

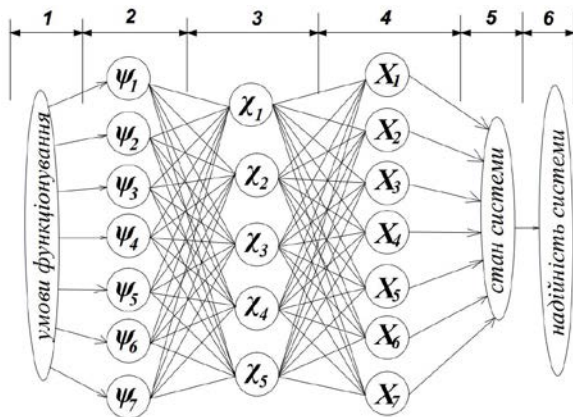


Рис. 1. Структурно-логічна комплексна модель управління виробничою системою

Структурно-логічна комплексна модель на рис. 1 відображає взаємозв'язок інформаційних модулів, повних функцій управління виробничими системами та поєднує стани перспективного розвитку системи шляхом наступних фаз перетворення (Йенсен, & Барнес, 1984): перша фаза – фаза умов навколишнього середовища системи (вихідні дані); друга фаза – фаза інформаційних можливостей функціональних потоків; третя фаза – фаза інтелектуальної схеми управління; четверта фаза – фаза здійснення функціональних процесів управління системою; п'ята фаза – фаза формування стану системи; шоста фаза – фаза цільових можливостей системи або надійності системи (результат функціонування).

Процедури будівельної експертизи в області визначення організаційно-технологічної надійності будівельного проекту містять ряд основних завдань, серед яких є: оцінка надійності розроблених календарних планів та графіків з визначенням вірогідності зриву термінів робіт; розроблення комплексу організаційно-технологічних заходів з метою підвищення організаційно-технологічної надійності.

Одним з параметрів календарного плану будівництва, який безпосередньо стосується надійності організаційно-технологічного проектування, є коефіцієнт напруженості K_n роботи.

Коефіцієнтом напруженості K_n роботи P_{ij} називається відношення тривалості неспівпадаючих (укладених між одними і тими ж подіями) відрізків шляху, одним з яких є шлях максимальної тривалості, що проходить через цю роботу, а іншим – критичний шлях (Гусаков, 1974):

$$K_n = \frac{t(L_{\max}) - t_{1_{kp}}}{t_{kp} - t_{1_{kp}}},$$

де $t(L_{\max})$ – тривалість максимального шляху, що проходить через роботу P_{ij} від початку до кінця сітьового графіка; t_{kp} – тривалість (довжина) критичного шляху; $t_{1_{kp}}$ – тривалість відрізка розглянутого максимального шляху, що збігається з критичним шляхом.

Коефіцієнт напруженості K_n роботи P_{ij} може змінюватися в межах від 0 (для робіт, у яких відрізки максимального із шляхів, які не збігаються з критичним шляхом, складаються з фіктивних робіт нульової тривалості) до 1 (для робіт критичного шляху). Чим ближче до 1 коефіцієнт напруженості K_n роботи P_{ij} , тим складніше виконати дану роботу у встановлені терміни. Чим ближче K_n роботи P_{ij} до нуля, тим більшим відносним резервом володіє максимальний шлях, що проходить через дану роботу.

Значення коефіцієнту K_n перебуває у межах $0 < K_n < 1$. Прямо пропорційне зростанню коефіцієнта збільшується складність своєчасного виконання робіт, а отже, зменшується вірогідність досягнення кінцевого результату – введення в дію об'єктів з необхідною якістю, у встановлені терміни з максимальним прибутком підрядника.

Обчислені коефіцієнти напруженості дозволяють додатково класифікувати роботи по зо-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

нам. Залежно від величини K_n виділяють три зони: 1) критичну ($K_n > 0,8$); 2) підкритичну ($0,6 < K_n < 0,8$); 3) резервну ($K_n < 0,6$).

Аналіз коефіцієнту K_n дозволяє виявити основні залежності, які впливають на надійність зведення будівлі у заданий термін.

Для зручності проведення дослідження прийемо в якості вихідних даних результати розрахунків організаційно-технологічної моделі зведення шістнадцятиповерхового житлового будинку. Екстраполяційними методами отримані значення для всього проміжку значень $0 < K_n < 1$.

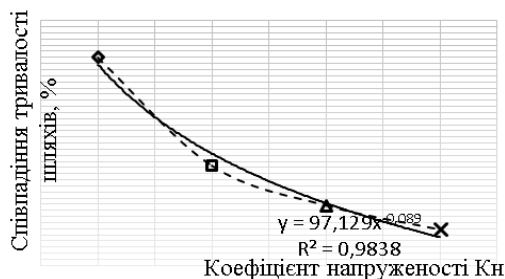
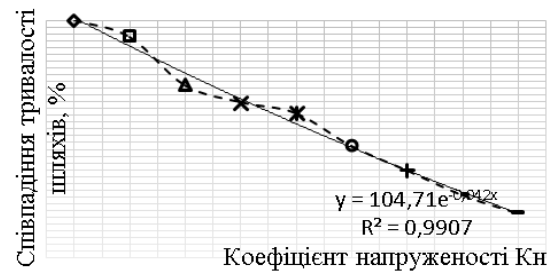
До резервної зони входять всі значення, які відповідають ($K_n < 0,6$). Із рисунків 2 та 3 видно, що в резервну зону входять роботи, у яких тривалість шляхів, які проходять через них, збігається з тривалістю критичного шляху на більш ніж 83,3 %.

Таблиця 1

Вихідні дані до розрахунків

Робота $P_{i,j}$	$t(L_{max})$, днів	$t_{1_{кр}}$, днів	Збігання тривалості шляхів $t(L_{max})$ і $t_{кр}$, %	K_n
(1,2)	433	433	100,0	0
(2,3)	365	321	87,90	0,39
(5,6)	378	342	90,50	0,40
(7,8)	337	329	97,60	0,077
(7,9)	381	329	86,35	0,50

Під визначення підкритичної зони підпадають роботи з ($0,6 < K_n < 0,8$). Виходячи з графіку, підкритичними є роботи, у яких співпадіння тривалості шляху, який проходить через них, збігається з тривалістю критичного шляху у межах 73,3...83,3 %.

Рис. 2. Графічне зображення залежності K_n від величини співпадіння тривалості шляхів $t(L_{max})$ і $t_{кр}$ у %Рис. 3. Графічне зображення залежності K_n від величини співпадіння тривалості шляхів $t(L_{max})$ і $t_{кр}$ у % для значень K_n від 0 до 1

Роботи, у яких $t_{1_{кр}}$ складає менш ніж на 73,3 % від $t(L_{max})$, є критичними, коефіцієнт напруженості перевищує 0,8.

Проаналізувавши рисунки 2 та 3 можна побачити, що: роботи, через які проходять критичний шлях, мають нульовий коефіцієнт напруженості; чим більша тривалість співпадаючих робіт критичного шляху та шляху максимальної довжини, що проходить через задану роботу, тим менший коефіцієнт напруженості цієї роботи; якщо співпадіння дорівнює менше 70 % роботу вкрай складно виконати вчасно.

Надійність зведення житлових будівель істотно впливає на ефективність капітальних вкладень. Підвищення рівня якості організаційно-технологічного проектування — основний метод отримання максимального прибутку (Гусаков, 1983; Миротин, & Ташбаев, 2004; Млодецький, & Цецаревич, 2015).

Серед великої кількості факторів впливу на будівельне виробництво найбільш значимими є організаційно-технологічні. Такі чинники, як тип виробництва, рівень механізації робіт, характер і особливості процесу, природні і метеорологічні умови, призводять до явних і прихованих втрат часу, які часом перевищують 30 % від запланованого.

Критерії надійності організаційно-технологічного проектування тісно пов'язані з вірогідністю виникнення відмов під час будівельного процесу. Найбільш ефективним шляхом підвищення організаційно-технологічної надійності є усунення причин виникнення відмов. На основі аналізу факторів, які спричиняють виникнення відмов при виконанні будівельно-монтажних робіт, розроблені рекомендації, дотримання яких дозволить вдосконалити організаційно-технологічне проектування і підвищити надійність зведення житлових будівель.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

За результатами проведеного дослідження з системного управління виробничими процесами будівництва запропонуємо напрями з оптимізаційних заходів щодо підвищення організаційно-технологічної надійності виробничих систем в будівництві: оперативне управління і планування; якісна організація диспетчерської служби, своєчасне забезпечення об'єктів будівельними конструкціями, матеріалами і виробами, створення страхових запасів виробів і

матеріалів, організаційно-технологічна підготовка будівельного виробництва.

Використання оптимізаційних заходів з підвищення організаційно-технологічної надійності реалізується за структурно-логічною схемою, яка визначає пріоритетні напрямки перспективної стратегії управлінської діяльності у контексті системологічного розуміння (рис. 4).

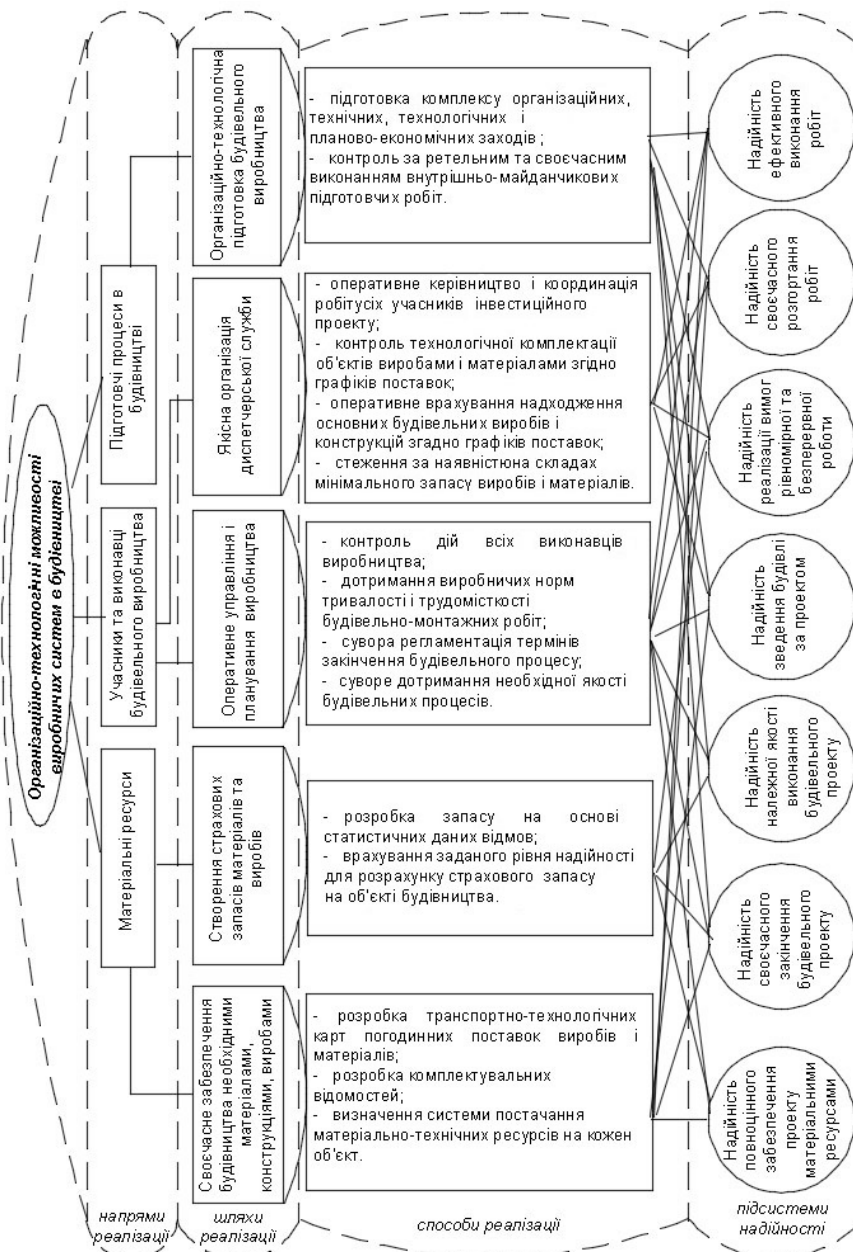


Рис. 4. Структурно-логічна оптимізаційна схема з системної реалізації організаційно-технологічних можливостей виробничих систем в будівництві

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано модель управління виробничими системами будівельної галузі на основі загальних законів і принципів системології.

Структурно-логічна комплексна модель відображає взаємозв'язок інформаційних модулів, повних функцій управління та очікуваних станів системи

Визначення надійності в оцінці результату передбачає в необхідних випадках для забезпечення заданого результату структурну перебудову системи і функціональну підміну ненадійних елементів іншими елементами, що виконували раніше інші функції.

Обґрунтовано вплив параметрів календарного графіку на надійність зведення житлових будівель, у взаємозв'язку із управлінням та реалізацією проекту. Виконані статистичні випробування дозволяють врахувати імовірнісний характер будівництва і вплив випадкових факторів на процес зведення будинків.

Виявлені та обґрунтовані чинники низького рівня організаційно-технологічної надійності проектування і вірогідності зниження планового прибутку, які криються в фінансових, часових, просторових і організаційних втратах.

Висновки

Використання оптимізаційних заходів з підвищення організаційно-технологічної надійності запропоновано реалізовувати за розробленою структурно-логічною схемою, яка визначає пріоритетні напрямки перспективної стратегії управлінської діяльності у контексті системологічного розуміння.

Запропонована ефективна реалізація організаційно-технологічних можливостей виробничих систем по забезпеченню організаційно-технологічної надійності дозволяє оптимізувати перспективну стратегію розвитку будівельного проекту та підвищити ефективність капітальних вкладень при забезпеченні договірних обов'язків по термінам введення об'єкта в експлуатацію.

Схема оптимізації організаційно-технологічної надійності виробничих систем

являє собою механізм протидії ризиковим ситуаціям та їх наслідкам і необхідна для підвищення надійності всього будівельного процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Гусаков, А. А. (1974). *Организационно-технологическая надежность строительного производства*. Москва: Стройиздат.
- Гусаков, А. А. (1983). *Системотехника в строительстве*. Москва: Стройиздат.
- Гусаков, А. А. (Ред.) (1999). *Системотехника строительства. Энциклопедический словарь*. Москва: Фонд «Новое тысячелетие».
- Данкевич, Н. О. (2019). Підвищення ефективності організаційних рішень у складі проекту організації будівництва. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 38-43.
- Йенсен, П., & Барнес, Д. (1984). *Потоковое программирование*. Москва: Радио и связь.
- Мартиш, О. О., Мартиш, О. П., Павлов, Ф. І., Ринкевич, Н. С., & Михайлова, І. О. (2017). Підвищення організаційно-технологічної надійності календарних планів будівництва. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 12, 51-62.
- Менейлюк, А. І., Ершов, М. Н., & Никифоров, А. Л. (2016). *Оптимизация организационно-технологических решений реконструкции высотных инженерных сооружений*. Київ: ТОВ НВП «Інтерсервіс».
- Миротин, Л. Б., & Ташбаев, Ї. Э. (2004). *Системный анализ в логистике*. Москва: Экзамен.
- Млодецкий, В. Р., Тянь, Р. Б., Попова, В. В., & Мартыш, А. А. (2013). *Организационно-технологическая и экономическая надежность в строительстве*. Днепропетровск: Наука и образование.
- Млодецкий, В. Р., & Цецаревич, Т. О. (2015). Обґрунтування раціонального рівня організаційно-технологічної надійності у будівельних проектах. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 9 (210), 49-54.
- Оре, О. (1980). *Теория графов*. Москва: Наука.
- Пішінко, О. М., Радкевич, А. В., & М'якенька, І. В. (2012). Аналіз сучасних підходів до організаційно-технологічної надійності транспортних споруд. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 1, 88-92.
- Судаков, К. В. & Гусаков, А. А. (Ред.) (2004). *Информационные модели функциональных систем*. Москва: Фонд «Новое тысячелетие».

І. Д. ПАВЛОВ¹, М. А. ПОЛТАВЕЦ^{2*}, Ф. І. ПАВЛОВ³

¹ Кафедра промышленного и гражданского строительства, Запорожский национальный университет, ул. Жуковского, 66, Запорожье, Украина, 69600, ORCID 0000-0002-0412-6351

^{2*} Кафедра промислового і громадянського будівництва, Запорізький національний університет, ул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, 69600, тел. +38(050) 710 00 58, ел. пошта poltavmar@ukr.net, ORCID 0000-0003-0504-5278

³ Кафедра планування і організації виробництва, Придніпровська державна академія будівництва і архітектури, ул. Чернышевского, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, ORCID 0000-0002-4442-9277

СИСТЕМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Цель. Разработка модели перспективного управления производственными системами строительной отрасли на основе общих законов и принципов системологии на пути достижения системой конечного определенного результата – организационно-технологической надежности строительства. **Методика.** Использование методов системного анализа и системотехнического обоснования, использование методов теории систем, использования методов теории моделирования с целью перспективного управления производственными системами строительной отрасли на основе общих законов и принципов системологии на пути достижения системой конечного определенного результата – организационно-технологической надежности строительства. **Результаты.** Обосновано влияние параметров календарного графика на надежность возведения жилых зданий, во взаимосвязи с управлением и реализацией проекта; выполнены статистические испытания позволяют учесть вероятностный характер строительства и влияние случайных факторов на процесс возведения домов; выявлены и обоснованы факторы низкого уровня организационно-технологической надежности проектирования и достоверности снижения плановой прибыли, которые содержатся в финансовых, временных, пространственных и организационных потерях. **Научная новизна.** Предложенная оптимизационная модель совершенствования общей методики для эффективной реализации организационно-технологических возможностей производственных систем по обеспечению организационно-технологической надежности строительства. **Практическая значимость.** Использование оптимизационных мероприятий по повышению организационно-технологической надежности предложено реализовывать по разработанной структурно-логической схеме, которая определяет приоритетные направления перспективной стратегии управленческой деятельности в контексте системологического понимания. **Выводы.** Выполнено системотехническое прогнозирование сроков возведения жилых объектов на основе вероятностно-статистического подхода. Перспективность управленческой стратегии, усовершенствованная аналитическим исследованием влияния напряженности работ календарного графика на надежность выполнения строительного проекта и разработанными рекомендациями по оптимизации организационно-технологического проектирования и уменьшения степени риска подрядной организации в процессе функционирования производственных систем строительства.

Ключевые слова: строительство; системология; производственная система; информационные модули; функции управления; состояние системы; надежность системы; организационно-технологическая надежность; безотказность; моделирование

I. D. PAVLOV¹, M. O. POLTAVETS^{2*}, F. I. PAVLOV³

¹ Department: Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, Zhukovskogo str. 66, Zaporizhzhya, Ukraine, 69600, ORCID 0000-0002-0412-6351

^{2*} Department: Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, Zhukovskogo str. 66, Zaporizhzhya, Ukraine, 69600, tel. +38(050) 710 00 58, e-mail poltavmar@ukr.net, ORCID 0000-0003-0504-5278

³ Department of Planning and Organization of Production, Pridneprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevsky str., 24-a, Dnipro, Ukraine, ORCID 0000-0002-4442-9277

SYSTEM MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL-TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF PRODUCTION PROCESSES IN BUILDING

Purpose. Development of a model of perspective management of production systems of the construction industry on the basis of general laws and principles of systemology on the way to achieving the system of the final definite result – organizational and technological reliability of construction. **Methodology.** Use of methods of system analysis and systematic justification, use of methods of systems theory, use of methods of modeling theory with the

© I. Д. Павлов, М. О. Полтавець, Ф. І. Павлов, 2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

purpose of perspective management of production systems of the construction industry on the basis of general laws and principles of systemology on the way to achieving the system of final definite result – organizational and technological reliability of construction. **Findings.** The influence of the calendar schedule parameters on the reliability of construction of residential buildings in relation to the management and implementation of the project is substantiated; performed statistical tests allow to take into account the probabilistic nature of construction and the influence of random factors on the process of building houses; factors of low level of organizational and technological reliability of designing and probability of reduction of planned profit, which are hidden in financial, time, space and organizational losses, are revealed and substantiated. **Originality.** The optimization model of improvement of the general methodology for the effective realization of organizational and technological capabilities of production systems to ensure organizational and technological reliability of construction is proposed. **Practical value.** The use of optimization measures to improve organizational and technological reliability is proposed to be implemented in accordance with the developed structural and logical scheme, which determines the priority directions of the prospective strategy of management activities in the context of systematic understanding.

