



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

*Випуск 170*

**Харків 2017**

## УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів залізничного транспорту, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe).

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті <http://jml2012.indexcopernicus.com>.

**Google Scholar профіль:** <https://scholar.google.com.ua>

**Веб-сторінка збірника:** <http://znp.kart.edu.ua>

### Реферативна база

"Наукова періодика України": <http://csw.kart.edu.ua>

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 5 від 27 червня 2017 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. №1328 (додаток 8)).

### Редакційна колегія

Головний редактор – Михалків Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Бабаєв М.М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Бойнік А.Б., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Бутько Т.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Ватуля Г.Л., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ  
Вовк Р.В., д.фіз.-мат.н., професор, УкрДУЗТ  
Воронін С.В., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ  
Ворожбіян М.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Даренський О.М., д.т.н., професор,  
УкрДУЗТ  
Каграманян А.О., к.т.н., доцент, УкрДУЗТ  
Лаврухін О.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Ломотько Д.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

Мартинов І.Е., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Мойсеєнко В.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Мороз В.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Огар О.М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Панченко С.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Приходько С.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Плугін А.А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Тартаковський Е.Д., д.т.н., професор,  
УкрДУЗТ  
Тимофеева Л.А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Фалендиш А.П., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

ISSN 1994-7852

Зареєстровано 2 червня 2007 р.  
у ISSN International Centre 20, Rue  
Bachaumont, 75002 PAPIIS, FRANCE

© Український державний університет  
залізничного транспорту, 2017

## ЗМІСТ

<i>Деревянко В. Н., Гришко А. Н.</i> Отходы промышленности – эффективное сырье для создания низкообжигового керамического композита	4
<i>Тимофеева Л. А., Волошина Л. В., Гордієнко П. М.</i> Аналіз технологічних параметрів процесу нанесення зносостійкого покриття	13
<i>Ягун В. Г., Краснов А. А.</i> Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги	20
<i>Ватуля Г. Л., Лобяк А. В., Черногиль В. Б.</i> Моделирование работы трубобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружении	32
<i>Єрмоленко Д. А., Демченко О. В.</i> Оцінка ефективності застосування високоміцного бетону в трубобетонних конструкціях	42
<i>Крот О. П., Ровенський О. І.</i> Ланцюги Маркова при моделюванні змішування компонентів у барабанній печі при спалюванні муніципальних відходів	48
<i>Хоменко І. В., Федосєєнко О. М., Стасюк І. В.</i> Підвищення надійності пристроїв РПН силових трансформаторів	60
<i>Гасій Г. М.</i> Експериментально-теоретичні дослідження напружено-деформованого стану плити структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції	72
<i>Альошинський Є. С., Огар О. М., Пестременко-Скрипка О. С.</i> Підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту України у системі міжнародних перевезень	78
<i>Лапенко О. І., Махінько А. В., Махінько Н. О.</i> До питання розрахунку тонкостінних конструкцій силосних споруд із високоміцних сталей	85
<i>Огульчанская Н. Р.</i> Повышение качества механической обработки железнодорожных рельсов шлифованием	93
<i>Кочкаръов Д. В.</i> Інженерні методи розрахунку залізобетонних статично невизначних стержневих систем	98
<i>Барабаш О. С., Ю. В. Попов Ю. В., Данченко Ю. М.</i> Вивчення впливу малих домішок поверхнево-активних та кремнійорганічних речовин на процеси твердіння епоксамінних зв'язуючих	104
<i>Воскобойников Д. Г.</i> Разработка технологии восстановления изнашиваемых поверхностей деталей подвижного состава	111
<i>Мельник Д. Ю.</i> Аналіз організаційних структур управління метрологічної діяльності	116
<i>Титар Д. А.</i> Аналіз системи управління якістю метрологічних робіт	121
<i>Давиденко О. О.</i> Критерій ефективності експлуатаційних втручань автодорожніх мостів	127
<i>Воскобійник О. П., Череднікова О. В.</i> Визначення параметрів напружено-деформованого стану легкобетонних комбінованих плит за некласичною зсувною моделлю	132

УДК 691.4:67.08

## ОТХОДЫ ПРОМЫШЛЕННОСТИ – ЭФФЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НИЗКООБЖИГОВОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА

Доктор техн. наук В. Н. Деревянко (ГВУЗ «ПГАСА»),  
канд. техн. наук А. Н. Гришко (ДГАЭУ)