Keywords: construction; systemology; production system; information modules; control functions; system state; system reliability; organizational-technological reliability; reliability; modeling

REFERENCES

- Gusakov, A. A. (1974). *Organizacionno-tehnologicheskaja nadezhnost' stroitel'nogo proizvodstva*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Gusakov, A. A. (1983). *Sistemotekhnika v stroitel'stve*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Gusakov, A. A. (Red.) (1999). *Sistemotekhnika stroitel'stva. Jenciklopedicheskij slovar'*. Moskva: Fond «Novoe tysjacheletie». (in Russian)
- Dankevych, N. O. (2019). Pidvyshhennja efektyvnosti orghanizacijnykh rishenj u skladi proektu orghanizacijni budivnytva. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 16, 38-43. (in Ukrainian)
- Jensen, P., & Barnes, D. (1984). *Potokovoe programmirovanie*. Moskva: Radio i svjaz'. (in Russian)
- Martysh, O. O., Martysh, O. P., Pavlov, F. I., Rynkevych, N. S., & Mykhajlova, I. O. (2017). Pidvyshhennja orghanizacijno-tekhnologichnoji nadijnosti kalendarnykh planiv budivnytva. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 12, 51-62. (in Ukrainian)
- Menejljuk, A. I., Ershov, M. N., & Nikiforov, A. L. (2016). Optimizacija organizacionno-tehnologicheskikh reshenij rekonstrukcii vysotnykh inzhenernykh sooruzhenij. Kyjiv: TOV NVP «Interservis». (in Russian)
- Mirotin, L. B., & Tashbaev, Y. Je. (2004). *Sistemnyj analiz v logistike*. Moskva: Jekzamen. (in Russian)
- Mlodeckij, V. R., Tjan, R. B., Popova, V. V., & Martysh, A. A. (2013). *Organizacionno-tehnologicheskaja i jekonomicheskaja nadezhnost' v stroitel'stve*. Dnepropetrovsk: Nauka i obrazovanie. (in Russian)
- Mlodeckij, V. R., & Cecarevych, T. O. (2015). Obgruntuvannja racionaljnogho rivnja orghanizacijno-tekhnologichnoji nadijnosti u budiveljnykh proektakh. *Visnyk Prydniprovskoj derzhavnoji akademiji budivnytva ta arkhitektury*, 9 (210), 49-54. (in Ukrainian)
- Ore, O. (1980). *Teorija grafov*. Moskva: Nauka. (in Russian)
- Pshinjo, O. M., Radkevych, A. V., & M'jakenjka, I. V. (2012). Analiz suchasnykh pidkhodiv do orghanizacijno-tekhnologichnoji nadijnosti transportnykh sporud. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 1, 88-92. (in Ukrainian)
- Sudakov, K. V. & Gusakov, A. A. (Red.) (2004). *Informacionnye modeli funkcional'nyh sistem*. Moskva: Fond «Novoe tysjacheletie». (in Russian)

Надійшла до редколегії 26.03.2020.

Прийнята до друку 24.04.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.42(477-25):624.131-026.27/.366

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Д. О. БАННІКОВ^{2*}, М. І. НЕТЕСА³

¹Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

^{2*}Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

³Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, ел. пошта andreynetesat@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

ГЕОФІЗИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УКРІПЛЕННЯ ШАРУВАТОГО ТА ВОДОНАСИЧЕНОГО ҐРУНТОВОГО МАСИВУ В УМОВАХ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

Мета. Актуальним питанням для тунелів метрополітену мілкого закладення в складних інженерно-геологічних умовах є визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів не тільки під час інженерних вишукувань, але й під час їх вивчення з використанням геофізичних методів дослідження ґрунтових умов. Крім того, важливо обрати способи покращення властивостей ґрунтів шляхом укріплення, особливо в зонах зниження їх міцносних параметрів. Це забезпечує ефективну експлуатацію тунелів з виключенням небезпечних явищ типу віброповзучості ґрунтів і деформацій колій та оправ. **Методика.** Використовуючи існуючі положення про геофізичні дослідження, з метою визначення слабких місць шаруватого та водонасиченого масиву та обґрунтування способів його укріплення, розроблено основи комплексного дослідження та виробничої реалізації для підвищення рівня безпечної роботи тунелів метрополітену. **Результати.** Виконано геофізичні дослідження по виявленню слабких місць в ґрунтовій товщі по трасі перегінних тунелів Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену (лівий берег Дніпра) та встановлено, що в сучасних умовах для підсилення слабких водонасичених та шаруватих ґрунтів необхідно використовувати способи перемішування ґрунтів з в'язкими речовинами, які ін'єктуються під тиском. **Наукова новизна.** На основі виконаних аналітичних досліджень отримана залежність пористості слабких водонасичених ґрунтів від відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння при визначених частотах коливань колії, обумовлених рухом поїздів метрополітену, а також визначені параметри укріплення ґрунтів з боків та під лотком оправи перегінних тунелів. **Практична значимість.** Застосування геофізичних методів визначення слабких місць в ґрунтовому масиві дозволило виконати їх укріплення в діючих тунелях метрополітену мілкого закладення та знизити ризик їх небезпечної експлуатації.

Ключові слова: фізико-механічні властивості; шаруватий та водонасичений масив; тунелі метрополітену; мілке закладення; геофізичні методи; хімічне закріплення

Вступ

В останні десятиріччя при спорудженні будівельних об'єктів мілкого закладення, в тому числі і тунелів метрополітену, існує проблема їх зведення та експлуатації, особливо в складних інженерно-геологічних умовах, що позначені високим рівнем водонасиченості слабких шаруватих незв'язних ґрунтів (Петренко, В. Д., Петренко, В. І., & Савинков, 2011; Петренко, В. І., & Петренко, В. Д., 2014).

Визначення їх властивостей в реальних ґрунтових умовах на різних глибинах може бути

реалізовано на основі відомих геофізичних методів (створення короткоімпульсного поля, вертикального електрорезонансного або георадарного видів зондування).

Розробка та впровадження цих методів успішно виконані в Україні, в тому числі науково-виробничим підприємством «ГЕОПРОМ» в умовах будівництва та експлуатації тунелів Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену (Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. І., 2017).

Як відомо, для укріплення слабких водонасичених ґрунтів широко реалізована буро-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

змішувальна технологія при достатньо низькому тиску в декілька атмосфер (Shibazaki, 2003; Гришко, Шуплик, & Куликова, 2011; Зоценко, Винников, Ларцева, Шокарев, & Крисан, 2011; Черняков, 2011; Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, 2011; Петренко, В. И., & Петренко, В. Д., 2014). Цим вона відрізняється від технології «jet-grouting», в якій тиск компонентів, особливо рідинного, досягає порядку сотень атмосфер (Qiu, Dennis, & Elliott, 2000; Малинин, 2009). Застосовуючи низький тиск, буро-змішувальна технологія, що широко розповсюджена на різних будівельних об'єктах, була запропонована для використання при укріпленні слабких водонасичених ґрунтів при будівництві тунелів метрополітену на лівому березі Дніпра в місті Києві (Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, 2011; Петренко, В. И., & Петренко, В. Д., 2014; Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. И., 2017).

Особливість вказаного способу полягає в перемішуванні слабого водонасиченого ґрунту з в'язкими речовинами, в якості яких застосовується суміш рідкого скла та цементу або вапна та цементу. При цьому створюється конструктивні елементи у вигляді несучих та огорожувальних колон.

Таке виготовлення достатньо міцних ґрунтоцементних або ґрунтосилікатноцементних елементів, що сприймають боковий тиск від ґрунтового масиву та виконують роль протифільтраційного огороження, є актуальною технологією укріплення ґрунтової товщі навколо тунельного об'єкта.

Мета

Складні інженерно-геологічні умови будівництва тунелів та метрополітенів, особливо характерні наявністю шаруватих та водонасичених ґрунтів, суттєво зменшують можливість надійної і довготривалої експлуатації підземних об'єктів. При цьому виникають проблемні питання вибору та обґрунтування ефективних методів визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів та рівня їх водонасиченості.

При сучасному розвитку наукових досліджень в області застосування геофізичних методів можна з високою точністю отримати основні параметри ослаблення ґрунтового масиву і обрати способи його укріплення. Тому в цій

роботі за мету поставлено проведення геофізичних досліджень по визначенню слабких місць у верхніх шарах ґрунтів при будівництві та експлуатації Київського метрополітену, а також обґрунтування способів їх укріплення. Використання методів глибинної стабілізації слабких та водонасичених ґрунтів дозволяє вирішувати задачі з підсилення слабких ґрунтів.

Методика

Виявлення зон слабких ґрунтів може бути виконано шляхом визначення їх розповсюдження із застосуванням геофізичних методів, ефективність яких підтверджується практичним впровадженням. Ці методи повинні мати високу точність та оперативність в складних інженерно-геологічних умовах.

При будівництві Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену на лівому березі Дніпра була реалізована технологія будівництва станцій і перегінних тунелів мілкового закладення на ділянці від станції «Осокорки» до станції «Позняки». Надана ділянка характеризується достатньо складними інженерно-геологічними умовами. Крім того, на поверхні над вказаною діючою лінією метрополітену було розпочато будівництво паркінгу підземно-наземного типу від станції «Осокорки» до вул. Бориса Гмирі.

Геологічний розріз наданої ділянки представлений алювіальними чвертковими пісками, поверхня яких залягає на 7...8 м нижче денної поверхні. Ґрунти алювію складаються з пісків середньої та мілкої крупності з прошарками (лінзами) суглинків і супісків. Алювіальні осади перекриті піщаним ґрунтом намивного і насипного походження. Потужність техногенних ґрунтів змінюється в межах від 3 до 8 м. Вони представлені пісками з прошарками супісків та локально збагачені гумусовим матеріалом. Насипний ґрунт складається з пісків та залишків будівельного сміття.

В алювіальних пісках на глибині 6,5...7,5 м знаходиться водоносний горизонт, що живиться атмосферними опадами та втратами води в підземній водоносній системі. Амплітуда коливання рівня ґрунтових вод складає 1,5...2,0 м від зафіксованого. Ґрунтові води не відносяться до категорії агресивних.

Для літологічної характеристики ґрунтів використовується номенклатура інженерно-геологічних елементів (ІГЕ). Всього в літологічному розрізі виділяють 8 ІГЕ, що відрізняються фізико-механічними властивостями. ІГЕ-1 відноситься до насипного ґрунту, ІГЕ-2...ІГЕ-4 представляють собою намівний ґрунт, алювіальні піски відносяться до ІГЕ-5...ІГЕ-8.

Вказані ІГЕ мають наступні літологічні характеристики.

ІГЕ-1. Пісок низької щільності ($\gamma = 16 \text{ кН/м}^3$), супісок, будівельне сміття. Потужність від 1,8 до 4,0 м.

ІГЕ-2. Пісок середньозернистий, маловологий та водонасичений. Щільність середня ($\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$). Потужність від 2,0 до 6,0 м. Включає лінзи ІГЕ-2а (пісок середньозернистий, щільний ($\gamma = 17,7 \text{ кН/м}^3$), маловологий) потужністю до 1,5 м.

ІГЕ-2б. Пісок середньої щільності ($\gamma = 16,1 \text{ кН/м}^3$), маловологий з включенням гумусу до 1 %.

ІГЕ-3. Маловологий пісок середньої щільності та крупності з включенням гумусу до 1 %.

ІГЕ-3а. Пісок щільний ($\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$), насичений водою. В ньому знаходиться рівень ґрунтових вод. Ці піски створюють малопотужну лінзу з розміром по вертикалі 0,5...0,7 м.

ІГЕ-4. Твердий піщаний супісок ($\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$), який утримує до 7,6 % гумусового матеріалу. Створює тонку лінзу (потужність біля 0,7 м) між ІГЕ-2б та ІГЕ-3а.

ІГЕ-5. Лінза пластичного суглинку. Щільність підвищена ($\gamma = 18,8 \text{ кН/м}^3$), потужність до 4,0 м.

ІГЕ-6. Лінза алювіального піску в основному середньої крупності протяжністю 125 м і максимальною потужністю 2,5 м. Щільність підвищена ($\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$).

ІГЕ-7. Тонка лінза пластичного супіску протяжністю 85 м. Щільність підвищена ($\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$).

ІГЕ-8. Алювіальний чвертковий мілкий та середньої крупності пісок.

Коефіцієнт фільтрації (K_{ϕ}) зменшується з глибиною від ІГЕ-1 до ІГЕ-3а від 10 до 5 м/добу. Різке зменшення K_{ϕ} відбувається на інтервалі ІГЕ-5...ІГЕ-7, в якому залягають

щільні піски із суглинками та вмістом органіки (ІГЕ-5). Значення K_{ϕ} алювіального чистого та щільного піску (ІГЕ-8) дорівнює 7 м/добу. Мінімальні значення $K_{\phi} = 0,03 \dots 0,04$ м/добу при таманні ґрунтам з глинистим матеріалом (ІГЕ-5 та ІГЕ-6). Починаючи з ІГЕ-3а, ґрунти характеризуються як водонасичені.

Ускладнюючими факторами геологічної побудови об'єкту є наступні: 1) неоднорідний літологічний склад ґрунтової товщі (макروشаруватість); 2) наявність ІГЕ з низьким K_{ϕ} (ІГЕ-5, ІГЕ-6); 3) зниження фізико-механічних властивостей ґрунту і K_{ϕ} , що зумовлено наявністю органічного матеріалу (гумусу) в пісках і супісках ІГЕ-4. Необхідно також враховувати, що сухий ґрунт знаходиться до глибини приблизно 7 м, а нижче цієї відмітки піски насичені водою.

При проведенні геофізичних робіт наукововиробничим підприємством «ГЕОПРОМ» були використані наступні методи дослідження: 1) метод створення короткоімпульсного поля; 2) метод вертикального електрорезонансного зондування; 3) метод георадарного зондування.

Роботи виконувалися як всередині тунелю, так і на поверхні. При цьому досліджувалися зони за тунельним простором з бокових сторін і під бетонною основою (лотком) тунелю.

Метод створення короткоімпульсного поля використовувався для визначення зон підвищеної фільтрації та підвищення рівня водонасиченості ґрунтів. Метод створення короткоімпульсного поля базується на вивченні процесу генерації і загасання електромагнітного сигналу в приймальних антенах після проходження електромагнітного імпульсу в антені генератору.

Методи електрорезонансного та георадарного зондування застосовувалися для уточнення вертикальних стратиграфічних розрізів, шаруватості, визначення суфозійно-міграційних каналів і порожнин, в тому числі заповнених водою.

Для проведення зйомок над об'єктами досліджень використовувалася малогабаритна вимірювальна установка, яка базується на створенні імпульсів збудження короткої довжини та реєстрації процесу становлення електромагнітного поля та феритові антени типу «вертикальний диполь».

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В модифікації наданого методу для збудження сигналу використовується короткий електромагнітний імпульс тривалістю 10 мкс при струмі збудження 10 А.

Процес створення електромагнітного поля реєструється на приймальній малогабаритній феритовій антені з наступним співвідношенням параметрів активного опору (R), індуктивності (L) та ємності (C):

$$R \ll 2\sqrt{L/C}. \quad (1)$$

Для приймальних антен з подібним співвідношенням параметрів процес становлення поля має коливальний характер, реєстрація якого здійснюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача сигналу АЦП. Дані процесу записуються та зберігаються у цифровому вигляді. Одночасно із реєстрацією здійснюється обробка даних спостережень та видача їх на монітор польового комп'ютера.

Для побудови контурів зон підвищеної вологості ґрунтів здійснюється підсумовування відбитого сигналу на визначеному часовому інтервалі. Для визначення глибини закладення аномальних геоелектричних об'єктів використовується методи вертикального електрорезонансного та георадарного зондування.

Методика вертикального електрорезонансного зондування базується на вивченні спектральних характеристик природного електромагнітного поля над об'єктами досліджень і використовує принципи поляризації геоелектричних неоднорідностей стратиграфічного розрізу в природному квазістаціонарному електричному полі Землі. Його напруженість для рівнинних ділянок знаходиться в межах $E(z)=50\ldots100$ В/м. Геоелектричні неоднорідності розрізу в даному полі утворюють з поверхнею землі і повітря систему поляризаційних диполів.

Під час природної або штучно викликаной зміни величини $E(z)$ системою природно поляризованих диполів генерується пакет електромагнітних хвиль з довжиною L_i , що дорівнює:

$$L_i = 2H_i, \quad (2)$$

де H_i – глибина до поверхні конкретного поляризованого об'єкту.

При цьому на денній поверхні генерується сумарне електромагнітне поле, що зумовлене зміною природного електричного потенціалу. Реєстрація та визначення хвильових характеристик окремих хвиль даного поля може здійснюватися підбором резонансної частоти генератора або спеціальних антен.

Георадарний метод зондування суцільних середовищ або приповерхове радіолокаційне зондування (GPR – Ground Penetrating Radar) є технологічним методом вивчення приповерхової (в інтервалі перших десятків метрів) структури геологічних розрізів та окремих об'єктів (Petrenko, & Kovalevych, 2014). Принцип дії георадарних систем заснований на випромінюванні надширококузових (наносекундних) імпульсів електромагнітних хвиль метрового та дециметрового діапазону та прийманні сигналів, відбитих від меж поділів шарів середовища, що зондується. Такими межами є контакти між сухими та водонасиченими ґрунтами, розділ порід різного літологічного складу, контакти між породами та об'єктами штучного походження.

В Україні були розгорнуті роботи з вирішення різних задач, в тому числі оцінки якості ущільнення та вологості ґрунтів земляного полотна залізниць (Petrenko, & Kovalevych, 2014), визначення рівня ґрунтових вод та розмірів перезвожених зон ґрунту, а також виявлення потужності слабких ґрунтів, що підстилають земляне полотно, із пошуком в ньому дефектів (порожнини, зони розущільнення ґрунтів, інфільтрації води тощо).

Георадарні дослідження проводяться таким чином. Передаюча антена георадара із визначеним періодом випромінює надширококузові полуторноперіодні електромагнітні імпульси. Кожен з імпульсів розповсюджується в середовищі, що зондується, та відбивається від неоднорідностей. Відбиті хвилі реєструються приймальною антеною, проводиться їх запис та відбувається побудова на моніторі хвильової картини (радарограма). На горизонтальній осі радарограми відображається відстань у метрах, на вертикальній – час в наносекундах або глибина в метрах.

Результати

При аналізі ситуації, що склалася в розглянутих інженерно-геологічних умовах, слід враховувати, що коливання, зумовлені рухом метропоздів, можуть за рахунок динамічного впливу призвести до втрати стійкості структури водонасичених незв'язних ґрунтів та їх перехід в розріджений стан. Така ситуація завжди має катастрофічні наслідки для об'єктів, що знаходяться всередині ґрунтового масиву або на поверхні.

Як відомо, коливання ґрунту, що зумовлені рухом транспорту, достатньо слабкі. Разом з тим, внаслідок тривалості дії вони можуть бути причиною віброповзучості або відрокомпресії дисперсних ґрунтів, оскільки під час тривалої дії коливань та зростання їх прискорення опір зсуву суттєво зменшується, а значення коефіцієнту пористості збільшується, що обумовлює віброущільнення ґрунтів.

При визначеній частоті коливань опір ґрунту, особливо незв'язного, може настільки зменшитися, що ґрунт отримує властивості в'язкої рідини з внутрішнім тертям, близьким до нуля, і зниженою несучою здатністю.

Вібров'язкість ґрунтів може характеризуватися коефіцієнтом вібров'язкості v (Па·с), який залежить від властивостей ґрунту та відносного прискорення коливань, що записується згідно з (Цытович, 1983):

$$vn^k = b, \quad (3)$$

де n – відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння; k , b – емпіричні коефіцієнти.

З експериментальних досліджень відомо (Цытович, 1983), що коефіцієнт вібров'язкості залежить від фізичного стану ґрунту і особливо від його вологості, тобто його найменше значення спостерігається у повністю водонасичених пісках.

Під дією вібрації пухкі відкладення ґрунтів, особливо тих, що не мають зчеплення, можуть надавати значні осідання, зумовлені зміною пористості ґрунтів в процесі їх вібрування.

Як показали відповідні дослідження, між коефіцієнтом пористості ґрунтів та прискоренням коливань існує залежність, подібна до компресійної, що називається віброкомпресійною кривою ґрунтів.

Обробка статистичних даних, що наведені в літературі (Цытович, 1983), дозволила отримати залежність пористості пісків ε від відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння n :

$$\varepsilon = Ae^{-kn}, \quad (4)$$

де A та k – коефіцієнти, отримані на основі статистичної обробки вибіркової сукупності з урахуванням середньоарифметичної ознаки, середньоквадратичного відхилення та коефіцієнту парної кореляції для нелінійної залежності (Битюков, Зорина, Майминас, и др., 1971), що відповідно дорівнюють $A=0,854$ та $k=0,107$;

$n = \frac{\ddot{z}}{g}$ – відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння. Отриманий розрахунковим шляхом коефіцієнт парної кореляції r_{en} дорівнює 0,9332, що свідчить про високий рівень адекватності теоретичної та емпіричної залежностей (Битюков, Зорина, Майминас, и др., 1971).

Наведена залежність показує, що зі збільшенням відносного прискорення n коефіцієнт пористості піщаного ґрунту ε зменшується згідно експоненціальної залежності. Причому експериментальні точки, які отримані при різних значеннях частоти коливань (від 20 до 42 Гц) достатньо точно описуються однією кривою.

Як відомо з робіт (Веріго, & Коган, 1986; Вознесенский, 1997; Кудрявцев, 1999), частоти коливань, що виникають під час руху залізничного транспорту, в тому числі і метропозду, знаходяться в межах 25...50 Гц, що обумовлено власними коливаннями колій, період яких в непересорених масах на пружній колії не перевищує вказаних величин. Крім того, перевантаження колії за рахунок сил інерції непересорених мас повинно складати 0,1...0,2 МПа, що суттєво менше діючих на теперішній час в правилах розрахунку колії на міцність максимальних динамічних величин, які складають 0,5 та 0,325 МПа для локомотивів та вагонів відповідно.

Досягнення на практиці таких незначних величин динамічних напружень при вібрації в тунелях Київського метрополітену неможливе у зв'язку з підвищеними деформаціями слабких водонасичених ґрунтів і, відповідно, колії та

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

тунельної оправи (Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. І., 2017).

Умови розрідження водонасичених піщаних ґрунтів при вібрації докладно розглядалися (Алешин, & Кудрявцев, 1991; Вознесенский, 1997; Кудрявцев, 1999). Як було встановлено (Кудрявцев, 1999), більш всього розріджуються водонасичені мілкі та пилюваті піски, що мають пухку будову. При цьому виникнення розрідження обумовлено наявністю в ґрунтовій товщі знакозмінних напружень.

Як було відмічено, під час руху метропоїздів по лінії, що розглядається, створювалися коливання низької частоти, що відрізняються від гармонійних. При цьому завжди виникає розрідження ґрунтів.

З врахуванням високого рівня слабких ґрунтів навколо тунелю на ділянці 500 м та високої їх водонасиченості виникла ситуація зміни фізико-механічних властивостей і створення умов для розвитку віброповзучості при відрізок-компресії (Алешин, & Кудрявцев, 1991; Кудрявцев, 1999). Це призвело до небезпечного деформування оправи тунелю, що спричинило зниження швидкостей потягів метрополітену на згаданій ділянці тунелю.

На вказаному інтервалі тунелю виконувався комплекс геофізичних вишукувань з метою вивчення гідрогеологічного стану ґрунтів, виявлення зон підвищеної фільтрації ґрунтових вод та ділянок можливого утворення суфозійного розущільнення ґрунту. При проведенні науково-виробничим підприємством «ГЕОПРОМ» геофізичних досліджень на ділянці перегону «Осокорки» – «Позняки» довжиною 180 м отримані наступні результати:

- 1) по осі тунелю встановлені зони підвищеної фільтрації ґрунтових вод;
- 2) встановлено, що основні витoki води в тунель розташовані в зонах підвищеної фільтрації;
- 3) побудовані вертикальні розрізи фільтраційних зон;
- 4) виділені траси суфозійно-міграційних потоків, вздовж яких ймовірно формування водяних міграційних каналів і окремих ліній;
- 5) уточнений гідрогеологічний стан зони закріплення ґрунтів з максимальною можливістю виникнення явища віброповзучості.

На основі аналізу отриманих даних було прийнято рішення закріплення ґрунтів і сформульовані наступні рекомендації:

1) при проведенні робіт із закріплення ґрунтів на ділянках підвищеної фільтрації застосовувати суміші на основі швидкотверднучого цементу;

2) глибина закріплення зон підвищеної фільтрації не повинна перевищувати 12,0...12,5 м від рівня денної поверхні;

3) закріплення ґрунтів вздовж обох тунелів проводити одночасно, не допускаючи значного випередження лівого над правим і навпаки.

На багатьох об'єктах підприємством «Київметробуд» в значних обсягах реалізовані способи укріплення ґрунтових масивів із найскладнішими фізико-механічними властивостями. Причому хімічні способи стабілізації слабких ґрунтів можуть бути впроваджені шляхом улаштування суцільних масивів або окремих колон з ґрунту та в'язучих, що протистоять боковому тиску ґрунтового масиву на підпирні стінки та оправу тунелів, а також можуть слугувати протифільтраційними завісами. Перевага таких методів полягає в економії в'язучих та наповнювача, оскільки ґрунт не видаляється, а тільки змішується з в'язучими.

Порядок ін'єктування водонасичених ґрунтів полягає в наступному. Буріння ін'єкційних свердловин поряд з тунелем здійснюється на відстані 0,5 м по трасі лінії в три черги із додатковим розміщенням в четверту чергу контрольних свердловин. Всі свердловини буряться колонковими свердлами діаметром 93 мм буровим верстатом УКБ-500С з розміщенням обсадної труби (кондуктора) діаметром 89 мм, яка виймається при піднятті ін'єктору.

Відстань між свердловинами в ряду складає 2,0 м, а глибина – 15,0 м. Ін'єкційні та контрольні свердловини проходяться через раніше виконаний укріплений силікатно-цементним розчином шар під лотком потужністю до 1,0 м. В процесі буріння визначаються зони фільтраційних вікон, через які без належного їх перекриття можуть відбуватися небезпечні суфозійні процеси з виносом ґрунту в нижніх шарах. Попередження цих явищ виконується шляхом буріння кінців свердловин та їх закріплення нагнітанням спеціальним розчином (рис. 1).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В подальшому з відставанням в кілька десятків метрів виконується другий етап хімічного закріплення ґрунтів ін'єкційними свердловинами глибиною 15 м з нагнітанням розчину в нижній їх частині, довжина якої досягає 7,4 м, а діаметр – 1,0...1,4 м (рис. 2). Основними факторами, що враховуються при хімічному закріпленні, є вибір рецептури розчину на основі

характеристик ґрунтів із мінімальною пористістю, вологості та літологічного складу: маловологий ґрунт повинно закріплювати цементно-сілікатними розчинами з додатково диспергованим цементом, а водонасичений – на основі дворозчинної силікатизації з додаванням хлористого кальцію.

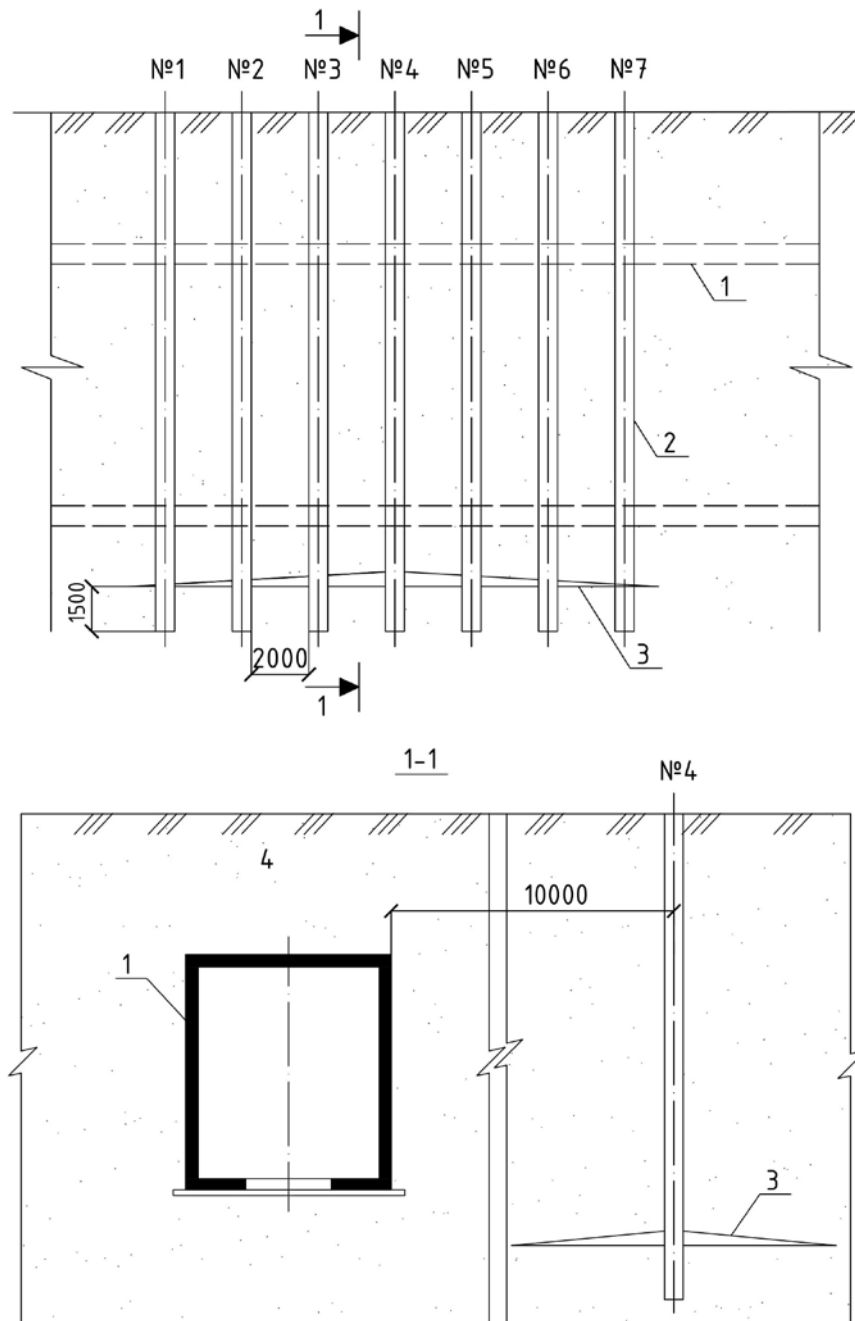


Рис. 1. Схема укріплення ґрунту в місцях знаходження «лінз» під тунелями:

1 – контур конструкції перегінного тунелю; 2 – свердловини;
3 – зони підвищеної фільтрації («лінзи»); 4 – ґрунтовий масив

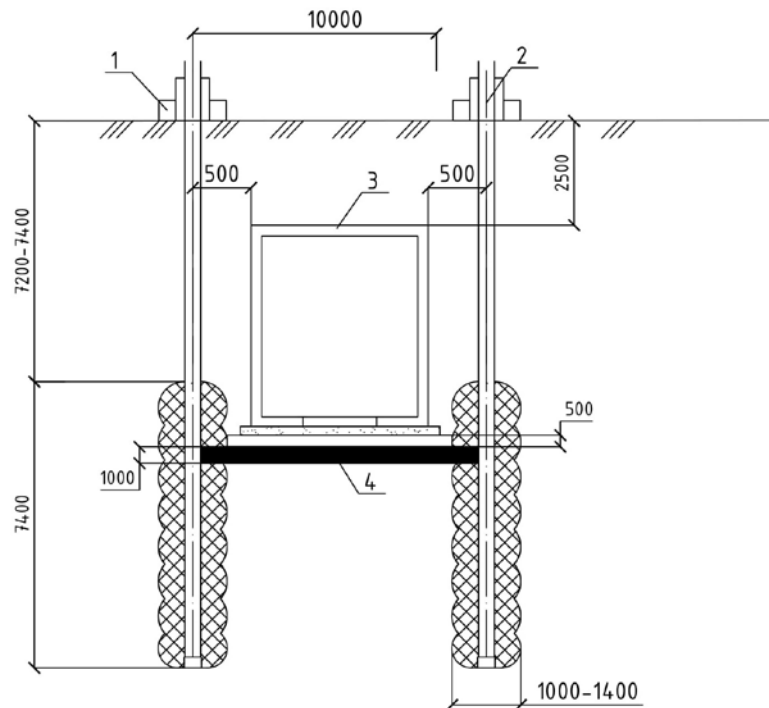


Рис. 2. Схема хімічного закріплення ґрунтів:

1 – буровий верстат УКБ-500С; 2 – ін'єктор Ø42 мм; 3 – оправа тунелю;
4 – закріплений шар ґрунту під лотком; 5 – закріплені зони з боків тунелю

Контроль суцільності та однорідності закріпленого масиву здійснюється по завершенні ін'єкційних робіт шляхом буріння контрольних свердловин, в ході якого виконується опис кернів, що витягаються із закріпленого ґрунту через кожний метр і візуально оцінюються.

Наукова новизна та практична значимість

На основі виконаних аналітичних досліджень отримана залежність пористості слабких водонасичених ґрунтів від відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння при визначених частотах коливань колії, обумовлених рухом поїздів метрополітену, а також визначені параметри укріплення (сілікатизація та цементация) ґрунтів з боків та під лотком оправи перегінних тунелів.

Застосування геофізичних методів (створення короткоімпульсного поля, вертикального електрорезонансного та георадарного видів зондування) визначення слабких місць в ґрунтовому масиві дозволило виконати їх укріплення в діючих тунелях метрополітену мілкового закладення та знизити ризик їх небезпечної експлуатації.

Висновки

На основі виконаних за участю науково-виробничого підприємства «ГЕОПРОМ» геофізичних досліджень та підвищення рівня закріплення слабких шаруватих та водонасичених ґрунтів по трасі Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену були рекомендовані методи укріплення, які характеризуються високим рівнем ефективності.

Геофізичні методи дозволили виконати картування зон підвищеної водонасиченості та фільтрації ґрунтів, побудувати вертикальні розрізи, провести пошук суфозійно-міграційних каналів і порожнин, підтвердивши високий рівень їх точності при обстеженні 500 метрів ґрунтових умов по трасі тунелю.

Після проведених геофізичних досліджень шаруватих та водонасичених ґрунтів було обґрунтовано технологію хімічного закріплення під лотком та з боків тунелів мілкового закладення цементно-сілікатними розчинами та на основі дворозчинної сілікатизації з додаванням хлористого кальцію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Petrenko, V. D., & Kovalevych, V. V. (2014). The Results of the Defect Places Investigation of Donetsk Railway Road Bed by Ground Penetrating Radar Complex. *Наука та прогрес транспорту*, 5 (53), 83-91.
- Qiu, Y., Dennis, N. D., & Elliott, R. P. (2000). Design Criteria for Permanent Deformation of Subgrade Soils in Flexible Pavements for Low-Volume Roads. *Soils and Foundations*, 40, 1, 1-10.
- Shibazaki, M. (2003). State of Practice of Jet Grouting. *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, 1, 198-217.
- Алешин, А. С., & Кудрявцев, И. А. (1991). О влиянии динамических воздействий на виброкомпрессию несвязных грунтов. *Инженерная геология*, 4, 38-41.
- Битюков, Ю. С., Зорина, С. С., Майминас, Е. З., и др. (1971). *Математика и кибернетика в экономике. Словарь-справочник*. Москва: Экономика.
- Вериги, М. Ф., & Коган, А. Я. (1986). *Взаимодействие пути и подвижного состава*. Москва: Транспорт.
- Вознесенский, Е. А. (1997). *Поведение грунтов при динамических нагрузках*. Москва: Изд-во МГУ.
- Гришко, Д. А., Шуплик, М. Н., & Куликова, Е. Ю. (2011). Перспективы применения струйной цементации в городском подземном строительстве с целью снижения экологических рисков. *Научный вестник Московского государственного горного университета*, 9, 16-22.
- Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., Ларцева, И. И., Шокарев, В. С., & Крисан, В. И. (2011). Характеристики штучных твердых грунтов, які поліпшені бурозмішувальним методом. *Світ геотехніки*, 3, 14-18.
- Кудрявцев, И. А. (1999). *Влияние вибрации на основания сооружений*. Гомель: БелГУТ.
- Малинин, А. Г. (2009). *Струйная цементация грунтов*. Москва: Стройиздат.
- Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, Г. К. (2011). Надежность способов закрепления грунтов при эксплуатации перегонных тоннелей Киевского метрополитена. *Вісник ДНУЗТу імені академіка В. Лазаряна*, 35, 135-139.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Кулаженко, Є. Ю., & Петренко, В. І. (2017). Моніторинг деформацій оправи Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену та заходи щодо їх зменшення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 11, 42-51.
- Петренко, В. И., & Петренко, В. Д. (2014). Обоснование параметров химического закрепления грунтов при строительстве Киевского метрополитена. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 60-66.
- Цытович, Н. А. (1983). *Механика грунтов (краткий курс)*. Москва: Высшая школа.
- Черняков, А. В. (2011). Струйная цементация грунтов при строительстве в условиях плотной городской застройки. *Наука и техника в дорожной отрасли*, 3, 62-66.

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Д. О. БАННИКОВ^{2*}, Н. И. НЕТЕСА³

¹ Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

^{2*} Кафедра «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

³ Кафедра «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, эл. почта andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И УКРЕПЛЕНИЕ СЛОИСТОГО И ВОДОНАСЫЩЕННОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ КИЕВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Цель. Актуальным вопросом для тоннелей метрополитена мелкого заложения в сложных инженерно-геологических условиях является определение физико-механических свойств грунтов не только при инженерных изысканиях, но и при их изучении с использованием геофизических методов исследования грунтовых условий. Кроме того, важным является выбор способов улучшения свойств грунтов путем укрепления, особенно в зонах снижения их прочностных характеристик. Это обеспечивает эффективную эксплуатацию тоннелей с исключением опасных явлений типа виброползучести грунтов и деформаций пути и обделок.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Методика. Используя существующие положения о геофизических исследованиях, с целью определения слабых мест слоистого и водонасыщенного массива и обоснования способов его укрепления, разработаны основы комплексного исследования и производственной реализации для повышения уровня безопасной работы тоннелей метрополитена. **Результаты.** Выполнены геофизические исследования по выявлению слабых мест в грунтовой толще по трассе перегонных тоннелей Сырецко-Печерской линии Киевского метрополитена (левый берег Днепра) и установлено, что в современных условиях для усиления слабых водонасыщенных и слоистых грунтов необходимо использовать способы перемешивания грунтов с вяжущими веществами, которые инъецируются под давлением. **Научная новизна.** На основе выполненных аналитических исследований получена зависимость пористости слабых водонасыщенных грунтов от отношения ускорения колебаний к ускорению силы тяжести при определенных частотах колебаний пути, обусловленных движением поездов метрополитена, а также определены параметры укрепления грунтов по бокам и под лотком обделки перегонных тоннелей. **Практическая значимость.** Применение геофизических методов определения слабых мест в грунтовой толще позволило выполнить их укрепление в действующих тоннелях метрополитена мелкого заложения и снизить риск их опасной эксплуатации.

Ключевые слова: физико-механические свойства; слоистый и водонасыщенный массив; тоннели метрополитена; мелкое заложение; геофизические методы; химическое закрепление

V. D. PETRENKO¹, D. O. BANNIKOV^{2*}, M. I. NETESA³

¹ Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

^{2*} Department «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

³ Department «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 195 50 27, e-mail andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

GEOPHYSICAL STUDIES AND STRENGTHENING A LAYERED AND WATER-SATURATED SOIL MASS IN THE KYIV METRO CONDITIONS

Purpose. An urgent issue for shallow underground tunnels in difficult engineering and geological conditions is the determination of the physical and mechanical properties of soils not only during engineering surveys, but also when they are studied using geophysical methods for studying ground conditions. In addition, it is important to choose ways to improve the properties of soils by strengthening, especially in areas where their strength characteristics are reduced. This ensures the efficient operation of tunnels with the elimination of hazardous phenomena such as vibration creep of soils and deformations of the track and lining. **Methodology.** Using the existing provisions on geophysical research, in order to identify the weaknesses of the layered and water-saturated massif and justify ways to strengthen it, the basics of a comprehensive study and production implementation have been developed to increase the level of safe operation of metro tunnels. **Findings.** Geophysical studies were carried out to identify weaknesses in the soil stratum along the route of the running tunnels of the Syretsko-Pechersk line of the Kyiv metro (the left bank of the Dnipro) and it was established that in present conditions, to strengthen weak water-saturated and layered soils, it is necessary to use methods of mixing soils with binders that are injected under pressure. **Originality.** Based on the performed analytical studies, the dependence of the porosity of weak water-saturated soils on the ratio of the acceleration of vibrations to the acceleration of gravity at certain frequencies of the path vibration caused by the movement of metro trains was obtained, and the parameters of soil strengthening on the sides and the bottom of the rim of the running tunnels were determined. **Practical value.** The use of geophysical methods for determining weak spots in the soil massif allowed them to be strengthened in the existing shallow underground tunnels and reduce the risk of their dangerous operation.

Keywords: physical and mechanical properties; layered and water-saturated massif; metro tunnels; shallow laying; geophysical methods; chemical stabilization

REFERENCES

- Petrenko, V. D., & Kovalevych, V. V. (2014). The Results of the Defect Places Investigation of Donetsk Railway Road Bed by Ground Penetrating Radar Complex. *Nauka ta proghres transportu*, 5 (53), 83-91. (in English)
- Qiu, Y., Dennis, N. D., & Elliott, R. P. (2000). Design Criteria for Permanent Deformation of Subgrade Soils in Flexible Pavements for Low-Volume Roads. *Soils and Foundations*, 40, 1, 1-10. (in English)
- Shibazaki, M. (2003). State of Practice of Jet Grouting. *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, 1, 198-217. (in English)
- Aleshin, A. S., & Kudrjavcev, I. A. (1991). O vlijanii dinamicheskikh vozdeystviy na vibrokompressiju nesvjaznykh gruntov. *Inzhenernaja geologija*, 4, 38-41. (in Russian)
- Bitjukov, Ju. S., Zorina, S. S., Majminas, E. Z., i dr. (1971). *Matematika i kibernetika v jekonomike. Slovar'-spravochnik*. Moskva: Jekonomika. (in Russian)
- Verigo, M. F., & Kogan, A. Ja. (1986). *Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Voznesenskij, E. A. (1997). *Povedenie gruntov pri dinamicheskikh nagruzkah*. Moskva: Izd-vo MGU. (in Russian)
- Grishko, D. A., Shuplik, M. N., & Kulikova, E. Ju. (2011). Perspektivy primeneniya strujnoj cementacii v gorodskom podzemnom stroitel'stve s cel'ju snizhenija jekologicheskikh riskov. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 9, 16-22. (in Russian)
- Zocenko, M. L., Vynnykov, Ju. L., Larceva, I. I., Shokarev, B. C., & Krysan, V. I. (2011). Kharakterystyky shtuchnykh tverdykh gruntiv, jaki polipsheni burozmishuval'nym metodom. *Svit gheotekhniki*, 3, 14-18. (in Ukrainian)
- Kudrjavcev, I. A. (1999). *Vlijanie vibracii na osnovanija sooruzhenij*. Gomel': BelGUT. (in Russian)
- Malinin, A. G. (2009). *Strujnaja cementacija gruntov*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Petrenko, V. I., & Savinkov, G. K. (2011). Nadezhnost' sposobov zakreplenija gruntov pri jekspluatacii peregonnykh tonnelej Kievskogo metropolitena. *Visnik DNUZTu imeni akademika V. Lazarjana*, 35, 135-139. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tjutjkin, O. L., Kulazhenko, Je. Ju., & Petrenko, V. I. (2017). Monitoryng deformacij opravy Syrecjko-Pechersjkoji liniji Kyjivsjkogho metropolitenu ta zakhody shhodo jikh zmenshennja. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 11, 42-51. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. I., & Petrenko, V. D. (2014). Obosnovanie parametrov himicheskogo zakreplenija gruntov pri stroitel'stve Kievskogo metropolitena. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 4, 60-66. (in Russian)
- Cytovich, N. A. (1983). *Mehanika gruntov (kratkij kurs)*. Moskva: Vysshaja shkola. (in Russian)
- Chernjakov, A. B. (2011). Strujnaja cementacija gruntov pri stroitel'stve v uslovijah plotnoj gorodskoj zastrojki. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli*, 3, 62-66. (in Russian)

Надійшла до редколегії 09.05.2020.