## ВІДХОДИ ПРОМИСЛОВОСТІ – ЕФЕКТИВНА СИРОВИНА ДЛЯ СТВОРЕННЯ НИЗЬКОВИПАЛЮВАЛЬНОГО КЕРАМІЧНОГО КОМПОЗИТА

Доктор техн. наук В. М. Дерев'янюк (ДВНЗ «ПДАБА»),  
канд. техн. наук Г. М. Гришко (ДДАЕУ)

## INDUSTRIAL WASTE AS AN EFFECTIVE RAW MATERIAL FOR PRODUCING THE LOW-FIRED CERAMIC COMPOSITE

Doct. of techn. sciences V. N. Derevianko, Cand. of techn. sciences H. M. Hryshko

*Экспериментально подтверждено, что при полной замене природного суглинистого сырья на вторичные продукты обогащения ильменитовой руды Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) с добавлением 40 % ила ЦСА и 10 % железосодержащих отходов происходит увеличение прочностных показателей и снижение плотности и температуры обжига. При температуре 870 °С предел прочности при сжатии увеличивается с 14,5 до 21,89 МПа, плотность составляет 1350 кг/м<sup>3</sup>. Физико-химическими методами определено, что повышение прочностных показателей связано с образованием мональбита – 34,6 %; альбита – 4,3 %, геленита – 7,6 %.*

**Ключевые слова:** керамический кирпич, ил, железосодержащие отходы, техногенное сырье, прочность.

*Експериментально підтверджено, що при повній заміні природної суглинистої сировини на вторинні продукти збагачення ільменітової руди Вільногірського гірничо-металургійного комбінату (ВГМК) з додаванням 40 % мулу ЦСА і 10 % залізовмісних відходів відбувається збільшення показників міцності і зниження щільності і температури випалу. При 870 °С температура межі міцності при стисненні збільшується з 14,5 до 21,89 МПа, щільність становить 1350 кг/м<sup>3</sup>. Фізико-хімічними методами визначено, що підвищення міцнісних показників пов'язане з утворенням мональбіту – 34,6 %; альбіту – 4,3 %, геленіту – 7,6 %.*

**Ключові слова:** керамічна цегла, мул, залізовмісні відходи, техногенна сировина, міцність.

*Due to depletion of high-quality natural raw material resources combined with build-up of reserves of man-made industrial products, waste disposal problem becomes a topical issue particularly in the industrial regions. One of the ways to solve the industrial waste problem is to use wastes for producing ceramic materials. Investigated were compositions with various contents of components: secondary ilmenite ore concentration products from VGМК, sludge and iron-containing wastes. It has been found that the VGМК wastes are represented by finely dispersed particles, and local liquefaction areas occur at the temperature of 480-500°C. The basic sintering temperature is 1,050°C. It has been found that the increase of the sludge content in the molding*

compound from 30 to 40 % results in the decrease in the basic liquid phase amount occurrence temperature from 950 to 820°C, or by 13,6 %. Using the mathematical methods of experiment design a pattern has been determined of the strength and density variation depending on a molding compound composition, namely, the content of iron-containing waste and sludge. It has been experimentally confirmed that the complete replacement of natural clay-loam materials by secondary ilmenite ore concentration products from Volnogorsk Mining-and-Metallurgical Integrated Works (VGMK) with the addition of 40 % of CSA sludge and 10% of iron-containing waste results in both strength performance improvement and density and firing temperature reduction. At a temperature of 870°C, the ultimate compressive strength has been increased from 14,5MPa to 21,89MPa, and the density has reached 1350 kg/m<sup>3</sup>. Using physical and chemical methods it has been determined that the strength performance improvement is due to formation of monalbite – 34,6 %; albite – 4,3 %, gehlenite – 7,6 %.

**Keywords:** ceramic brick, sludge, iron-containing waste, man-made raw material, strength.

**Введение.** Промышленность керамических строительных материалов – одна из материалоемких и энергоемких отраслей производств Украины. Поэтому рациональное использование топлива, сырья и других материальных ресурсов становится решающим фактором её развития.

Использование отходов при производстве керамического кирпича было и остается актуальным, поскольку Днепропетровская область и соседние регионы, такие как Запорожская, Николаевская, являются крупными промышленными центрами Украины, в которых находятся металлургические, горнодобывающие, глиноземные и другие промышленные предприятия.

Так, на сегодняшний день на Вольногорском горно-металлургическом комбинате (ВГМК) накоплено более 3 млн т отходов, которые могут эффективно использоваться для производства керамического кирпича [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Большой вклад в разработку технологических принципов повышения качества керамических изделий внесли такие ученые, как И. А. Альперович, П. П. Будников, И. И. Мороз, П. И. Боженков, А. И. Августиник, В. И. Верещагин, А. Д. Шильцина, Ю. И. Гончаров, В. А. Кондратенко, Г. И. Горчаков, О. П. Мчедлов-Петросян, R. Roy,

G.W. Rrindley и др. Их работы известны широкому кругу специалистов [2-8].