Прийнята до друку 30.05.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 629.4.049.32/7:691.1

А. В. РАДКЕВИЧ^{1*}, П. П. БИЧЕВИЙ², К. М. МІШУК³

^{1*}Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(095) 889 34 80, ел. пошта anatoij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

²Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38(066) 564 31 72, ел. пошта ppbichuvoy@gmail.com, ORCID 0000-0002-9849-2810

³Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38(066) 582 34 26, ел. пошта mishukivk@gmail.com, ORCID 0000-0001-5480-6032

ВИЗНАЧЕННЯ КОНКУРЕНТОЗДАТНОГО НАПРЯМКУ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ПРИДАТНОСТІ М'ЯКИХ ПОКРІВЕЛЬ

Мета. Переорієнтація покрівельних робіт з нового будівництва в ремонтну сферу без суттєвої трансформації загальноприйнятих технологічних вирішень та відсутність в достатньому обсязі засобів механізації зумовили необхідність радикального вдосконалення комплексу заходів ремонту багат шарових покрівель. **Методика.** Послідовність зміни технічного стану руберойдних покрівель, яка змінюється від нормального без пошкоджень до аварійного з проміжними задовільним і непридатним до нормальної експлуатації в залежності від питомої пошкодження і протікання покрівлі впливає на визначення загальноприйнятих матеріальних ресурсів, засобів та способів улаштування та способів улаштування і відновлення м'яких покрівель, а також механізму і кінетики втрати експлуатаційної придатності являються ключовим чинником вдосконалення усієї сукупності заходів, спрямованих надати конкурентопридатності технологіям. **Результати.** Технології ремонту точкових і локальних ушкоджень у вигляді тріщин, розривів, відшарувань, які виконуються розрізанням і подальшим наклеюванням шматків полотнищ на підготовлені ділянки з шпатлюванням, дозволяють отримати короткочасні результати. Усунення суцільних поверхневих ушкоджень нанесенням додаткового шару рулонного або мастичного матеріалу пов'язано з неминучим збереженням в нижчих шарах причин передчасної втрати експлуатаційних функцій покриттям. Результати надають можливість виконувати бездемонтажні ремонтно-відновлювальні роботи з використанням цілеспрямовано запропонованої ремонтної композиції з мінімально можливими витратами ресурсів та високим ступенем механізації. Розроблена технологія базується на здатності використовуваної ремонтної композиції просочувати і насичувати прилеглі поверхні інгредієнтами, здатні усунути пошкодження певного виду і повернути покрівлю або захисному шару початковий гідроізолюючий потенціал і посилити його. **Наукова новизна.** Обґрунтування можливостей використання залишкового гідроізолюючого ресурсу існуючої м'якої покрівлі його насиченням інгредієнтами запропонованої ремонтної композиції. **Практична значимість.** Надається можливість ефективно використовувати, відновлювати і підсилювати залишковий гідроізолюючий потенціал бітумно-руберойдної покрівлі пневморозпиленням ремонтної композиції розробленого складу.

Ключові слова: м'яка покрівля; залишковий гідроізолюючий ресурс; ремонт; відновлення; технологія, проникання; насичення; рулонні і мастичні матеріали

Вступ

Відновлювальні роботи експлуатованих м'яких покрівель по сукупності затруднень перевищують влаштування нових і, в цілому, відносяться до однієї з найбільш складних різновидів, що зумовлено їхньою залежністю від багатьох факторів впливу, що, в основному, представлені нижче:

– виду дефектів і пошкоджень, їхньою часткою в загальному обсязі покрівельного покриття (Лукинський, 1993; Габрусенко, 2002; Літвін-

ський, Васильковський, & Друкований, 2008);

– наявності та ступеню придатності усіх виробничих процесів до ефективного використання відповідних технологій виконання;

– відсутність технічних ресурсів і технологічного оснащення, придатних для здійснення потрібних операцій з мінімальними витратами ресурсів (Радкевич, & Арутюнян, 2014);

– наявності у виконавців недостатнього рівня кваліфікації, індивідуальних навичок і професійної підготовленості;

- масштабність робіт;
- ринок сучасних покрівельних матеріалів не забезпечено потрібною номенклатурою і якістю стосовно ремонтного призначення (Лукинский, 2004);
- можливості перенесення виконання частини виробничих процесів в заводські умови і заміни ручних операцій на механізовані;
- часткова наявність нормативних документів, які б регламентували технологічні процеси ремонтних робіт (ДСТУ-НБВ.1.2-18:2016, 2017);
- відсутність ефективних методів підготовки поверхні покрівлі під ремонтні покриття (Павлюк, 2005);
- необхідність виконання більшості процесів ручним способом через відсутність відповідних засобів механізації;
- незабезпеченість методами і засобами контролю.

За результатами аналізу деяких джерел (Гитлина, 1980; Беляев, 2001; Габрусенко, 2002; Лукинский, 2004; Цветков, & Дегтяренко, 2004; Александров, 2006) названо фактори, зумовлені технічним станом покрівлі, який в більшості випадків характеризується наявністю таких дефектів і пошкоджень:

- зволоженість складових покриття, в тому числі стяжки і утеплювача. Під час низьких температур замерзаюча вода розширюється і призводить до утворення тріщин стяжки, розривів та відшарування килиму. При нагріванні утворюється водяна пара, що за рахунок надлишкового тиску також призводить до відшарування та здуття.

Утворені дефекти і пошкодження мають наслідком втрату бітумно-руберойдним килимом гідроізолюючої здатності, просочення і насичення його вологою та послідовне протікання. Зволоженість поверхні викликає значні труднощі в разі виконання ремонтних робіт. Наклеювання рулонного матеріалу або нанесення додаткового шару мастики для забезпечення водонепроникності призводить до збереження вологи в нижніх шарах. Тому знову зберігається головна причина розривів, розтріскувань, здуттів, відшарувань і прискореної втрати придатності;

- відсутність захисного бітумно-гравійного шару, що пов'язано, в основному, з порушеннями технології робіт. Має місце заміна захисного шару промазуванням стикових швів ру-

лонних матеріалів бітумом замість потрібної бітумної мастики. Не витримується необхідна товщина захисного шару, гравій часто замінюють піском. Зерна гравію або піску недостатньо втоплені в бітум. Тому під дією вітру і води та її фазових перетворень захисний шар відшаровується і видаляється;

- має місце зношеність покривного шару руберойду і оголення його картонної основи. Серед головних причин таких дефектів слід виділити відсутність захисного бітумно-гравійного шару або несвоєчасне покриття поверхні килиму бітумними мастиками. Такий стан руберойду призводить до втрати гідроізолюючої здатності і проникання води крізь килим до стяжки і утеплювача;

– наявність розшарувань і здуттів килиму та його відшарувань від стяжки. Такі явища пов'язані з водонасиченням складових покриття і фазовими переходами вологи в твердий і пароподібний стани, що супроводжується до поступового збільшення обсягів пошкодження;

- тріщини і розриви верхнього шару руберойду або всієї товщі килиму, що можна віднести на рахунок дії вологи при її фазових переходах;

– відриви килиму в місцях примикання до вертикальних поверхонь в разі відсутності механічного кріплення. При зволоженні поверхні значно послаблюється адгезія контактованих поверхонь з її негативними наслідками;

- нерівності поверхні, що перевищують нормативні допуски.

Мета

Переорієнтація покрівельних робіт з нового будівництва в ремонтну сферу без суттєвої трансформації загальноприйнятих технологічних вирішень та відсутність, в першу чергу, засобів механізації для ремонтних потреб зумовили і необхідність радикального вирішення усього комплексу проблем.

Методика

Узагальнюючі чинники вибору раціональних організаційно-технологічних рішень можуть базуватися на відомій класифікації технічного стану м'яких покрівель (Левінський, & Євтушенко, 2013). Як показано, в залежності від особливостей дефектів, пошкоджень та їхнього обсягу на одиницю поверхні стан покрів-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

лі змінюється від нормальної до непридатної для нормальної експлуатації, а потім до аварійної.

Наведена послідовність зміни технічного стану чітко вказує на поступове фізичне зношування, і одноразово – на зворотну величину наявності залишкового гідроізолюючого ресурсу на кожному етапі. Звідси впливає завдання знайти заходи використання такого ресурсу в сукупності з його відновленням та максимально можливим підсиленням рівня експлуатаційних вимог.

Результати

Наведені вище характеристики технічного стану поверхні покритті стосуються як до первісного, так і посиленого при подальших ремонтах, що зумовлює суттєві відмінності від улаштування нового бітумно-руберойдового килиму. Деталізований аналіз та оцінювання надають можливість вибору напрямків вдосконалення.

На рис. 1 представлена структурна схема систематизованих пошкоджень та ремонтних способів, які на даний час мали місце в практиці покрівельних робіт.

Як видно, усі технології в кінцевому підсумку зводяться до нанесення додаткового шару з використанням рулонних, мастичних або бітумно-емульсійних матеріалів після відповідної підготовки поверхні.

Крім показників довговічності та надійності ремонтних технологій до пріоритетних належать витрати ресурсів, в першу чергу, трудових.

Щодо оціночних критеріїв перелічених технологій показовою може бути оцінка наявної ситуації в покрівельній області в умовах нового будівництва, яка викладена О. М. Левінським та В. А. Євтушенко (2013). За їхніми даними, доля ручних робіт при цьому доходить до 80 %. Якщо врахувати, що стан ремонтної поверхні відрізняється від нової насиченістю різних видів і обсягів пошкоджень та дефектів, для усунення яких перед виконанням відновлювальних робіт взагалі відсутні засоби механізації, то ремонтні роботи в цілому переходять в ранг трудоемних, затратних, непривабливих та проблемних.

Необхідно також враховувати масштабність ремонтних робіт, про що може свідчити практика деяких держав пострадянського періоду. Статистичні дані (Левінський, & Євтушенко,

2013), які певною мірою можуть бути дійсні і для України, показують, що питома вага ремонтних покрівельних робіт по відношенню до улаштування нових становить 90 %, або у співвідношенні 9:1.

При виборі технологічних рішень ремонту доцільно враховувати дію комплексу факторів впливу, які зумовлені недостатньою надійністю і довговічністю матеріалів м'якого килиму і диктують необхідність передбачити заходи щодо їхнього усунення.

Для попередження прискореного процесу «старіння» і руйнування покрівельного м'якого килиму розроблені ефективні технології на основі застосування модифікованих бітумних матеріалів з добавками полімерів або каучуків, які здатні забезпечити довготривалі пружно-пластичні властивості і, відповідно, довговічність.

Реалізація поставленого завдання потребує відповідного ремонтного композиційного матеріалу мастичного типу, наділеного комплексом функцій. По-перше, необхідно наситити залишкові матеріали, які формують покрівельні шари руберойду або захисні шари м'якого килиму, втраченими інгредієнтами. По-друге, повинна бути здатність впроваджувати усі компоненти в товщу м'якої покритті за рахунок наявності компонента з максимально можливою проникаючою спроможністю. Важливими також являються функції підсилення довговічності, деформативності, гідрофобності завдяки наявності в складі ремонтної композиції відповідних модифікуючих добавок.

У відповідності до сформульованого функціонального забезпечення експериментальні і теоретичні дослідження дозволили розкрити закономірності взаємозв'язків та знайти області раціонального вмісту складових ремонтної композиції. Встановлено, що композиції такого складу включають уайт-спірит, дизельне мастило, нафтобітум і каучук у співвідношенні 12:1:6:0,5 мас. од. відповідно для першого насичуючого шару та 12:0,5:6:0,4 з додаванням 0,1 мас. од. ГКЖ – для другого, так званого бронюючого шару. На основі отриманих результатів оцінювання ефективності ремонтних композицій запропоновано конкурентоздатну організаційно-технологічну модель відновлення гідроізолюючої здатності м'якого покрівельного килиму (рис. 2).

© А. В. Радкевич, П. П. Бичевий, К. М. Мішук, 2020

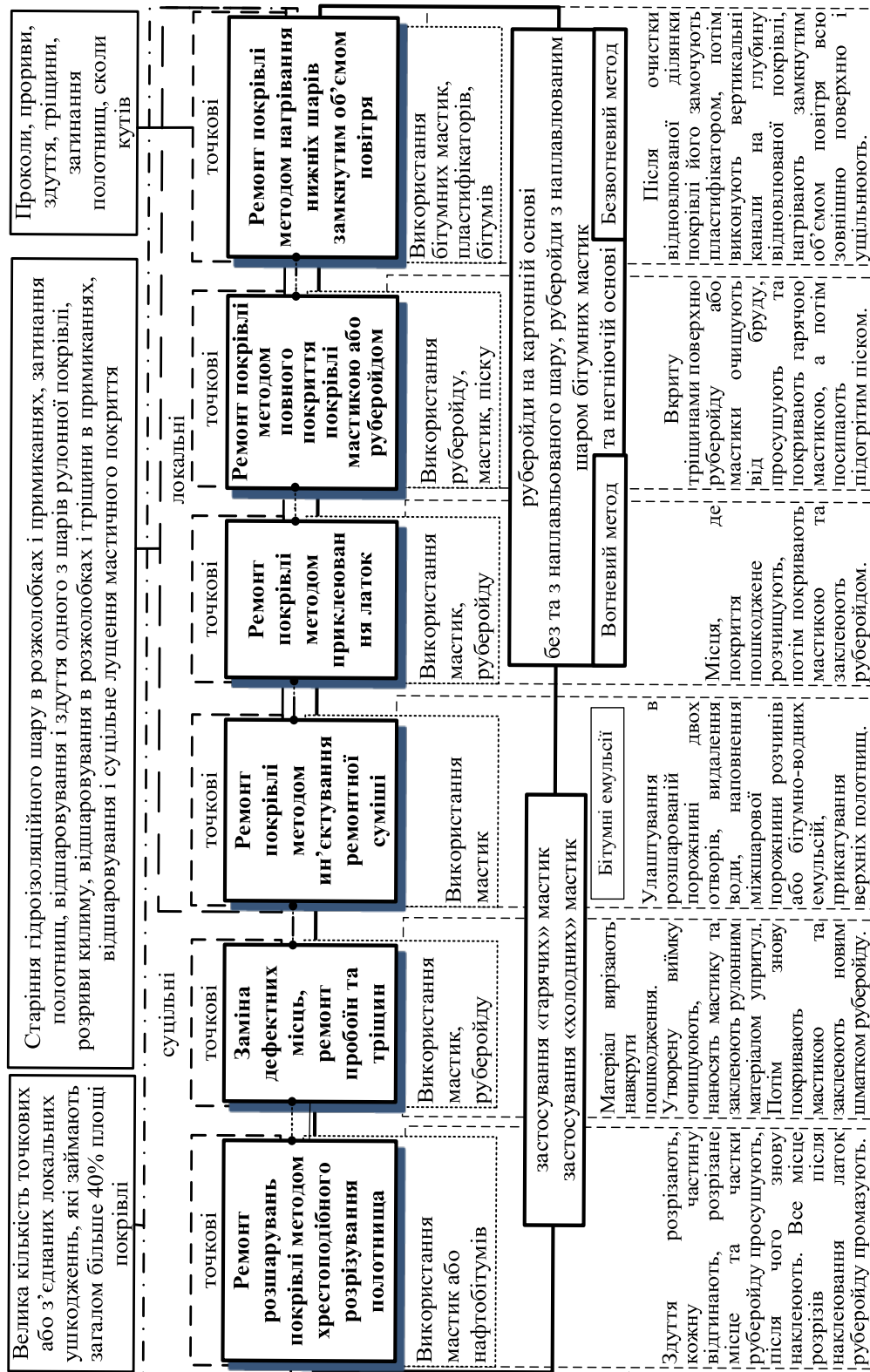


Рис. 1. Структурна схема пошкоджень та відомих засобів відновлення експлуатаційної придатності м'яких покривів

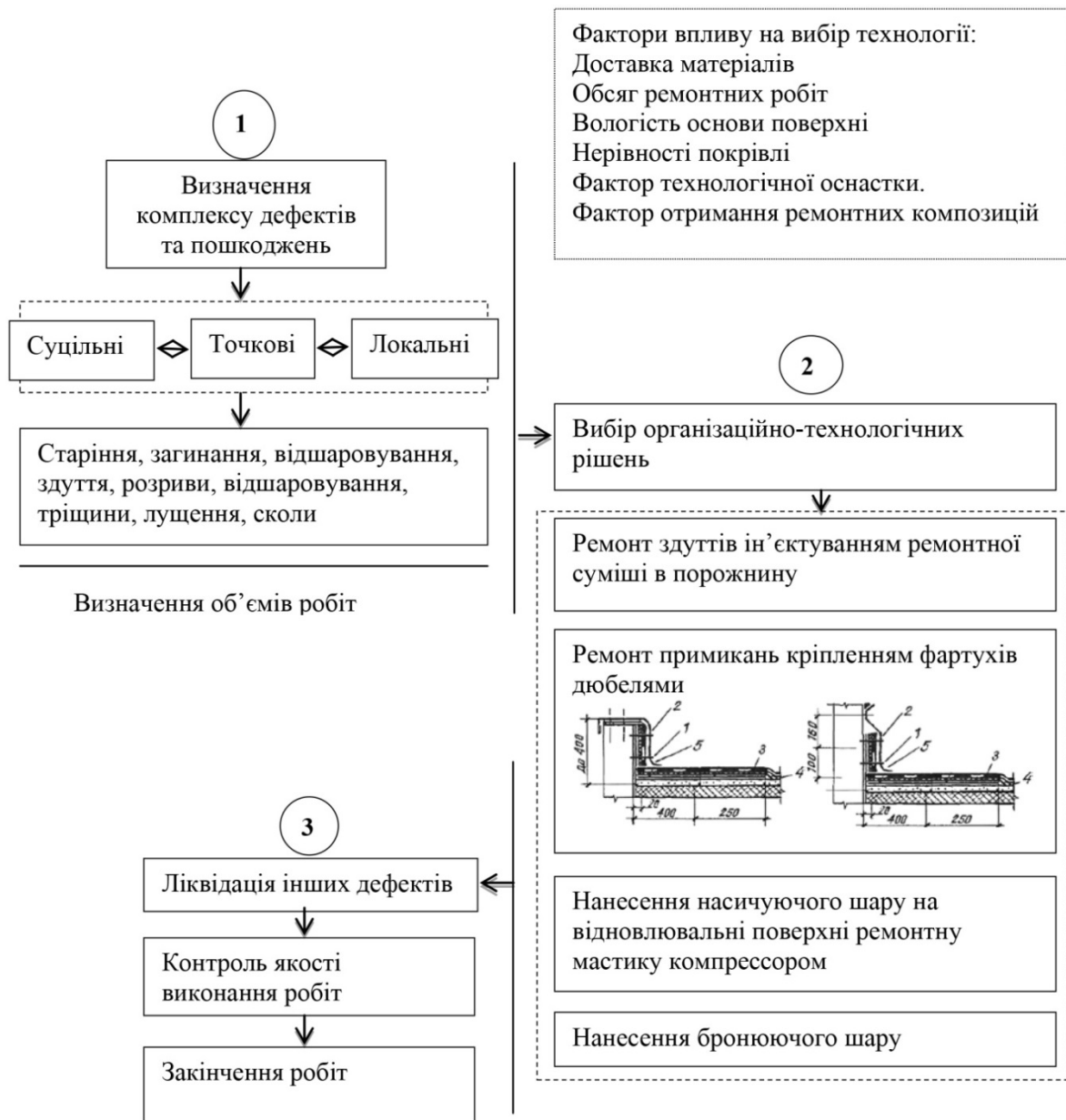


Рис. 2. Схема визначення впливу вибору організаційно-технологічних параметрів ремонту покриттів

Технологія передбачає бездемонтажний спосіб і орієнтована на використання та підсилення залишкового гідроізолюючого ресурсу верхнього шару покриття до рівня, який перевищує початковий.

Реалізація зводиться до простого нанесення пневморозпилюванням або безповітряним способом ремонтних композицій, застосування яких базується на здатності проникати в товщу поверхневого шару, насичувати його втрачени-

ми інгредієнтами та додатковими модифікуючими добавками.

Наукова новизна та практична значимість

Традиційні ремонтно-відновлювальні технології базуються на принципах попереднього усунення руйнувань з подальшим нанесенням додаткового шару рулонного або мастичного матеріалу на окремі ділянки або на суцільну поверхню м'яких покриттів. Визначено, що

прийнятті технології не виключають ймовірності збереження міжшарових дефектів і пошкоджень, в тому числі зволоженості, не враховують можливість використання залишкового гідроізолюючого ресурсу існуючого покриття.

Висновки

Запропоновані ремонтні композиції мастичного типу дозволили знайти конкурентоздатні технології відновлення експлуатаційних функцій бітумно-руберойдного килиму за рахунок запровадження інноваційних технологічних заходів, які спроможні наростити функціональну ефективність залишкового гідроізолюючого ресурсу покривного або захисного шару завдяки їхньому насиченню модифікуючими інгредієнтами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Александров, А. А. (2006). Обострилась кровельная проблема. *Кровельные и изоляционные материалы*, 4, 67-68.
- Беляев, А. (2001). *Ремонт кровель*. Москва: НТС «Стройинформ».
- Габрусенко, В. В. (2002). Некоторые « типовые » дефекты кровель. *Кровля и изоляция*, 2-3, 21-27.

Гитлина, А. С. (1980). *Эксплуатация и ремонт крыши и кровель*. Ленинград: Стройиздат.

ДСТУ-НБВ.1.2-18:2016 (2017). *Покрівлі та гідроізоляція*. Київ: ДН УкрНДНЦ.

Левінський, О. М., & Євтушенко, В. А. (2013). Дослідження стану оснащення організацій і бригад покрівельників та використання засобів малої механізації. *Містобудування та територіальне планування*, 47, 381-386.

Літвінський, О. М., Васильковський, О. А., & Друкований, М. Ф. (2008). *Покрівельні роботи: Навчальний посібник*. Київ: «МП «Леся».

Лукинский, О. Л. (1993). Почему протекает кровля. *Жилищное и коммунальное хозяйство*, 7, 20-25.

Лукинский, О. Л. (2004). Пора не латать, а эксплуатировать. *Жилищное и коммунальное хозяйство*, 6, 28-30.

Павлюк, П. О. (2005). Оцінка технічного стану суміщених дахів і підходи до нових конструктивно-технічних рішень. *Будівництво України*, 7, 26-27.

Радкевич, А. В., & Арутюнян, И. А. (2014). Організація системи матеріального забезпечення будівництва. *Наука та прогрес транспорту*, 3 (51), 146-159.

Цветков, Н. А., & Дегтяренко, А. В. (2004). Восстановление мягких кровель. *Жилищно-коммунальное хозяйство*, 6, 62-64.

А. В. РАДКЕВИЧ^{1*}, П. П. БИЧЕВОЙ², Е. Н. МИШУК³

^{1*}Кафедра строительного производства и геодезии, Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38(095) 889 34 80, эл. почта anatolij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

²Кафедра промышленного и гражданского строительства, Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38(066) 564 31 72, эл. почта pnbichuvoy@gmail.com, ORCID 0000-0002-9849-2810

³Кафедра промышленного и гражданского строительства, Запорожский национальный университет, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел.+38(066) 582 34 26, эл. почта mishukivk@gmail.com, ORCID 0000-0001-5480-6032

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ МЯГКИХ КРОВЕЛЬ

Цель. Переориентация кровельных работ по новому строительству в ремонтную сферу без существенной трансформации общепринятых технологических решений и отсутствие в достаточном объеме средств механизации обусловили необходимость радикального совершенствования комплекса мер ремонта многослойных кровель. **Методика.** Последовательность изменения технического состояния руберойдных кровель, которая меняется от нормального без повреждений к аварийному с промежуточными удовлетворительным и непригодным к нормальной эксплуатации в зависимости от удельного повреждения и протекания кровли влияет на определение общепринятых материальных ресурсов, средств и способов устройства и способов устройства и восстановления мягких кровель, а также механизма и кинетики потери эксплуатационной пригодности являются ключевым фактором совершенствования всей совокупности мероприятий, направленных предоставить конкурентопридатности технологиям. **Результаты.** Технологии ремонта точечных и локаль-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ных повреждений в виде трещин, разрывов, отслоений, которые выполняются разрезанием и последующим наклеиванием кусков полотнищ на подготовленные участки со шпаклевкой, позволяют получить кратковременные результаты. Устранение сплошных поверхностных повреждений нанесением дополнительного слоя рулонного или мастичного материала связано с неизбежным сохранением в низших слоях причин преждевременной потери эксплуатационных функций покрытием. Результаты дают возможность выполнять бездемонтажные ремонтно-восстановительные работы с использованием целенаправленно предложенной ремонтной композиции с минимально возможными затратами ресурсов и высокой степенью механизации. Разработанная технология базируется на способности используемой ремонтной композиции пропитывать и насыщать прилегающие поверхности ингредиентами, способны устранить повреждения определенного вида и вернуть покровным или защитным слоям начальный гидроизолирующий потенциал и усилить его. **Научная новизна.** Обоснование возможности использования остаточного гидроизолирующего ресурса существующей мягкой кровли его насыщением ингредиентами предложенной ремонтной композиции. **Практическая значимость.** Предоставляется возможность эффективно использовать, восстанавливать и усиливать остаточный гидроизолирующий потенциал битумно-рубероидного ковра пневмораспылением ремонтной композиции разработанного состава.

Ключевые слова: мягкая кровля; остаточный гидроизолирующий ресурс; ремонт; восстановление; технология; проникновение; насыщение; рулонные и мастичные материалы

A. V. RADKEVICH^{1*}, P. P. BICHEVOY², E. N. MISHUK³

^{1*} Department «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010tel. +38 (095) 889 34 80, e-mail anatolij.radkevich@gmail.com, ORCID 0000-0001-6325-8517

² Department «Building and Civil Building», Zaporizhzhya State Engineering Academy, Lenin Sq., 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006, tel. +38(066) 564 31 72, e-mail ppbichuvoy@gmail.com, ORCID 0000-0002-9849-2810

³ Department «Building and Civil Building», Zaporizhzhya State Engineering Academy, Lenin Sq., 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006, tel. +38(066) 582 34 26, e-mail mishukivk@gmail.com, ORCID 0000-0001-5480-6032

DETERMINATION OF THE COMPETITIVE DIRECTION OF RESTORATION OF OPERATIONAL SUITABILITY OF SOFT ROOFS

Purpose. The reorientation of roofing work from new construction to repair area without significant transformation of conventional technological solutions and the lack of sufficient mechanization have led to the need for a radical improvement of the multifaceted roof repair measures. **Methodology.** The sequence of change in the technical condition of roofing roofs, which changes from normal without damage to emergency with intermediate satisfactory and unusable for normal operation depending on the specific damage and the flow of the roof affects the determination of conventional material resources, tools and methods of reclamation roofs, as well as the mechanism and kinetics of the loss of serviceability are the key factors for improving the entire set of measures emit provide competitive technology. **Findings.** The technologies of repair of point and local damages in the form of cracks, breaks, exfoliations, which are performed by cutting and subsequent gluing of pieces of cloths on the prepared areas with putty, allow to obtain short-term results. The elimination of continuous surface damage by applying an additional layer of rolled or mastic material is associated with the inevitable preservation in the lower layers of the causes of premature loss of operational functions by the coating. The results provide an opportunity to perform dismantled repair and restoration work using a purposefully proposed repair composition with the lowest possible cost of resources and a high degree of mechanization. The technology developed is based on the ability of the repair composition used to impregnate and saturate adjacent surfaces with ingredients capable of eliminating damage to a particular species and returning the initial waterproofing potential to the coating or protective layers and enhancing it. **Originality.** Substantiation of the possibilities of using the residual waterproofing resource of the existing soft roof with its saturation with the ingredients of the proposed repair composition. **Practical value.** It is possible to effectively use, restore and enhance the residual waterproofing potential of the bitumen-roofing material by pneumatic spraying of the repair composition of the developed composition.

Keywords: soft roof; residual waterproofing resource; repair; restoration; technology; penetration; saturation; rolled and mastic materials

REFERENCES

- Aleksandrov, A. A. (2006). Obostrilas' krovel'naja problema. *Krovel'nye i izoljacionnye materialy*, 4, 67-68. (in Russian)
- Beljaev, A. (2001). *Remont krovel'*. Moskva: NTS «Strojinform». (in Russian)
- Gabrusenko, V. V. (2002). Nekotorye «tipovye» defekty krovel'. *Krovlja i izoljacija*, 2-3, 21-27. (in Russian)
- Gitlina, A. S. (1980). *Jekspluatacija i remont krysh i krovel'*. Leningrad: Strojizdat. (in Russian)
- DSTU-NBV.1.2-18:2016 (2017). *Pokrivli ta ghidroizoljacija*. Kyjiv: DN UkrNDNC. (in Ukrainian)
- Levinsjkyj, O. M., & Jevtushenko, V. A. (2013). Doslidzhennja stanu osnashhenosti orghanizacij i bryghad pokrivel'nykiv ta vykorystannja zasobiv maloji mekhanizaciji. *Mistobuduvannja ta terytorialjne planuvannja*, 47, 381-386. (in Ukrainian)
- Litvinsjkyj, O. M., Vasylykovsjkyj, O. A., & Drukovanij, M. F. (2008). *Pokriveljni roboty: Navchaljnyj posibnyk*. Kyjiv: «MP «Lesja». (in Ukrainian)
- Lukinskij, O. L. (1993). Pochemu protekaet krovlja. *Zhilishhnoe i kommunal'noe hozjajstvo*, 7, 20-25. (in Russian)
- Lukinskij, O. L. (2004). Pora ne latat', a jekspluatirovat'. *Zhilishhnoe i kommunal'noe hozjajstvo*, 6, 28-30. (in Russian)
- Pavljuk, P. O. (2005). Ocinka tekhnichnogho stanu sumishhenykh dakhiv i pidkhody do novykh konstruktyvno-tekhnichnykh rishenj. *Budivnyctvo Ukrajiny*, 7, 26-27. (in Ukrainian)
- Radkevych, A. V., & Arutjunjan, Y. A. (2014). Orghanizacija systemy materialjnogho zabezpechennja budivnyctva. *Nauka ta prohres transportu*, 3 (51), 146-159. (in Ukrainian)
- Cvetkov, N. A., & Degtjarenko, A. V. (2004). Vosstanovlenie mjagkih krovel'. *Zhilishhno-kommunal'noe hozjajstvo*, 6, 62-64. (in Russian)

Надійшла до редколегії 30.03.2020.

Прийнята до друку 24.04.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191:624.139.62-026.656

О. Л. ТЮТЬКІН¹, В. А. МІРОШНИК^{2*}

¹ Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{2*} Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, ел. пошта miroshnikvetal@gmail.com, ORCID 0000-0002-8115-0128

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПЕЦІАЛЬНИХ СПОСОБІВ ПІД ЧАС ПРОХОДКИ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВИРОБОК

Мета. Все частіше в умовах України будівництво тунелів і метрополітенів потребує спеціальних способів робіт, що дозволяють зменшити водонасиченість та збільшити стійкість ґрунтів та порід оточуючого масиву. Різноманіття способів, що застосовуються в підземному будівництві, потребує наукового обґрунтування, особливо коли спеціальні способи близькі за прямими та трудовитратами. Метою наукової статті є аналіз спеціальних способів проходки вертикальних виробок у складних інженерно-геологічних умовах для визначення області їх застосування. **Методика.** Існуючі технології закріплення водонасичених ґрунтів використовують без достатнього наукового обґрунтування, в деяких випадках без проведення техніко-економічного порівняння способів на стадії проєктування. Слід виокремити особливості, переваги та недоліки кожного з них та окреслити межі їх застосування. Для досягнення поставленої мети розглянуті і проаналізовані три спеціальні способи закріплення ґрунтів: «стіна в ґрунті», штучне заморожування ґрунтів та струминна цементация «jet-grouting». **Результати.** Визначені переваги та недоліки трьох способів закріплення ґрунтів та розрахована кошторисна вартість будівництва. Доведено, що єдиною технологією, що забезпечує безпечну проходку стовбурів в складних умовах під час проходки протяжних складних ділянок або у разі проходки дуже глибоких стовбурів, є технологія заморожування ґрунтів. А у тих випадках, коли потужність шарів слабких обводнених ґрунтів незначна, ефективнішою стає технологія струминної цементации ґрунтів «jet-grouting». Результати аналізу є підґрунтям для подальшого обґрунтування кожного зі способів з позиції напружено-деформованого стану загальної системи, що утворюється при спорудженні підземних об'єктів, зокрема вертикальних виробок для шахтних стовбурів. **Наукова новизна.** Проведений порівняльний аналіз трьох основних спеціальних способів спорудження вертикальних виробок надав змоги окреслити та науково обґрунтувати умови застосування кожного з них. **Практична значимість.** У програмному комплексі АВК-5 (3.5.1) було виконано розрахунок кошторисної вартості всіх трьох способів закріплення ґрунтів. За результатами розрахунку штучне замороження ґрунтів є найбільш економічно вигідним.

Ключові слова: вертикальна виробка; інженерно-геологічні умови; «стіна в ґрунті»; штучне заморожування ґрунтів; струминна цементация «jet-grouting»

Вступ

Спорудження тунелів і метрополітенів в слабких водонасичених ґрунтах представляє складну інженерну задачу, особливо в містах, забудованих великими житловими й промисловими будівлями, з наявністю інтенсивного руху міського транспорту і складного підземного комунального господарства (Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, 2005). У цих умовах проходка виробок в нестійких і водоносних ґрунтах тягне за собою просідання поверхні землі і, як наслідок, деформації будівель і порушення нормального життя міста.

Під час проходки підземних споруд метрополітенів (стовбури шахт, похилі ескалаторні тунелі, перегінні і станційні тунелі, котловани підземних вестибюлів, підземні камери) в складних несприятливих геологічних і гідрогеологічних умовах (в нестійких ґрунтах, при великому обводненні ґрунтовими водами, наявності пливунів тощо) широко застосовують спеціальні способи виконання робіт з метою закріплення ґрунтів і поліпшення їх властивостей.

В області закріплення ґрунтів розроблені два напрямки: закріплення ґрунтів у природному заляганні і закріплення їх в порушеному стані. За способами перетину водонасичених

© О. Л. Тютюкін, В. А. Мірошник, 2020

грунтів спеціальні способи проходки виробок можна поділити на групи (Дорман, 1981; Петренко, В. И., & Петренко, В. Д., 2014):

1) які не потребують будь-яких змін фізико-хімічних і механічних властивостей водонасичених ґрунтів (огорожі з буронабивних паль, «стіна в ґрунті») (Колесников, & Стрельникова, 1999; Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, 2005);

2) які знижують рухливість цих ґрунтів на певний період часу (штучне заморожування ґрунтів) (Andersland, & Ladanyi, 2003; Tiutkin, Petrenko, Petrosian, Miroshnyk, & Alkhdour, 2018; Дорман, 1971);

3) які змінюють фізико-механічні властивості ґрунтів на тривалий період будівництва та експлуатації (струминна цементация «jet-grouting») (Croce, Flora, & Modoni, 2014; Kutzner, 1996; Малинин, 2010).

Кожна з вищеназаних груп має свою, вже окреслену за наявним досвідом застосування, зону застосування. Так, спосіб «стіна в ґрунті» дозволяє створювати в ґрунті стіни, які використовують в якості несучої або огорожувальної конструкції, протифільтраційної завіси.

Штучне заморожування ґрунтів широко застосовується для запобігання припливу води в підземні виробки і тимчасового надання ґрунтам міцності. Заморожування може бути застосовано для всіх типів пухких, зв'язних і незв'язних ґрунтів, напівскельних і скельних порід. Цей спосіб є універсальним, але і в ньому наявні особливості, що утруднюють його найширше застосування (Andersland, & Ladanyi, 2003; Harris, 1995; Tiutkin, Miroshnyk, Radkevych & Alkhdour, 2019).

Струменева цементация «jet-grouting» використовується для закріплення слабких, нестійких порід під час проходки шахтних стволів (вертикальних виробок) та інших підземних об'єктів (Croce, Flora, & Modoni, 2014; Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, 2011).

Мета

Для наукового обґрунтування технологій спорудження підземних об'єктів та подальших досліджень їх впливу на напружено-деформований стан системи «тимчасове кріплення – оправа – оточуючий масив», слід провести аналіз спеціальних способів проходки вертикальних виробок у складних інженерно-

геологічних умовах для визначення оптимального варіанту виконання робіт. Важливо проаналізувати суть цих спеціальних технологій, переваги та недоліки, необхідне обладнання для їх реалізації та на основі цих знань уміти визначати раціональні області її застосування.

Методика

Детально розглянемо технологію «стіна в ґрунті». При будівництві тунелів і станцій метрополітенів мілкого закладення і інших підземних споруд цим способом влаштовують в траншеї стіни, які є конструкцією споруди і одночасно використовуються як кріплення котловану, під захистом якого здійснюється виїмка ґрунту екскаватором. Спочатку при влаштуванні «стіна в ґрунті» їх використовували тільки для кріплення котловану, однак подальше вдосконалення цього способу дозволило використовувати ці стіни в конструкції споруд (В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, 2005).

При виконанні робіт способом «стіна в ґрунті» під глинистим розчином бурять свердловини ударним або обертальним способом. Діаметр свердловини повинен бути на 50 мм більше розрахункової товщини стін, крок між ними приймають рівним розмаху щелеп грейфера або кратним цієї величині.

У пробурені свердловини, заглиблені на 1...1,5 м нижче проектної позначки стіни, опускають обсадні труби, які й утворюють між собою окремі захватки (рис. 1). Між свердловинами плоским грейфером, відповідним товщині стіни, вибирають ґрунт під глинистим розчином до проектної позначки. Після установки арматурного каркаса і укладання бетону обсадні труби витягають, при цьому утворюються свого роду паз і шпонка між окремими захватками.

Залізобетонні стіни внаслідок утворення на їх поверхні бентонітового шару стають водонепроникними. Слабким місцем у конструкції стін є стики, особливо при влаштуванні стін в водоносних ґрунтах, тому вибору стикувального пристрою і його виконання має бути приділена особлива увага.

Ґрунт з внутрішньої частини споруд розробляють не раніше ніж через 28 днів після закінчення бетонування «стіни в ґрунті» (рис. 2), тобто коли бетон конструкції набере найбільшу міцність (ДБН В.2.3-7:2018).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

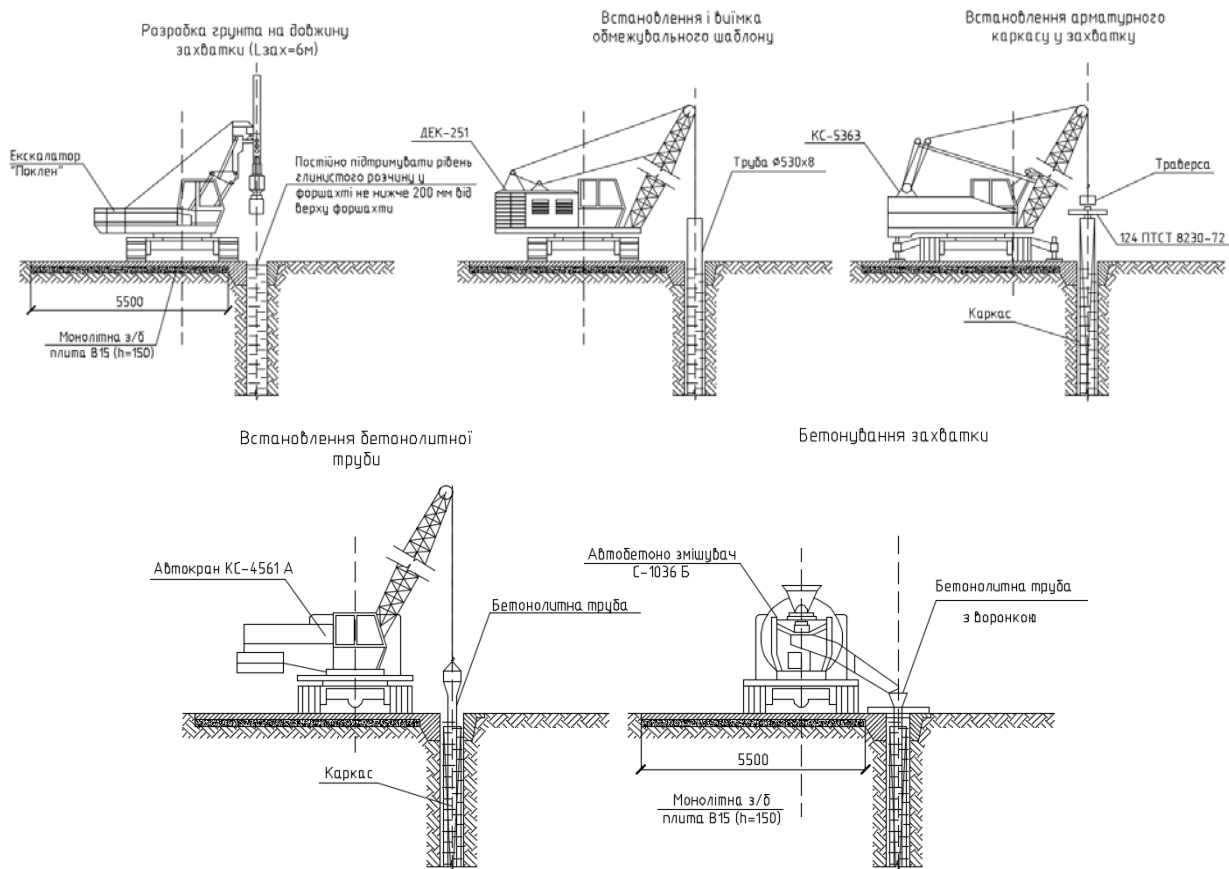


Рис. 1. Технологія будівництва вертикальних виробок способом «стіна в ґрунті»



Рис. 2. Вертикальна виробка при закріпленні ґрунту технологією «стіна в ґрунті»

Штучне заморозжування ґрунтів дозволяє створити міцне огороження кругового або прямокутного обрису із замороженого ґрунту, що перешкоджає проникненню в споруджувані виробки ґрунтової води або водонасичених нестійких ґрунтів. Таке огороження сприймає тиск навколишнього ґрунту на виробку або котлован, а також гідростатичний напір ґрунтових вод.