На ООО «Богословский кирпичный завод» в связи с ограниченностью запасов природного сырья было принято решение использовать техногенные отходы промышленности при производстве керамического кирпича в качестве основного сырья [9]. Были использованы вскрышные породы, которые представлены в основном аргиллитами, и в качестве отощителя использовали отходы флотации.

При переработке железорудного сырья образуется большое количество железосодержащих отходов в виде пылей и шламов газоочистных сооружений агломерационных фабрик, доменных и сталеплавильных производств, выход которых составляет около 1 % от массы сырья и полуфабрикатов или 7-8 % конечного объема производства металлургических заводов. Содержание железа в твердых отходах агломерационного, доменного и сталеплавильного производства составляет 33-70 % в пересчете на приведенное, а из 1 млн т вторичных железосодержащих отходов может быть получено 450 тыс. т металла. Кроме того, в них отмечается большое количество щелочных металлов [10].

Было исследовано использование некарбонатных опок совместно с пылью газоочистки электрометаллургического производства. Подготовка порошка должна

осуществляться полусухим способом с наибольшей крупностью зерен 1-1,5 мм [11].

По результатам экспериментов, проводимых К. А. Лапуновой [11], установлено, что керамический черепок на основании опок обладает пониженной плотностью – 1250-1450 кг/м<sup>3</sup> при достаточной прочности 15-30 МПа. Огневая усадка составляет – 3-5 % [11].

Одним из направлений перспективного развития стеновой керамики является введение в состав сырьевой смеси флюсующих компонентов, которые обеспечивают повышение качества кирпича. Такими плавнями могут выступать отходы металлургической и химической промышленности, такие как фосфорные, доменные и ваграночные шлаки, бокситовый шлам. Благодаря сравнительно низкой температуре плавления эти материалы способствуют образованию большого количества расплава, интенсифицируют процесс спекания [12-15]. Такие отходы имеются и в Украине в виде красных шламов Николаевского глиноземного завода (НГЗ) и Запорожского алюминиевого комбината (ЗАЛК), пыли газоочистки ПАО «Интерпайп Днепр Втормет».

**Определение цели и задач исследований.** Улучшить физико-механические свойства керамического кирпича за счет научнообоснованного использования сырья техногенного происхождения.

**Основная часть исследований.** Эффективность использования вторичных продуктов обогащения ильменитовой руды ВГМК совместно с илом Центральной станции аэрации (ЦСА) оценивалась по показателям прочности, плотности и водопоглощения.

Подготовка сырьевых компонентов осуществлялась следующим образом: вторичные продукты обогащения ильменитовой руды ВГМК – в соответствии с ГОСТ 21216.0-93 „Сырье глинистое. Общие требования к методам анализа”; ил

ЦСА подвергался предварительному измельчению в мельнице, затем просеивался через сито № 1. К тщательно перемешанным материалам добавлялась вода, необходимая для обеспечения нормальной формовочной влажности в пределах от 16 до 18 %. Из полученной массы формовали образцы, высушивали в сушильном шкафу при температуре 105-110 °С и обжигали в печи при температуре 800-870 °С.

Нами были исследованы составы с различным содержанием компонентов: контрольный (без добавки отходов); сырьевые смеси, содержащие 70, 50, 60 % вторичных продуктов обогащения ильменитовой руды ВГМК, 20, 30, 40 % ила ЦСА и 5, 10 % железосодержащего отхода соответственно.

С целью установления оптимального соотношения вводимого количества компонентов и сокращения количества опытов в работе был применен симплекс-решетчатый метод планирования эксперимента. За исходные параметры было принято содержание компонентов сырьевой смеси. За  $X_1$  принято содержание в сырьевой смеси отходов ВГМК, за  $X_2$  – содержание в сырьевой смеси ила ЦСА, за  $X_3$  – содержание в сырьевой смеси железосодержащего отхода. За выходные параметры приняты предел прочности при сжатии после обжига материала при температуре 800°С, 850°С и 870°С, а также показатели средней плотности и водопоглощения полученного материала.