Для заморозжування ґрунтів, як правило, використовують так званий холодильний агент (холодоагент). В його якості застосовують охолоджений водний розчин хлористого кальцію (розсіл), який має здатність залишатися рідким при негативних температурах. Такий розсіл, охолоджений на заморозувальній станції, по системі труб подають до заморозуючої колонки, яка занурена в пробурені свердловини.

Для створення льодогрунтової огорожі попередньо по контуру майбутньої виробки через всю товщу водонасичених ґрунтів бурять свердловини, занурюючи кінці їх на 6 м в водоупорний

грунт (суглинок). Відстань між визначається проектом з розрахунку, що радіус наможення навколо свердловини льодогрунтового циліндра становить 1,25...1,5 м.

У пробурені свердловини опускають заморожуючі труби-колонки з наглухо завареним нижнім кінцем (дном). У колонки, не доходячи до дна їх на 40...50 см, опускають труби меншого діаметру з відкритим нижнім кінцем – труби живлення.

Заморожуючі колонки через спеціальні оголовки з'єднують в розташовану на поверхні загальну систему, що складається з труби-розподільника, по якій подається охолоджений на заморожувальній станції розчин хлористого кальцію (розсіл), і труби-колектора, що відводить розсіл з колонок до тієї ж станції.

На заморожувальній станції монтують насосно-компресорні агрегати і пристрої, призначені для забезпечення роботи всієї системи заморожування. Холодний розсіл насосами нагнітається в розподільник, звідки він рівномірно розходить по живильних трубах заморожувальних колонок. Досягнувши дна колонки, розсіл, тиск якого підтримується насосами на станції, піднімається вгору по кільцевому простору між живильною трубою і заморожуючою колонкою, омиваючи її внутрішні стінки. При цьому відбувається теплообмін: розсіл віднімає тепло у ґрунту, що оточує колонку, і знижує його температуру, що поступово призводить до заморожування ґрунту. Потім з колонки через оголовок розсіл надходить у колектор, а з нього – на заморожуючу станцію, де знову охолоджується.

На заморожувальній станції монтують дві системи машин і механізмів. Перша система (аміачна) призначена для охолодження розсолу аміаком і включає компресор, конденсатор і випарник, з'єднані трубопроводами. Друга система (розсільна) призначена для забезпечення циркуляції розсолу і включає розсільний бак, насос, трубопроводи, розподільник, колектор і заморожуючі колонки.

Поступово навколо кожної колонки утворюється масив замороженого ґрунту циліндричної форми. При подальшому заморожуванні обсяг заморожених циліндрів збільшується, і вони змерзаються між собою в суцільний кільцевий масив (рис. 3).



Рис. 3. Послідовність виникнення льодогрунтового кільця масиву навколо виробки

Час, необхідний для утворення замороженого масиву, залежить від гідрогеологічних умов, числа заморожувальних колонок, температури циркулюючого розсолу, проектної товщини замороженого масиву.

Про виникнення замкнутої льодогрунтової огорожі судять з підняття рівня води у спеціально пробуреної контрольної гідрогеологічної свердловині.

Роботи з проведення заморожування починають з буріння свердловин та встановлення в них заморожувальних колонок з живлячими трубами. Паралельно ведуть роботи з будівництва заморожувальних станцій, монтажу обладнання та розсолпроводу з таким розрахунком, щоб до закінчення буріння свердловин можна було провести випробування і ввести всю систему в роботу (рис. 4).

Виробництво гірничопрохідницьких і будівельних робіт у замороженій зоні має ряд особливостей. Роботи слід вести при ретельному контролі за станом льодогрунтової огорожі та режимом роботи заморожуючої станції для збереження розмірів льодогрунтової огорожі та її температури.

Виїмку ґрунту з котловану в період плюсових температур повітря необхідно вести із захистом стінок льодогрунтової огорожі від дії атмосферних опадів і сонячних променів.



Рис. 4. Схема розсолопроводної мережі

При розробці ґрунту буровибуховим способом необхідно дотримуватися запобіжних заходів, не допускати деформації льодогрунтової огорожі та пошкодження заморожувальних колонок. Після закінчення прохідницьких робіт і зведення постійної оправи споруди приступають до відтавання заморожених ґрунтів, яке може відбуватися природним шляхом або виконується штучно шляхом нагнітання в свердловини нагрітого розсолу або води.

Струменева цементация «jet-grouting» полягає у використанні енергії високонапірного струменя цементного розчину для руйнування і одночасного перемішування ґрунту з цементним розчином в режимі "mix-in-place" (перемішування на місці). Після твердіння розчину утворюється новий матеріал – ґрунтобетон або ґрунтоцемент, що володіє високими характеристиками міцності і деформації.

Відзначимо, що в деяких випадках руйнування ґрунту проводять струменем води, в інших випадках – струменем цементного або цементно-бентонітового розчину. Струмінь витікає із сопел спеціального пристрою – монітора, розташованого в нижній частині бурової колони відразу за буровим наконечником.

В соплах монітора відбувається перетворення потенційної енергії робочої рідини, що нагнітається під високим тиском насосом в моні-

тор, в кінетичну енергію струменя. У зв'язку з високими абразивними властивостями цементного розчину сопла виготовляються зі спеціального металокерамічного складу. Діаметр сопел становить 1,6...3,5 мм. Для отримання високої однорідності результатів цементации кількість сопел в моніторі становить 2...6 шт.

Струминну цементацию ґрунту виконують в два етапи – в процесі прямого і зворотного ходу бурової колони.

Під час прямого ходу виконують буріння лідируючої свердловини до проєктної позначки. Для буріння м'яких порід застосовують пир'яні долота, а при бурінні щільних порід використовують шарошечні долота з твердосплавними елементами.

В процесі зворотного ходу в бурову колону під високим тиском подають робочу рідину і починають підйом колони. Якщо під час підйому одночасно виконувати обертання, то в результаті в ґрунтовому масиві формуються елементи у вигляді колон (рис. 5). Якщо підйом виконувати без обертання, то елементи будуть мати вигляд тонких панелей.

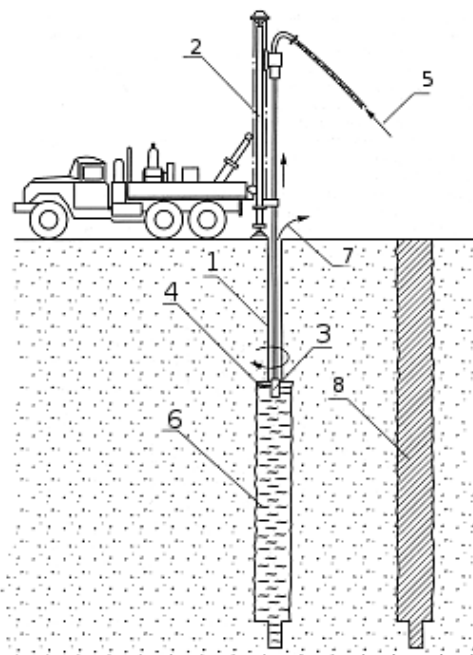


Рис. 5. Схема виробництва струменевої цементации: 1 – технологічна свердловина; 2 – гідравлічний буровий верстат; 3 – свердловинний струминний однокомпонентний монітор; 4 – високошвидкісний струмінь тверднучого розчину; 5 – розчин; 6 – розмита порожнина; 7 – розчино-ґрунтова суміш, що виливається; 8 – готова колона ґрунтобетону (ґрунтоцементу)

На рис. 6 показана схема виконання робіт по струминній цементації при проходці глибокого клітьового стовбура на руднику Гремячинсько-го ГЗК із застосуванням спеціального сконструйованого бурового верстата.

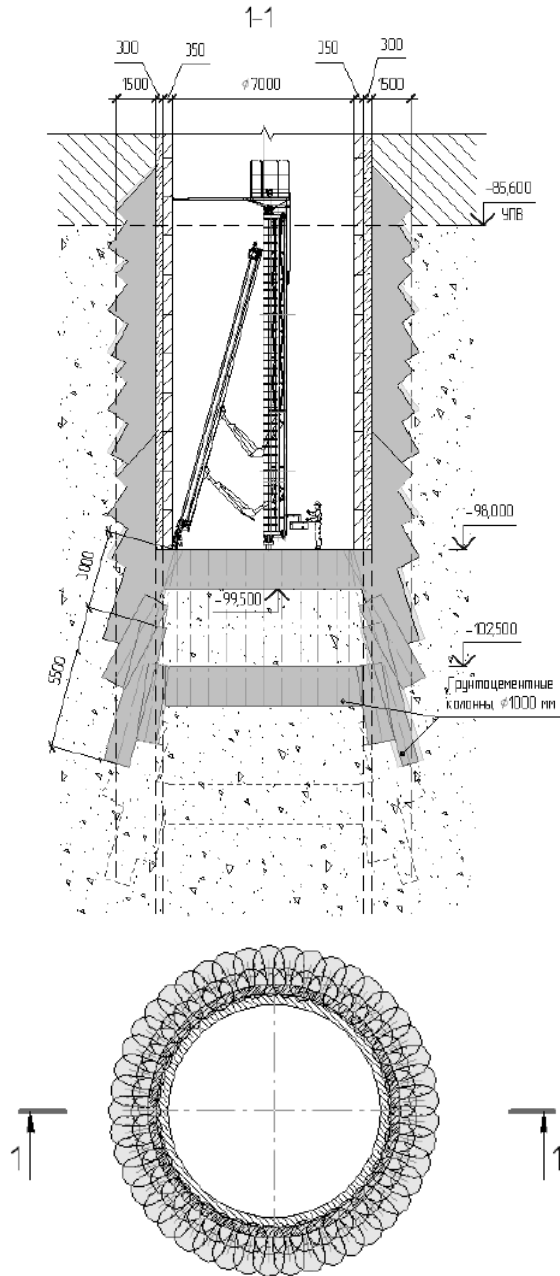


Рис. 6. Влаштування породобетонного огородження у декілька етапів

Така проходка стовбура в шарі нестійких порід великої потужності є надскладним завданням, оскільки у цьому випадку цементацію порід доводиться вести заходками.

Крім того, на кожній заходці доводиться додатково влаштовувати горизонтальну протифільтраційну завісу товщиною 2...3 м.

Схема носить циклічний характер і складається з наступних етапів:

- формування вертикальної огорожі за допомогою струминної цементації ґрунтів;
- формування горизонтальної протифільтраційної завіси;
- час вичікування для набору міцності породобетону;
- розробка ґрунту на існуючій заходці.

Послідовний характер всіх робіт призводить до збільшення часу циклу. Скоротити час на перших двох етапах можливо за рахунок підвищення продуктивності робіт по влаштуванню ґрунтоцементних колон.

Результати

Існуючі технології закріплення водонасичених ґрунтів використовують без достатнього наукового обґрунтування, в деяких випадках без проведення техніко-економічного порівняння способів на стадії проектування. Слід виокремити особливості, переваги та недоліки кожного з них та окреслити межі їх застосування.

1. Переваги способу «стіна в ґрунті»:

- будівництво може здійснюватися в будь-яких інженерно-геологічних умовах на глибині до 20 м і більше;
- при будівництві в водонасичених ґрунтах і заглибленні стін у водоупор відпадає необхідність в застосуванні інших спеціальних способів (водозниження, заморожування ґрунтів);
- роботи можна проводити в безпосередній близькості від існуючих будівель і підземних комунікацій і нижче їх основи без влаштування додаткових заходів, що забезпечують їх стійкість і безпеку.

Недоліки способу «стіна в ґрунті»:

- відсутність можливості контролювати якість бетону, що укладається в бентонітовому розчині;
- труднощі збереження проектного положення арматурних каркасів щодо поверхні стіни і збереження захисного шару бетону певної товщини;
- необхідність сколювання бетону для вирівнювання верху стіни на кінцевому етапі робіт.

2. Спеціальний спосіб заморожування. Правильний вибір глибини заморожуваних свердловин має велике значення. Заморожуючі свердловини повинні бути досить заглиблені у водостійкий пласт: при глибині заморожування до 50 м – на 2,0...3,0 м, від 50 м до 100 м – на 3,0...4,0 м, більше 100 м – приймають в залежності від нашарування ґрунтів. Величина їх заглиблення повинна забезпечити повну водонепроникність стін виробки. При визначенні величини заглиблення свердловин необхідно враховувати нерівності покриття водостійкого пласта, тріщинуватість пласта, а також можливу втрату глибини під час буріння свердловин через скупчення дрібного ґрунту на забої.

У загальному комплексі робіт по проходці підземних споруд метрополітенів з попереднім заморожуванням ґрунтів найбільш тривалими, трудомісткими і відповідальними є роботи по бурінню заморожуваних свердловин. На буріння витрачається від 30 до 50 % загального часу, необхідного для виконання робіт по заморожуванню.

На відміну від заморожування ґрунтів під час проходки вертикальних стволів шахт, де бурять виключно вертикальні свердловини, при будівництві метрополітенів переважно бурять похилі свердловини для проходки ескалаторних, перегінних і станційних тунелів.

Від ретельності проведення бурових робіт залежить успіх штучного заморожування ґрунтів.

На жаль, технологія має ряд істотних недоліків і характеризується тривалим періодом активного заморожування, необхідністю підтримки від'ємних температур в процесі будівництва вертикальної виробки, істотними деформаціями кріплення виробок в момент відтавання порід, ускладненням робіт з бетонування постійного кріплення, значним споживанням електроенергії тощо.

3. Струминна цементация дозволяє зміцнювати практично весь діапазон ґрунтів – від гравійних відкладень до дрібнодисперсних глин і мулів. Іншою важливою перевагою технології є надзвичайно висока передбачуваність результатів зміцнення ґрунтів. Це дає можливість на етапі проектування досить точно розрахувати геометричні та міцнісні характеристики майбутньої підземної конструкції та відповідно триватривити, матеріали та вартість робіт.

Залежно від конкретних цілей обробки ґрунтів застосовується однокомпонентна, двокомпонентна і трикомпонентна струминна цементация. Крім того, можуть бути використані такі спеціальні прийоми, як часткове попереднє промивання оброблюваних ґрунтів («pre-washing») або повне їх заміщення після гідророзмиву і винесення на поверхню цементним розчином або цементним розчином з додаванням мармурової пудри.

Режим попереднього розмиву дозволяє при обробці підвищити співвідношення цемент/ґрунт і, отже, міцність закріплених ґрунтів, що особливо актуально в глинистих ґрунтах.

Використання цементно-піщаних розчинів для заміщення ґрунтів неприпустимо з причини високої абразивності зерен кварцу (швидко зношуються і виходять з ладу розчиноподаючі шланги високого тиску).

У тих випадках, коли стовбур перетинає невеликий шар нестійких порід, цементацию цього шару вигідно виконувати з виробки стовбуру. При даному способі значно знижуються обсяги буріння, відсутня проблема розбіжності колон з глибиною буріння. Основним недоліком є необхідність роботи в обмеженому просторі. У стовбурах діаметром 6...8 м доводиться застосовувати малогабаритні бурові верстати з частими з'єднаннями і роз'єднаннями бурових штанг, довжина яких, як правило, становить 1,0 м.

Другим істотним недоліком є необхідність збору і підйому на поверхню ґрунтоцементної пульпи, що в умовах обмеженого простору являє досить трудомістке завдання. На практиці з умов безпеки рідко вдається виконати паралельно ці дві операції – струминну цементацию і збір пульпи, тому їх доводиться виконувати послідовно, що істотно знижує продуктивність робіт.

Наукова новизна та практична значимість

Проведений порівняльний аналіз трьох основних спеціальних способів спорудження вертикальних виробок надав змоги окреслити та науково обґрунтувати умови застосування кожного з них. Результати аналізу є підґрунтям для подальшого обґрунтування кожного зі способів з позиції напружено-деформованого стану загальної системи, що утворюється при спорудженні підземних об'єктів, зокрема вертика-

льних виробок для шахтних стовбурів. У програмному комплексі АБК-5 (3.5.1) було виконано розрахунок кошторисної вартості всіх трьох способів закріплення ґрунтів. За результатами розрахунку штучне замороження ґрунтів є найбільш економічно вигідним.

Висновки

Єдиною технологією, що забезпечує безпечну проходку стовбурів в складних умовах під час проходки протяжних складних ділянок або у разі проходки дуже глибоких стовбурів, є технологія заморожування ґрунтів.

У тих випадках, коли потужність шарів слабких обводнених ґрунтів незначна, ефективнішою стає технологія струминної цементації ґрунтів «jet-grouting».

В подальших теоретичних та практичних побудовах слід, спираючись на вже отримані результати, провести більш комплексний аналіз проаналізованих спеціальних способів. Окрім вже отриманих результатів, остаточний доказ щодо застосування конкретного спеціального способу можливий на основі математичного моделювання процесу проходки та спорудження вертикальних виробок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003) *Frozen Ground Engineering*, 2nd Edition. John Wiley & Sons.
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press.
- Harris, J. S. (1995). *Ground freezing in practice*. Amer Society of Civil Engineers.
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema.

Tiutkin, O., Miroshnyk, V., Radkevych, A., & Alkhdour, A. (2019). Nonuniform stress state of a hoisting shaft lining as a result of disturbance of the ground freezing technology, *International Conference Essays Of Mining Science And Practice*, E3S Web of Conferences 109, 00099

Tiutkin, O., Petrenko, V., Petrosian, N., Miroshnyk, V., & Alkhdour, A. (2018). Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process, *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 28-36.

ДБН В.2.3-7:2018. *Метрополітени. Основні положення*. Київ: Мінрегіонбуд України.

Дорман, Я. А. (1981). *Специальные способы работ при строительстве метрополитенов*. Москва: Транспорт.

Дорман, Я. А. (1971). *Искусственное замораживание грунтов при строительстве метрополитенов*. Москва: Транспорт.

Колесников, В. С., & Стрельникова, В. В. (1999). *Возведение подземных сооружений методом «стена в грунте»*. Технология и средства механизации. Волгоград: Изд-во ВолГУ.

Малинин, А. Г. (2010). *Струйная цементация грунтов*. Москва: Стройиздат.

Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, Г. К. (2011). Надежность способов закрепления грунтов при эксплуатации перегонных тоннелей Киевского метрополитена. *Вісник ДНУЗТу імені академіка В. Лазаряна*, 35, 135-139.

Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тюткин, А. Л. (2005). *Современные технологии строительства метрополитенов в Украине*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.

Петренко, В. И., & Петренко, В. Д. (2014). Обоснование параметров химического закрепления грунтов при строительстве Киевского метрополитена. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 60-66.

А. Л. ТЮТЬКИН¹, В. А. МИРОШНИК^{2*}

¹ Кафедра «Мосты и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{2*} Кафедра «Мосты и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, эл. почта miroshnikvetal@gmail.com, ORCID 0000-0002-8115-0128

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Цель. Все чаще в условиях Украины строительство тоннелей и метрополитенов требует специальных способов работ, позволяющих уменьшить водонасыщенность и увеличить устойчивость грунтов и пород окружающего массива. Многообразие способов, применяемых в подземном строительстве, требует научного

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

обоснования, особенно когда специальные способы близки по прямым и трудозатратами. Целью научной статьи является анализ специальных способов проходки вертикальных выработок в сложных инженерно-геологических условиях для определения области их применения. **Методика.** Существующие технологии закрепления водонасыщенных грунтов используют без достаточного научного обоснования, в некоторых случаях без проведения технико-экономического сравнения способов на стадии проектирования. Следует выделить особенности, преимущества и недостатки каждого из них и определить границы их применения. Для достижения поставленной цели рассмотрены и проанализированы три специальных способа закрепления грунтов: «стена в грунте», искусственное замораживание грунтов и струйная цементация «jet-grouting». **Результаты.** Определены преимущества и недостатки трех способов закрепления грунтов и рассчитана сметная стоимость строительства. Доказано, что единственной технологией, обеспечивающей безопасную проходку стволов в сложных условиях при проходке протяженных сложных участков или в случае проходки очень глубоких стволов, является технология замораживания грунтов. А в тех случаях, когда мощность слоев слабых обводненных грунтов незначительна, эффективнее становится технология струйной цементации грунтов «jet-grouting». Результаты анализа являются основой для дальнейшего обоснования каждого из способов с позиции напряженно-деформированного состояния общей системы, образующейся при сооружении подземных объектов, в частности вертикальных выработок для шахтных стволов. **Научная новизна.** Проведенный сравнительный анализ трех основных специальных способов сооружения вертикальных выработок предоставил возможность определить и научно обосновать условия применения каждого из них. **Практическая значимость.** В программном комплексе АВК-5 (3.5.1) был выполнен расчет сметной стоимости всех трех способов закрепления грунтов. По результатам расчета искусственное замораживание грунтов является наиболее экономически выгодным.