По полученным результатам исследований и формулам были рассчитаны коэффициенты влияния при температурах 800°С, 850°С и 870°С для сырьевой смеси на основе отходов ВГМК, ила ЦСА и железосодержащих отходов и получены математические модели адекватно описывающие зависимость прочности на сжатие и плотности керамического материала при изменении его состава:

$$R_{сж}^{870^{\circ}C} = 18,1 X_1 + 15,1 X_2 + 14,5 X_3 + 4,8 X_1X_2 + 22,36 X_1X_3 + 23,56 X_2X_3 - 13,11 X_1X_2X_3 .$$

$$\rho = 1400 X_1 + 1300 X_2 + 1420 X_3 - 80 X_1X_2 - 80 X_2X_3 + 390 X_1X_2X_3 .$$

По полученным моделям построены диаграммы «состав – прочность при сжатии», представленная на рис.1, а также

диаграмма «состав – плотность», представленная на рис. 2.

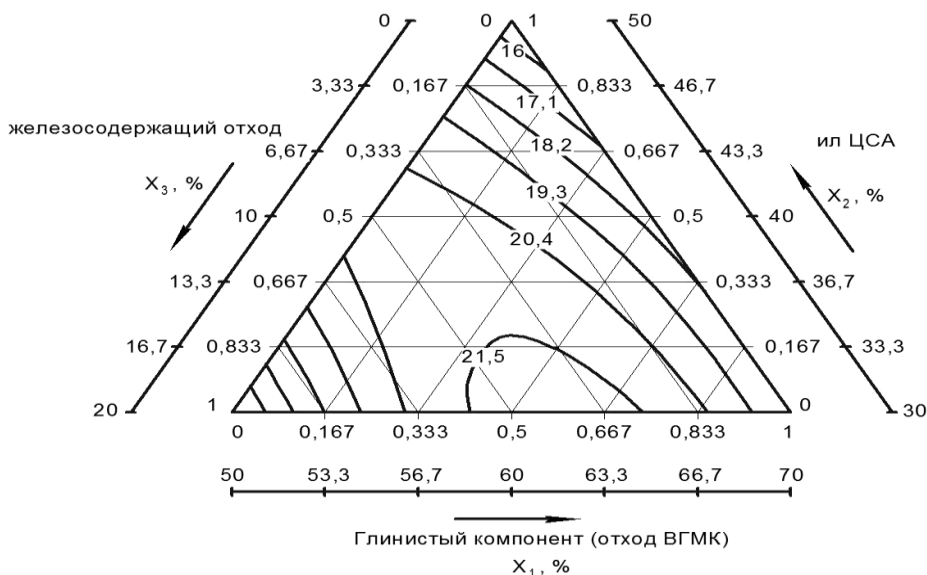


Рис. 1. Диаграмма состояния «состав – предел прочности при сжатии» для материала на основе отходов ВГМК, ила ЦСА и железосодержащих отходов, t=870 °C

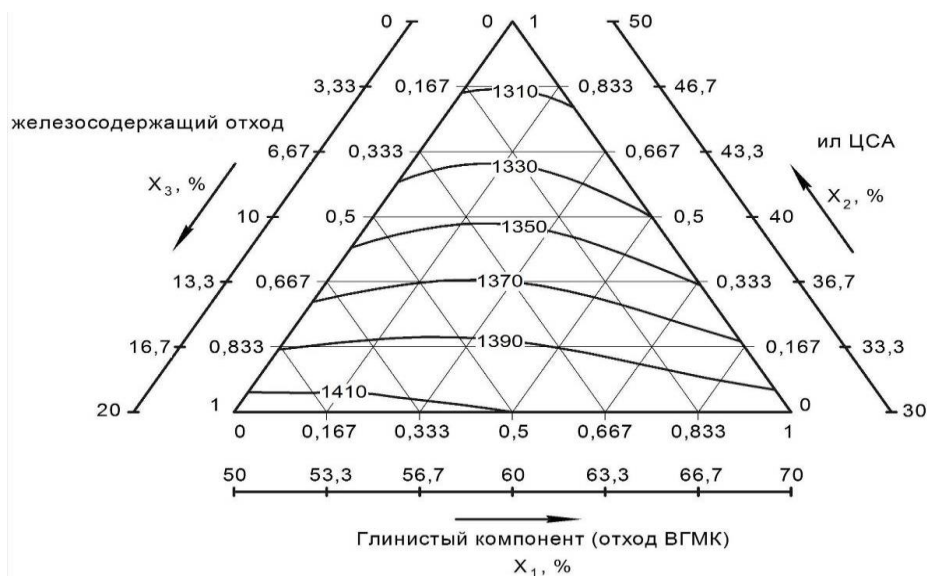


Рис. 2. Диаграмма состояния «состав – плотность» для материала на основе отходов ВГМК, ила ЦСА и железосодержащих отходов, t=870 °C

Полная замена природного суглинистого сырья на тонкодисперсную песчано-глинистую смесь – вторичные продукты обогащения ильменитовой руды ВГМК с добавлением в качестве выгорающей добавки – ила ЦСА, в качестве пластифицирующей добавки – железосодержащего отхода позволяет получить предел прочности при сжатии образцов, высушенных при температуре 100 °С – 5,0 МПа.