Ключевые слова: вертикальная выработка; инженерно-геологические условия; «стена в грунте»; искусственное замораживание грунтов; струйная цементация «jet-grouting»

O. L. TIUTKIN¹, V. A. MIROSHNYK^{2*}

¹ Department «Bridges and tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{2*} Department «Bridges and tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 828 64 87, e-mail miroshnikvetal@gmail.com, ORCID 0000-0002-8115-0128

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPECIAL METHODS DURING VERTICAL WORKS

Purpose. Increasingly, in Ukraine, the construction of tunnels and metro requires special methods of work to reduce water saturation and increase the stability of soils and rocks of the surrounding massif. The variety of methods used in underground construction requires scientific justification, especially when special methods are close in direct and labor. The purpose of the scientific article is to analyze special methods of sinking vertical workings in difficult engineering and geological conditions to determine their scope. **Methodology.** Existing technologies for fixing water-saturated soils are used without sufficient scientific justification, in some cases without conducting a feasibility comparison of methods at the design stage. It should highlight the features, advantages and disadvantages of each of them and determine the boundaries of their application. To achieve this goal, three special ways of fixing soils were considered and analyzed: "wall in the ground", artificial freezing of soils and jet-grouting. **Findings.** The advantages and disadvantages of three methods of fixing the soil are determined and the estimated cost of construction is calculated. It has been proved that the only technology that ensures safe penetration of trunks in difficult conditions when penetrating extended complex sections or in the case of penetrating very deep trunks is the technology of freezing soils. And in those cases when the thickness of the layers of weak watered soils is insignificant, the jet-grouting soil cementation technology becomes more efficient. The results of the analysis are the basis for the further substantiation of each of the methods from the standpoint of the stress-strain state of the overall system formed during the construction of underground facilities, in particular vertical workings for mine shafts. **Originality.** A comparative analysis of the three main special methods for constructing vertical workings made it possible to determine and scientifically substantiate the conditions for using each of them. **Practical value.** In the AVK-5 (3.5.1) software pack-

age, the estimated cost of all three methods of soil fixation was calculated. According to the calculation results, artificial freezing of soils is the most cost-effective.

Keywords: vertical work; engineering and geological conditions; "wall in the ground"; artificial freezing of soils; "jet-grouting"

REFERENCES

- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003) *Frozen Ground Engineering*, 2nd Edition. John Wiley & Sons. (in English)
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press. (in English)
- Harris, J. S. (1995). *Ground freezing in practice*. Amer Society of Civil Engineers. (in English)
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema. (in English)
- Tiutkin, O., Miroshnyk, V., Radkevych, A., & Alkhdour, A. (2019). Nonuniform stress state of a hoisting shaft lining as a result of disturbance of the ground freezing technology, *International Conference Essays Of Mining Science And Practice*, E3S Web of Conferences 109, 00099. (in English)
- Tiutkin, O., Petrenko, V., Petrosian, N., Miroshnyk, V., & Alkhdour, A. (2018). Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process, *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 28-36. (in English)
- DBN V.2.3-7:2018. *Metropoliteny. Osnovni polozhennja*. Kyjiv: Minreghionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Dorman, Ja. A. (1981). *Special'nye sposoby rabot pri stroitel'stve metropolitenov*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Dorman, Ja. A. (1971). *Iskusstvennoe zamorazhivanie gruntov pri stroitel'stve metropolitenov*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Kolesnikov, V. S., & Strel'nikova, V. V. (1999). *Vozvedenie podzemnyh sooruzhenij metodom «stena v grunte»*. *Tehnologija i sredstva mehanizacii*. Volgograd: Izd-vo VolGU. (in Russian)
- Malinin, A. G. (2010). *Strujnaja cementacija gruntov*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Petrenko, V. I., & Savinkov, G. K. (2011). Nadezhnost' sposobov zakreplenija gruntov pri jekspluatacii peregonnyh tonnelej Kievskogo metropolitena. *Visnyk DNUZTu imeni akademika V. Lazarjana*, 35, 135-139. (in Russian)
- Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tjut'kin, A. L. (2005). *Sovremennye tehnologii stroitel'stva metropolitenov v Ukraine*. Dnipropetrovsk: Nauka i osvita. (in Russian)
- Petrenko, V. I., & Petrenko, V. D. (2014). Obosnovanie parametrov himicheskogo zakreplenija gruntov pri stroitel'stve Kievskogo metropolitena. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 4, 60-66. (in Russian)

Надійшла до редколегії 30.04.2020.

Прийнята до друку 22.05.2020.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21:625.1-026.564:[519.6]

V. V. MAROCHKA¹, S. H. BOBOSHKO^{2*}

¹ Department «Bridges and tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 83 10, e-mail markay905@gmail.com, ORCID 0000-0001-8856-5708

^{2*} Department «Bridges and tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 83 10, e-mail stepanboboshko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7612-0696

NUMERICAL ANALYSIS OF REINFORCEMENT OF SECTIONS WITH TRANSITIONAL RIGIDITY ON APPROACHES TO RAILWAY BRIDGES

Purpose. To analyze the mechanism of work of embankments, to model three-dimensional models and to compare methods of their reinforcement on transitional areas on approaches to railway bridges using the Lira software based on finite element method (FEM). To do comprehensive analysis of results and comparison of constructive performance of different reinforcement methods. **Methodology.** Numerical finite element modeling (FEM) had been performed to study the work of embankments in transition sections on approaches to railway bridges. Four three-dimensional models of the construction of the transitional section, corresponding to the real bridge, had been constructed. These models had been tested for nominal load to evaluate their performance relative to each other. **Findings.** As a result of the calculations, the deformation characteristics for the basic model and each of the reinforcement types had been obtained, and their comparisons had been made by determining the maximum vertical deformations and vertical deformations at key points. The analyze of feasibility of using the tested reinforcement methods under different real initial conditions had been performed. **Originality.** The main aspects of the work of the transition sections over long periods of time had been revealed. Comparisons of fundamentally different methods and types of reinforcement of sections with transient stiffness had been made. The expediency of the methods of reinforcement of the embankment construction in the transitional sections that had been proposed in previous works had been tested. **Practical value.** The proposed reinforcement methods may be used depending on the specific design conditions, the budget, and other factors. Evaluating the work of different types of reinforcement during numerical analysis makes it possible to move away from large-scale field trials and focus on other methods, which significantly reduces time spent on solving current problems.

Keywords: stress-strain state; numerical modeling; finite element method; transitional stiffness; approaches; bump; dip

Introduction

The problems of excessive vertical deformations in transition sections on the approaches to the railway bridges have arisen almost from the very beginning of history of appearance of artificial structures on the railways. However, greater attention had been paid to it amplification in the 20th century, and the largest studies of the mechanics of their work came at the end of the 20th – beginning of the 21st century (Nicks, 2009b).

Studies of arias with transient stiffness have shown the need to reinforcement them for normal operation of the structure over long periods of time. The analysis of areas with transient stiffness performed in previous work has allowed not only to outline the main causes of their occurrence, but also to investigate and compare the methods of

their reinforcement in developed countries (Marochka, & Boboshko, 2018).

While the methods of reinforcement based on the complete restructuring of the embankment mound are the most widely used by foreign engineers, among the patents of Ukrainian bridge-builders there are more frequent ways of reinforcement, which require a minimum amount of excavation, and sometimes do not even involve dismantling the upper structure of the track (Tejada A. de Miguel, 2015; Marochka, & Boboshko, 2018).

The main criteria for choosing a reinforcement method are to evaluate the complexity of the erection, the financial feasibility and the design efficiency. If the first two criteria are easily computational, the last one requires the greatest amount of research.

The choice of the most rational from the point of view of the right design reinforcement can be determined by various methods, among which the basic are mathematical modeling, experimental research and full-scale tests (Seo, 2003; Paixao, 2014).

Mathematical modeling is the least complex from an organizational and financial point of view and allows research to be carried out regardless of natural and geopolitical conditions. Besides, the reliability of the results can be verified by experimental method or field tests.

The determination of the stress-strain state allows us to focus on the deformations arising in the structure due to its long-term use.

When using mathematical modeling by finite element method, there are several factors to consider: constructive correctness of the model, real conditions of structure attachment, and the load application that will meet the necessary research conditions (static long-term or dynamic shock load) (Paixao, & Fortunato, 2009).

Purpose

To construct the models of transitional sections, which would correspond to the real work of the structure and to compare their reinforcements on the basis of the obtained results.

Methodology

To solve the problem of studying the interaction of the embankment of the bridge in the transition section with its reinforcement and to select the most appropriate reinforcement, we use a complex method, which includes the analysis of stress-strain state (SSS) in mathematical modeling. This approach to this problem makes it possible to find out the dependencies or regularities of the formation of the SSS of construction with different variants of reinforcement of transition sections, since the mathematical modeling results reveals sufficient or insufficient correspondence of the proposed models to the real bridge (Тяпочкин, 2009).

Numerical analysis using finite element method had been used for mathematical modeling of the task of interaction of reinforcement with the surrounding mass. While not giving information on the nature of the method described in many classical analytical works, it should be noted that FEM is the most progressive method of numerical simula-

tion, since it allows to study complex deep and underground structures in interaction with the surrounding array. Analyzing a number of advantages of the given method, it should be noted that in solving FEM problems, no additional assumptions are required to be introduced into the calculation scheme (FE model), i.e. the influence of uncertain parameters on the calculation results is minimal (Купрій, & Тютюкін, 2012; Купрій, Кулаженко, & Гудкова, 2015).

To determine the stress-strain state of the structure of the transition section on the approach to the railway bridge and to determine the most optimal method of reinforcement of the embankment, three-dimensional finite-element models were constructed in the LIRA software complex (Rahmani, & Kebdani, 1981; Петраков, 1995; Dahlberg, 2001; Nicks, 2009a).

The experimental model, that had been used in this work based on a real railway bridge on the Loshkarovka – Pavlopillya line of the Merefа – Kherson line in Ukraine.

Since the deformations with respect to the XoZ plane are symmetrical, the model is executed for half the construction of the transition section. When modeling the initial structure, the general model of length 44.5 m includes the section of the embankment 14.5 m in front of the abutment, the abutment itself, and 20 m of the embankment behind the abutment (Figure 1). The latter is the main object of observation.

Three types of reinforcement of the embankment construction were selected for verification and comparison: 1) reinforcement by gabion boxes; 2) reinforcement by vertical soil cement piles; 3) the use of reinforced and sorted soils.

The soil array had been modeled from hexagonal and octagonal finite elements, preferably with a side of 0.5 m.

The main points of observation are the upper points of contact of abutment and embankment. For simplicity, they were given the names "T1", "T2" and "T3" (Figure 2).

To simulate the structural reinforcement of gabion boxes (model № 2), the top part of the embankment had been given a stiffness corresponding to the gabion boxes. Reinforcement of the structure is carried out by means of pairs of gabion boxes of sizes 3000×2500×2000, 3000×2500×1500 and 3000×2500×1000. Gabions are modeled as octagonal finite elements of appropriate stiffness.

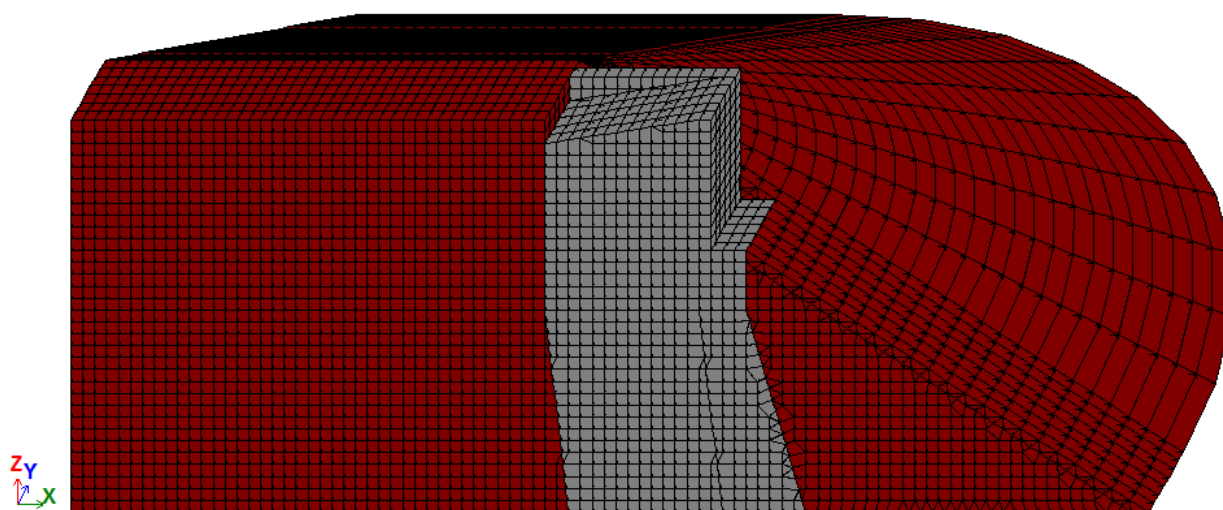


Fig. 1. Finite element model № 1

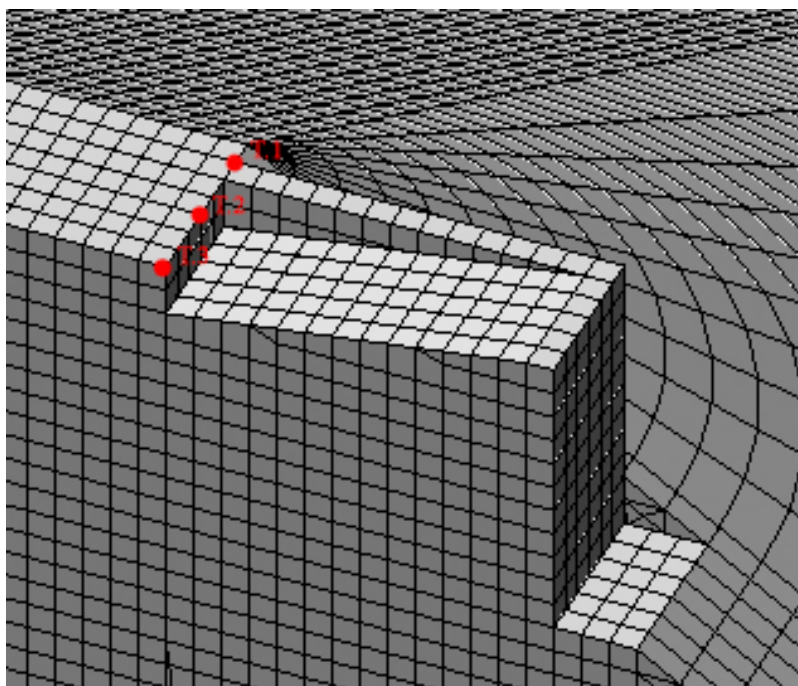


Fig. 2. Points of deformation reading

For model № 3 (reinforcement with soil cement piles), the decision was made to model piles with hexagons in section, consisting of finite elements in the form of triangular prisms.

Piles of length from 13 to 8 m with multiplicity of 1 m are placed along the "X" axis by a cascade of 3 pieces for each length. The distance between the axis of the first pile and the abutment is 2 m, the distance between the piles is 1 m in the axes. The distance from the pile's axes to the edge of the model is 0.5 m.

Model № 4 is the most widely used type of reinforcement in the EU countries and provides for the replacement of the transition embankment soil by sorted and cement reinforced soils. The model is constructed in the same way as model № 1 with the replacement of the stiffness of the soil of the transitional section to those corresponding to the sorted (blue color) and reinforced cement sorted soil (pink color).

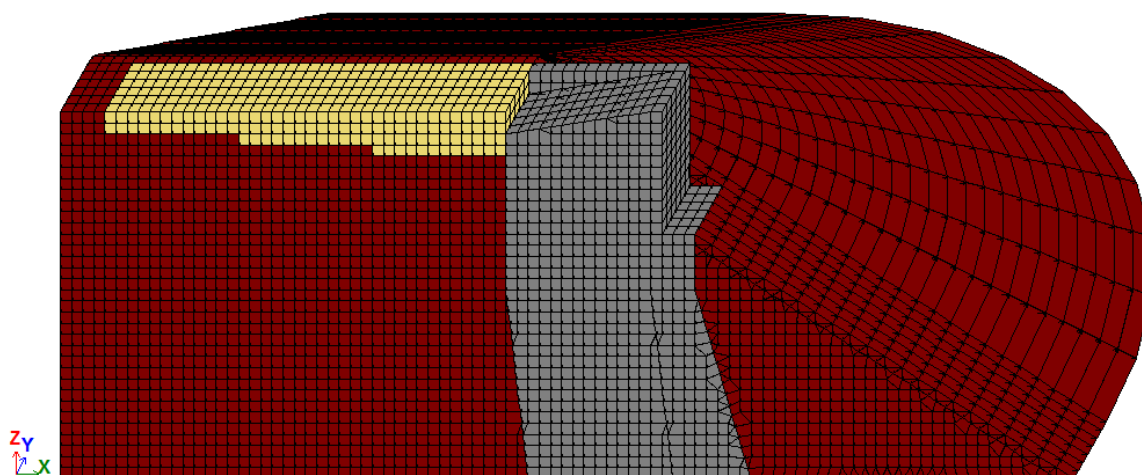


Fig. 3. Finite element model № 2

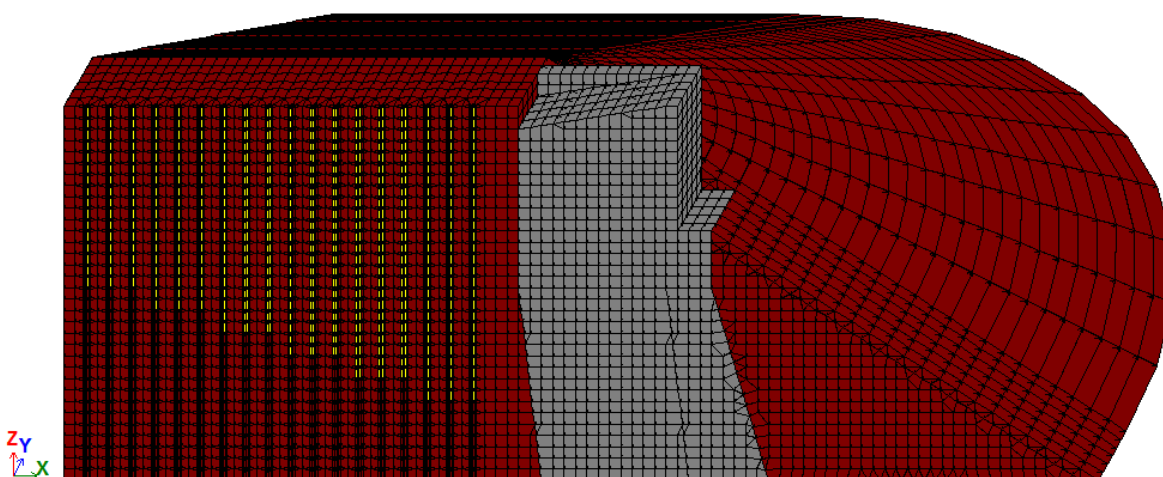


Fig. 4. Finite element model № 3

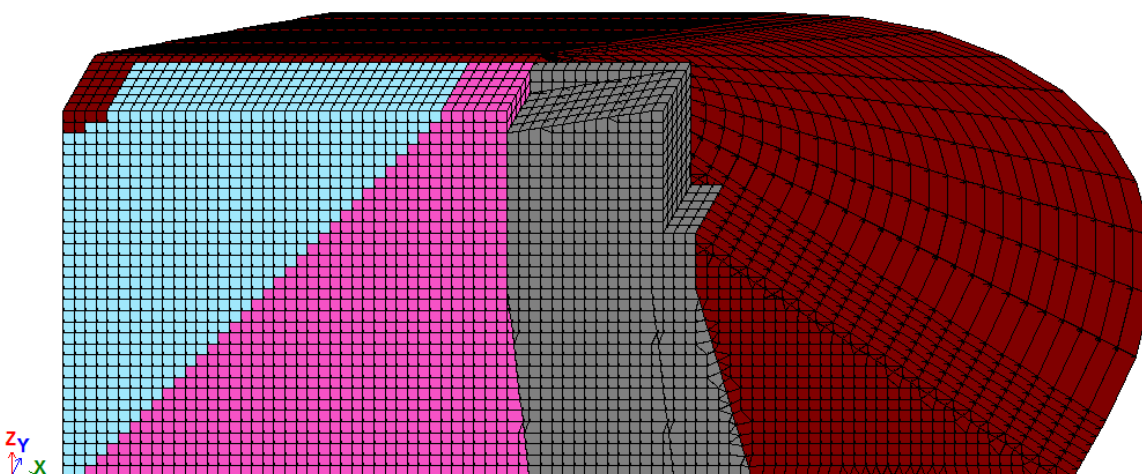


Fig. 5. Finite element model № 4

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

To further calculations of the joint work of the abutment and the surrounding array using finite elements corresponding to the transitional sections on the railway bridges, soil layers and additional reinforcement elements, the characteristics of the material stiffness were assigned, which numerically reflect their deformation characteristics (modulus of elasticity and Poisson's ratio), and the magnitude of the own weight of the materials (Карпиловский, Криксунов, Перельмутер, & al., 2000).