Из всех проведенных исследований наиболее высокие прочностные показатели имеет сырьевая смесь, состоящая из 50 % отхода ВГМК, 40 % ила ЦСА и 10 % железосодержащего отхода. Прочность при сжатии при температуре 800 °С составляет

13,16 МПа, при температуре 870 °С – 20,69 МПа. Средняя плотность – 1350-1420 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение – 14 %.

Появление расплава при взаимодействии соединений натрия и железа с частицами кремнезема различного уровня, а также дегидратированными и глинистыми частицами обеспечивает интенсификацию процессов спекания.

Макро- и микроструктура материала, обожженного при температуре 870 °С, состоящего из отходов обогащения ильменитовой руды ВГМК – 50 %, ила ЦСА – 40 %, железосодержащего отхода – 10 %, представлена на рис. 3. Химический состав участка «а» представлен на рис. 4.

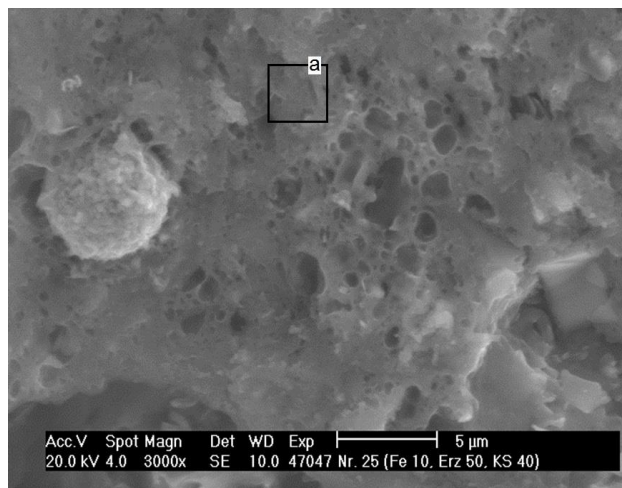
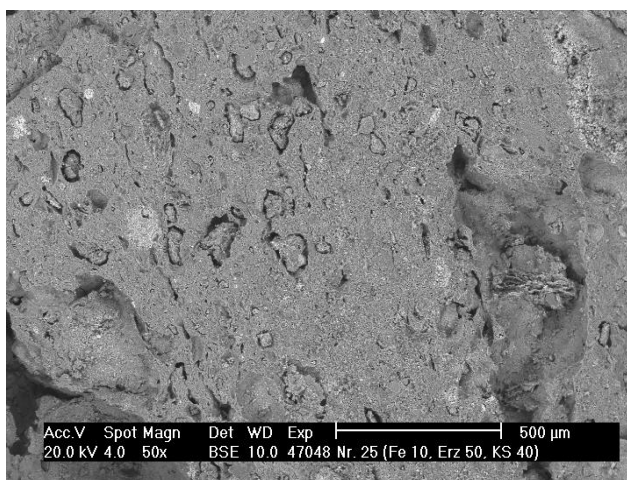
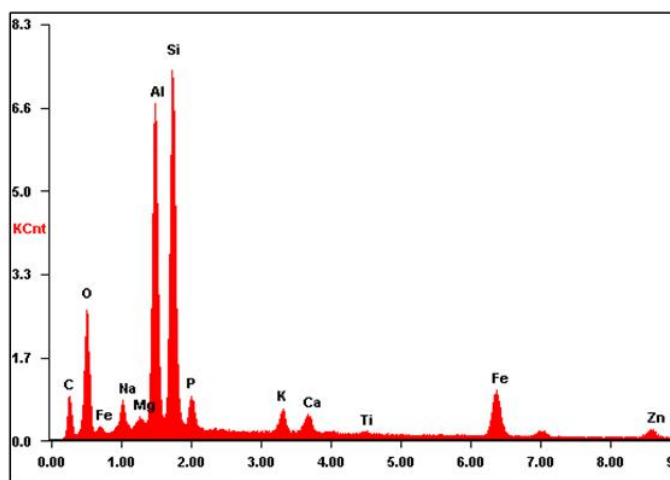


Рис. 3. Микроструктура материала, обожженного при температуре 870 °С, состоящего из отходов обогащения ильменитовой руды ВГМК – 50 %, ила ЦСА – 40 %, железосодержащего отхода – 10 %



Element	Wt %	Mol %
Na	03.13	03.96
Mg	00.90	01.76
Al	30.16	23.16
Si	42.35	55.19
P	04.94	02.73
K	01.74	01.44
Ca	01.84	02.57
Ti	00.27	00.27
Fe	10.96	05.37
Zn	03.70	03.56

Рис. 4. Химический состав участка «а» образца на рис. 3 микрофотографии



Нижче приведені (рис. 5, 6) рентгенофазові аналізи матеріала, отриманого при температурах 105 і 870°C, наступного сирового складу: відходи обогачення ільменитової руди ВГМК – 50 %, іл ЦСА – 40 %, залізоїстотний відход – 10 %.

По результатам рентгенофазового аналізу матеріала, висушеного при температурі 105 °С, наступного сирового складу: відходи обогачення ільменитової руди ВГМК – 50 %, іл ЦСА – 40 %, залізоїстотний відход – 10 % присутствующі наступні мінерали:

- каолінит ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) – 47,8 % ( $d/n=0,714; 0,436; 0,409; 0,357; 0,2559; 0,11975; 0,11788; 0,1539; 0,1487; 0,128; 0,1235$  нм);
- кварц ( $\text{SiO}_2$ ) – 32,7 % ( $d/n=0,424; 0,334; 0,245; 0,228; 0,223; 0,212; 0,1975;$

- $0,1813; 0,1668; 0,1539; 0,145; 0,1372; 0,128; 0,125; 0,11978; 0,11822; 0,1151; 0,1113$  нм);
- магнетит ( $\text{Fe}_{2,936}\text{O}_4$ ) – 8,4 % ( $d/n=0,483; 0,297; 0,252; 0,109$  нм);
- магнезіоферрит ( $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ) – 1,9 % ( $d/n=0,483; 0,296; 0,252; 0,210; 0,139; 0,132$ );
- гидротальцит  
( $(\text{Mg}_{0,667}\text{Al}_{0,333})(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_{0,167}(\text{H}_2\text{O})_{0,5}$ ) – 5,1 % ( $d/n=0,766; 0,378; 0,239; 0,131$  нм);
- рутил ( $\text{TiO}_2$ ) – 2,7 % ( $d/n=0,323; 0,115; 0,109$  нм);
- кальцит ( $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ) – 1,4 % ( $d/n=0,302; 0,1869; 0,1601$  нм).

Рентгенофазовий аналіз матеріала, обожженого при температурі 870 °С, наступного сирового складу: відходи обогачення ільменитової руди ВГМК – 50 %; іл ЦСА – 40 %; залізоїстотний відход – 10 %, представлений на рис. 6.