The characteristics of the above parameters are given in Table 1.

The variants were calculated on a nominal vertical distributed load of 10 kN/m² applied to the upper embankment plane behind the abutment.

Table 1

Finite element characteristics

Number of stiffness type	Item name	E , kN/m ³	ρ , kN/m ³	μ
Soils				
1	Loam	25000	20.1	0.3
2	Sorted Loam	80000	22.3	0.3
3	Sorted reinforced Loam	1.5×10^5	23.1	0.3
Reinforced concrete				
4	B25	3.0×10^7	25.0	0.2
Other materials				
5	Soil cement	2.5×10^5	24.5	0.3
6	Gabion boxes	3.0×10^5	20.0	0.3

Results

The results of the calculation show real reflections of deformations of the soil massif of the embankment. In calculations № 1, 2, 3 and 4, the results of the vertical displacements of the structure, which are shown in Figures 6, 7, 8 and 9, respectively, had been obtained.

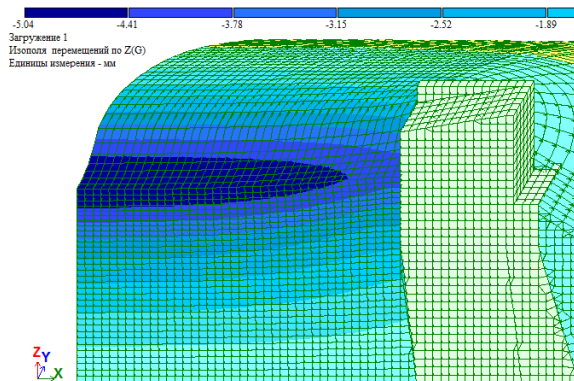


Fig. 6. Vertical displacement diagram, scheme № 1

As can be seen in Figure 6, the maximum deformations in the initial structure of the transition section were 5.04 mm, the deformations at the points T1, T2 and T3 – 2.53; 3.9 and 4.17 mm respectively.

With the reinforcement of the upper section of the structure by gabions, the maximum vertical displacement decreased by 65.9 %, and the displacement at points T1, T2 and T3 was 0.98; 1.11 and 1.15 mm respectively, up 61.2; 71.5 and 72.4 % less.

With the reinforcement of the structure by soil cement piles, the maximum vertical displacement decreased by 47.4 %, and the displacement at points T1, T2, and T3 was 1.4; 2.13 and 2.25 mm respectively, up 44.7; 45.4 and 46 % less.

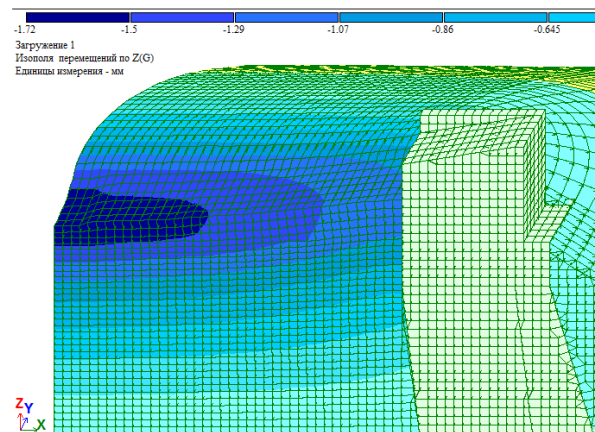


Fig. 7. Vertical displacement diagram, scheme № 2

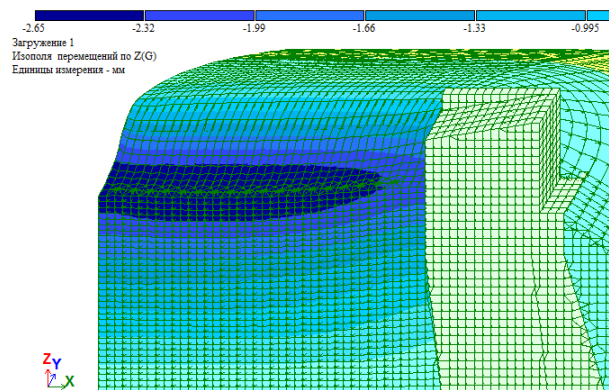


Fig. 8. Vertical displacement diagram, scheme № 3

With the reinforcement of the structure by sorted and cemented soils, the maximum vertical displacement decreased by 69.2 %, and the displacement at points T1, T2 and T3 was 0.77; 0.8 and 0.81 mm respectively by 69.7; 79.5 and 80.6 % less.

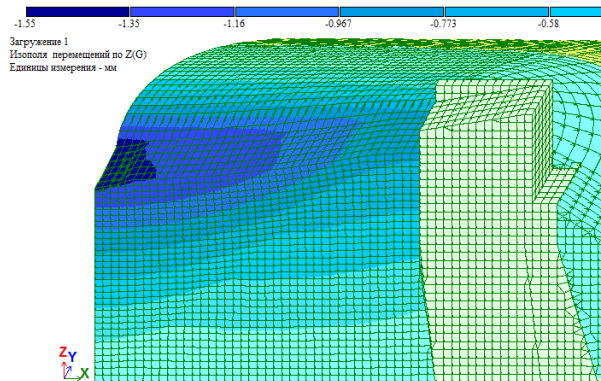


Fig. 9. Vertical displacement diagram, scheme № 4

A general comparison of vertical relocation of key points is summarized in Table 2.

Table 2

Comparison of vertical displacements				
Model №	$\Delta_{\max}$	Δ_{T1}	Δ_{T2}	Δ_{T3}
№ 1 The original design	5.04	2.53	3.90	4.17
№ 2 Gabion boxes	1.72	0.98	1.11	1.15
№ 3 Soil cement piles	2.65	1.40	2.13	2.25
№ 4 Reinforced and sorted soils	1.55	0.77	0.80	0.81

As a result of the tests, the greatest reinforced effect was shown in models № 2 and № 4. The reinforcement № 3 though showed the result, but it was lower than expected.

From a technological point of view, Reinforcement № 3 is the easiest to implement because it does not require disassembly of the upper structure of the coil, and, as a result, allows you to reduce cost not only for the work on reinforcement, but also significantly reduce the loss of profit from stopping traffic on the railway section.

Reinforcement № 2, although needing to dismantle the upper structure, is not costly in terms of the use of materials and construction machinery and the delivery of materials, as gabions can be assembled directly on site in the design position in the prepared ditches.

Reinforcement № 4, although it showed the best result, is the costliest in the planned bridge reinforcement. Such a reinforcement scheme is most appropriate for the construction of new structures or renovations. This method is the most widely used in the EU countries.

As a conclusion, from the technological and practical point of view, in the current conditions of the Ukrainian railways and the manufacturing sector, the most expedient method is to reinforce the transitional areas with gabions.

Reinforcement with soil cement piles is a local temporary solution that can increase the stiffness of the embankment structure and thereby reduce subsidence.

Reinforcement of sorted and cemented soils, though yielding the best results, is the costliest and expedient only in the construction of new bridges.

Originality and practical value

When calculating soil arrays and their interaction with other objects, the finite element method gives the closest picture to the real conditions of the nature of deformations. Its use makes it possible to solve the set tasks in the shortest possible time, taking into account the detail of the built models, which brings them as close as possible to the real mechanics of the construction.

The design of reinforcing of transitional sections using soil cement piles is the least costly and allows for reinforcement without disassembly of the top track structure.

As an alternative to this reinforcement method, it would be advisable to propose the use of gabion structures. This method does not require the high cost of material delivery, reinforcement, and maintenance of the consignment over a medium period of time.

The most effective method in the long run is the use of sorted and cemented soils in the construction of embankment structures.

Conclusions

On the basis of the conducted researches it is possible to draw conclusions about the effectiveness of different methods of strengthening the structures of sections with a transient stiffness index from each other.

An analysis of the stress-strain state of the structure makes it possible to draw conclusions from the weakest points of the transition areas and to visually check the feasibility of any of the proposed reinforcements by finite element modeling.

Each of the proposed reinforcement methods is situational and can be used depending on the design conditions and the budget laid down.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

REFERENCES

- Dahlberg, T. (2001). Some railroad settlement models – a critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 215 (F), 289-300.
- Nicks, J. (2009a). Preliminary numerical simulations of the bump at the end of the railway bridges. *Fourth International Young Geotechnical Engineers Conference*.
- Nicks, J. E. (2009b). *The bump at the end of the railway bridge*. Doctoral dissertation, Texas A&M University.
- Marochka, V. V., & Boboshko, S. H. (2018). Analysis of the problems of sections with the transitional rigidity indicator in world bridging. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 82-92.
- Marochka, V. V., & Boboshko, S. H. (2018). Development of technology of arranging areas with transitional stiffness index on approaches to railway bridges. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 13, 99-106.
- Paixao, A. (2014). *Transition zones in railway tracks. An experimental and numerical study on the structural behaviour*. Ph.D. thesis, LNEC & FEUP.
- Paixao, A. & Fortunato, E. (2009). *Novas solucoes de superstrutura de via para a alta velocidade*. ITC informacao cientifica-Laboratyrrio Nacional de Engenharia Civil.
- Seo, J. B. (2003). *The bump at the end of the bridge: An investigation*. Doctoral dissertation, Texas A&M University. Texas A&M University.
- Rahmani, O., & Kebdani, S. (1981). *Introduction à la Méthode des Eléments Finis pour les Ingénieurs*. O.P.U. Alger.
- Tejada A. de Miguel (2015). *Analysis of the problems associated with dynamic interaction between train, track and structure at transition zones*. Doctoral dissertation, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).
- Карпиловский, В. С., Криксунов, Э. З., Перельмутер, А. В., & al. (2000). *SCAD для пользователя*. Киев: ВВП «Компас».
- Купрій, В. П., Кулаженко, Є. Ю., & Гудкова, А. С. (2015). Моделювання сумісної роботи конструкції кріплення котловану та ґрунту з застосуванням методу скінчених елементів (МСЕ). *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 7, 19-26.
- Купрій, В. П., & Тютюкін, Д. В. (2012). Моделювання напружено-деформованого стану кріплення глибокого котловану. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 3, 89-94.
- Тяпочкин, А. В. (2009). Горизонтальные перемещения армогрунтовых насыпей. *Испытания и расчёты конструкций транспортных сооружений. Научные труды ОАО ЦНИИС*, 251, 69-74.
- Петраков, А. А. (1995). *О расчетных моделях нелинейно-деформируемого грунтового массива*. Полтава: ПТУ.

В. В. МАРОЧКА¹, С. Г. БОБОШКО^{2*}

¹Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 83 10, ел. пошта markay905@gmail.com, ORCID 0000-0001-8856-5708

^{2*}Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 83 10, ел. пошта stepanboboshko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7612-0696

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДСИЛЕННЯ ДІЛЯНОК З ПЕРЕХІДНИМ ПОКАЗНИКОМ ЖОРСТКОСТІ НА ПІДХОДАХ ДО ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ

Мета. Вивчення роботи насипів, моделювання об'ємних моделей та порівняння методів їх підсилення на перехідних ділянках на підходах до залізничних мостів за допомогою програмного комплексу Lira, що базується на методі скінчених елементів (МСЕ). Комплексний аналіз результатів та порівняння конструктивної ефективності роботи різних методів підсилення. **Методика.** Для вивчення роботи насипів на перехідних ділянках на підходах до залізничних мостів проведено числове моделювання методом скінчених елементів (МСЕ). Побудовано чотири тривимірні моделі конструкції перехідної ділянки, що відповідає реальному мосту. Виконане випробування цих моделей на номінальне навантаження для оцінки їх ефективності одна відносно одної. **Результати.** За результатом розрахунків було отримано деформативні характеристики для базової моделі та кожного з типів підсилення, проведено їх порівняння шляхом визначення максимальних вертикальних деформацій та вертикальних деформацій в ключових точках.

© V. V. Marochka, S. H. Boboshko, 2020

Виконано аналіз доцільності використання випробуваних методів підсилення за різних реальних вихідних умов. **Наукова новизна.** Виявлено основні аспекти роботи перехідних ділянок протягом великих проміжків часу. Виконано порівняння принципово різних за методами влаштування та типами підсилень ділянок з перехідним показником жорсткості. Перевірена доцільність методів підсилення конструкції насипу в перехідних ділянках, запропонованих в попередніх роботах. **Практична значимість.** Запропоновані варіанти підсилення можуть використовуватися в залежності від специфічних умов конструкції, закладеного бюджету та інших факторів. Оцінка роботи різних типів підсилення в ході чисельного аналізу дає змогу відійти від масштабних натурних випробувань та зосередитися на інших методах, що дозволяє істотно знизити часові витрати на рішення актуальних проблем.

Ключові слова: деформований стан; метод скінчених елементів; перехідна жорсткість; підходи; швидкісний рух; передмостова яма

В. В. МАРОЧКА¹, С. Г. БОБОШКО^{2*}

¹Кафедра «Мосты и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 83 10, эл. почта markay905@gmail.com, ORCID 0000-0001-8856-5708

^{2*}Кафедра «Мосты и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 83 10, эл. почта stepanboboshko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7612-0696

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УСИЛЕНИЯ УЧАСТКОВ С ПЕРЕХОДНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ЖЕСТКОСТИ НА ПОДХОДАХ К ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ МОСТАМ

Цель. Изучение работы насыпей, моделирование объемных моделей и сравнение методов их усиления на переходных участках на подходах к железнодорожным мостам с помощью программного комплекса Liga, который базируется на методе конечных элементов (МКЭ). Анализ результатов и сравнение конструктивной эффективности работы различных методов усиления. **Методика.** Для изучения работы насыпей на переходных участках на подходах к железнодорожным мостам проведено численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ). Построено четыре трехмерные модели конструкции переходного участка, которые соответствуют реальному мосту. Выполнено испытание этих моделей на номинальную нагрузку для оценки их эффективности друг относительно друга. **Результаты.** По результатам расчетов было получено деформативные характеристики для базовой модели и каждого из типов усиления, проведено их сравнение путем определения максимальных вертикальных деформаций и вертикальных деформаций в ключевых точках. Выполнен анализ целесообразности использования испытанных методов усиления при различных реальных исходных условий. **Научная новизна.** Выведено основные аспекты работы переходных участков в течение больших промежутков времени. Выполнено сравнение принципиально различных по методам устройства и типам усиления участков с переходным показателем жесткости. Проверена целесообразность методов усиления конструкции насыпи в переходных участках, предложенных в предыдущих работах. **Практическая значимость.** Предложенные варианты усиления могут использоваться в зависимости от специфических условий конструкции, заложенного бюджета и других факторов. Оценка работы различных типов усиления в ходе численного анализа позволяет отойти от масштабных натурных испытаний и сосредоточиться на других методах, что позволяет существенно снизить временные затраты на решение актуальных проблем.

Ключевые слова: деформированное состояние; метод конечных элементов; переходная жесткость; подходы; скоростное движение; передмостовая яма

REFERENCES

- Dahlberg, T. (2001). Some railroad settlement models – a critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 215 (F), 289-300. (in English)
Nicks, J. (2009a). Preliminary numerical simulations of the bump at the end of the railway bridges. *Fourth International Young Geotechnical Engineers Conference*. (in English)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Nicks, J. E. (2009b). *The bump at the end of the railway bridge*. Doctoral dissertation, Texas A&M University. (in English)
- Marochka, V. V., & Boboshko, S. H. (2018). Analysis of the problems of sections with the transitional rigidity indicator in world bridging. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 16, 82-92. (in English)
- Marochka, V. V., & Boboshko, S. H. (2018). Development of technology of arranging areas with transitional stiffness index on approaches to railway bridges. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 13, 99-106. (in English)
- Paixao, A. (2014). *Transition zones in railway tracks. An experimental and numerical study on the structural behaviour*. Ph.D. thesis, LNEC & FEUP. (in English)
- Paixao, A. & Fortunato, E. (2009). *Novas solucoes de superstrutura de via para a alta velocidade*. ITC informacao cientifica-Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. (in English)
- Seo, J. B. (2003). *The bump at the end of the bridge: An investigation*. Doctoral dissertation, Texas A&M University. Texas A&M University. (in English)
- Rahmani, O., & Kebdani, S. (1981). *Introduction à la Méthode des Eléments Finis pour les Ingénieurs*. O.P.U. Alger. (in English)
- Tejada A. de Miguel (2015). *Analysis of the problems associated with dynamic interaction between train, track and structure at transition zones*. Doctoral dissertation, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). (in English)
- Karpilovskij, V. S., Kriksunov, Je. Z., Perel'muter, A. V., & al. (2000). *SCAD dlja pol'zovatelja*. Kiev: VVP «Kompas». (in Russian)
- Kuprij, V. P., Kulazhenko, Je. Ju., & Ghudkova, A. S. (2015). Modeljuvannja sumisnoji roboty konstrukciji krip-lennja kotlovanu ta gruntu z zastosuvannjam metodu skinchenykh elementiv (MSE). *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 7, 19-26. (in Ukrainian)
- Kuprij, V. P., & Tjutjkin, D. V. (2012). Modeljuvannja napruzhenno-deformovanogho stanu krip-lennja ghlybokogho kotlovanu. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 3, 89-94. (in Ukrainian)
- Tjapochkin, A. V. (2009). Gorizontaľnye peremeshhenija armogruntovyh nasypej. *Ispytanija i raschjoty konstrukcij transportnyh sooruzhenij. Nauchnye trudy OAO CNIIS*, 251, 69-74. (in Russian)
- Petrakov, A. A. (1995). *O raschetnyh modeljah nelinejno-deformiruemogo gruntovogo massiva*. Poltava: PTU. (in Russian)

Надійшла до редколегії 26.03.2020.

Прийнята до друку 11.05.2020.

◆ ◆ ◆ ◆ ◆
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Наукове видання
Збірник наукових праць
Дніпровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Випуск 17
(українською, англійською та російською мовами)

Відповідальні за випуск – О. Л. Тютюкін, Н. К. Бондаренко
Комп'ютерне верстання – В. Л. Рикіна
Статті в збірнику публікуються в авторській редакції

Формат 60×84 ¹/₈. Ум. др. арк. 7,95. Тираж 50 пр. Зам. № 14-дбж.

Видавництво ПП «Крос-Принт», 49047, м. Дніпро, пров. Верстатобудівельний, 3/4
Свідоцтво ДК №2804 від 26.03.2007 р.
Віддруковано: ФОП Удовиченко О. М., 49080, м. Дніпро, вул. Донецьке шосе, 15/531
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру ДК №3660 від 28.12.2009 р.

◆ ◆ ◆ ◆ ◆
BRIDGES AND TUNNELS: THEORY, RESEARCH, PRACTICE

Scientific edition
Collection of scientific works
of Dnipro National University
of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan
Issue 17
(in Ukrainian, English and Russian languages)

Responsible for issue – Oleksii Tiutkin, Nataliia Bondarenko
Desktop publishing – Vera Rykina
Articles in the collection are printed in the author's wording

Format 60×84 ¹/₈. Conventional printed sheet 7.95. Circulation 50. Order no. 14-dbg.

Publishing house «Kros-Prynt», 49047, Dnipro, Verstatobudivelnjnyj Lane, 3/4
Certificate ДК no. 2804 of 26.03.2007.
Printed: SP Udovychenko O. M., 49080, Dnipro, Doneckje shose Str., 15/531
Certificate of making a publishing business subject
to the State Register of Civil Code ДК no. 3660 of 28.12.2009.

◆ ◆ ◆ ◆ ◆
МОСТЫ И ТОННЕЛИ: ТЕОРИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРАКТИКА

Научное издание
Сборник научных трудов
Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна
Випуск 17
(на украинском, английском и русском языках)

Ответственные за выпуск – А. Л. Тютюкин, Н. К. Бондаренко
Компьютерная верстка – В. Л. Рыкина
Статьи в сборнике публикуются в авторской редакции

Формат 60×84 ¹/₈. Усл. печ. лист 7,95. Тираж 50 экз. Заказ № 14-дбж.

Издательство ПП «Крос-Принт», 49047, г. Днепр, пер. Станкостроительный, 3/4
Свидетельство ДК №2804 от 26.03.2007 г.
Отпечатано: ФЛП Удовиченко А. Н., 49080, г. Днепр, ул. Донецкое шоссе, 15/531
Свидетельство о внесении субъекта издательского дела
в Государственный реестр ДК №3660 от 28.12.2009 г.