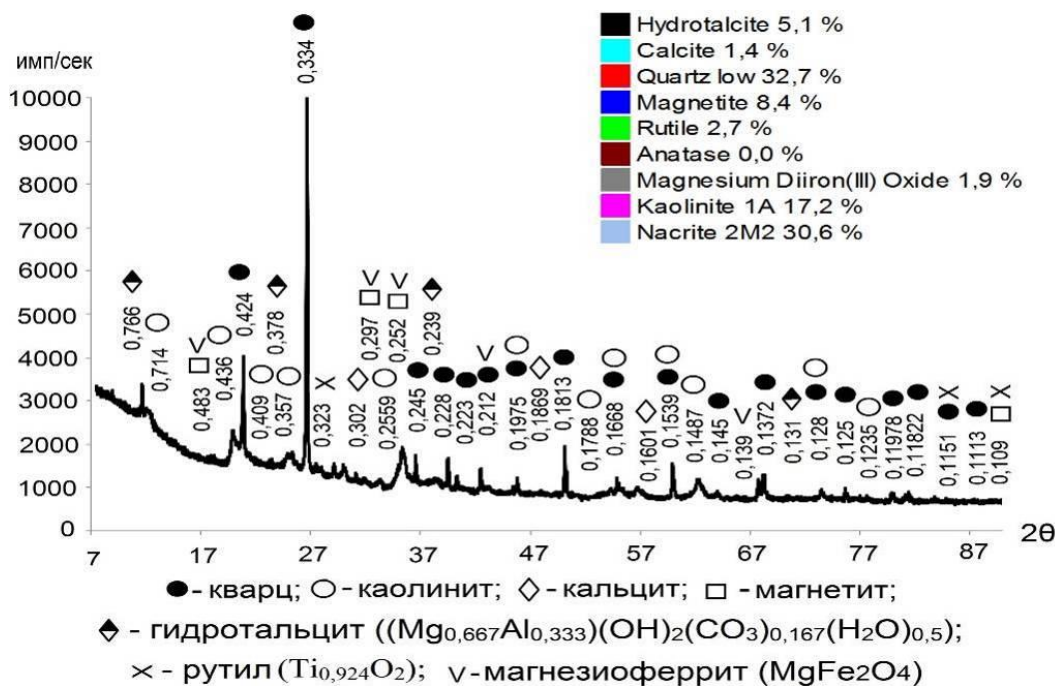


Рис. 5. Дифрактограма матеріала, отриманого при температурі 105 °С, наступного сирового складу, мас. %: відходи обогачення ільменитової руди ВГМК – 50; іл ЦСА – 40; залізоїстотний відход – 10

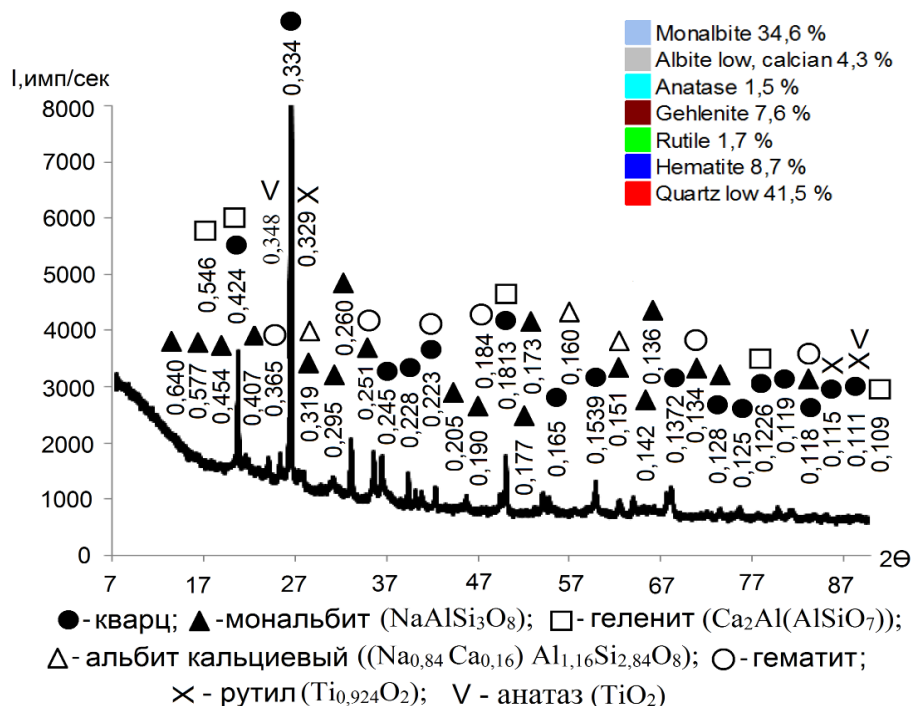


Рис. 6. Рентгеновская дифрактограмма материала, полученного при температуре 870 °С, следующего сырьевого состава, мас. %: отходы обогащения ильменитовой руды ВГМК – 50; ил ЦСА – 40; железосодержащий отход – 10

По результатам рентгеновского анализа в материале присутствуют следующие минералы:

- кварц ( $\text{SiO}_2$ ) – 41,5 % ( $d/n=0,424$ ; 0,334; 0,245; 0,228; 0,223; 0,1813; 0,165; 0,1539; 0,1372; 0,128; 0,125; 0,1226; 0,11978; 0,11822; 0,1151; 0,1113 нм);

- мональбит ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) – 34,6 % ( $d/n=0,640$ ; 0,577; 0,454; 0,407; 0,319; 0,295; 0,260; 0,251; 0,205; 0,190; 0,177; 0,173; 0,151; 0,142; 0,136; 0,134; 0,128; 0,118 нм);

- альбит кальциевый ( $(\text{Na}_{0,84}\text{Ca}_{0,16})\text{Al}_{1,16}\text{Si}_{2,84}\text{O}_8$ ) – 4,3 % ( $d/n=0,319$ ; 0,160; 0,151 нм);

- гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – 8,7 % ( $d/n=0,365$ ; 0,269; 0,251; 0,243; 0,220; 0,184; 0,169; 0,148; 0,1455; 0,135; 0,131; 0,118; 0,114; 0,101 нм);

- геленит ( $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$ ) – 7,6 % ( $d/n=0,546$ ; 0,422; 0,288; 0,181; 0,132; 0,122; 0,114; 0,109 нм);

- рутил ( $\text{Ti}_{0,924}\text{O}_2$ ); – 1,7 % ( $d/n=0,329$ ; 0,114 нм);

- анатаз ( $\text{TiO}_2$ ); – 1,5 % ( $d/n=0,348$ ; 0,189; 0,135; 0,11 нм).

Обнаруженные тройные соединения, в частности в виде геленита, подтверждаются данными системы  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  по Э. Осборну и М. Муану [16-18]. Это соединение плавится без разложения при температуре 1590 °С и не имеет полиморфных разновидностей.

Также данными системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  по Осборну и Муану согласно диаграмме состояния подтверждается наличие мональбита [16].

Исследованиями Фергусона [17] доказано, что типичный пример превращения «порядок – беспорядок» представляет «диморфизм»  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ . Маккензи доказывал непрерывный характер рассматриваемого превращения [18].

**Выводы из исследований и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** Установлено, что отходы ВГМК

представлены высокодисперсными частицами и поэтому локальные образования жидкой фазы появляются при температурах 480-500 °С. Основная температура спекания составляет 1050 °С. Определено, что увеличение содержания ила в формовочной массе с 30 до 40 % снижает температуру формирования основного количества жидкой фазы с 950 до 820 °С, то есть на 13,6 %.

С применением математических методов планирования экспериментов установлены закономерности изменения прочности и плотности в зависимости от состава формовочной массы, а именно от содержания железосодержащего отхода и ила.

В составе на основе вторичных продуктов обогащения ильменитовой руды

ВГМК увеличение ила до 40 %, а железа до 10 % приводит к увеличению прочности на 51,6 %, средняя плотность при этом снижается с 1450 до 1350 кг/м<sup>3</sup>, то есть на 7,4 %. Прочность стенового материала на основе отходов ВГМК, обожженного при 870 °С, повышается на 157 % с 8,5 МПа до 21,49 МПа по сравнению с материалом, термообработанным при 500 °С.

Проведенным рентгенофазовым анализом выявлено, что в интервале температур 630-850 °С в образцах, изготовленных из оптимального состава, в контактных зонах образовались новые соединения: мональбит – 36,4 %, альбит – 4,3 % и геленит – 7,6 %, повысившие его прочность.

#### *Список использованных источников*

1. Науковообґрунтоване використання сировини техногенного походження в технології виробництва будівельних матеріалів [Текст] / А. П. Приходько, Н. С. Сторчай, Д. О. Маляр [та ін.] // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. – Вип. 59. – С. 208-213.
2. Деревянко, В. Н. Структура и свойства керамического кирпича, модифицированного техногенными минеральными системами [Текст] / В. Н. Деревянко, А. Н. Гришко, Ю. Н. Вечер // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 7 (220). – С. 21-28.
3. Деревянко, В. Н. Зависимость температуры обжига суглинки от содержания органи и щелочезелесодержащих систем [Текст] / В. Н. Деревянко, А. Н. Гришко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : Зовнішпрекламсервіс, 2015. – Вип. 60. – С. 71-78.
4. Факторы пористости керамического кирпича на основе техногенного сырья [Текст] / В. Н. Деревянко, А. Н. Гришко, Л. В. Мороз [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2016. – Вып. 90. – С. 97-104.
5. Кондратенко, В. А. Современная технология и оборудование для производства керамического кирпича полусухого прессования [Текст] / В. А. Кондратенко, В. Н. Пешков // Строительные материалы. – 2003. – № 2. – С. 18-19.
6. Мчедлов-Петросян, О. П. Химия неорганических строительных материалов [Текст] / О. П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1988. – 304 с.
7. Roy R. Metastable and Stable dehydration reactions in clays and reolites 7 th Silicof / R. Roy – Budapest: Akad, Kiado, 1965. – P. 141-154.
8. Rrindley G. W. Kinetics of dehydroxylation of kaolinite and halloysite / G. W. Rrindley, M. Nakahira // J. Am. Ceram. Soc. – 1957. – № 40. – P. 346-350.
9. Эколого-экономические аспекты сырьевых инноваций в производстве кирпича [Текст] / Т. П. Кузнецова, Г. В. Исмагилова, Н. Р. Кельчевская [и др.] // Строительные материалы. – 2007. – № 9. – С. 18-19.

10. Abdeev M. A. Waelz zinc-leadcontaining materials / M. A. Abdeev, A. V. Kolesnikov, N. N. Ushakov. – М.: Metallurgiya, 1985. – 120 p.
11. Лапунова, К. А. Фигурный керамический кирпич на основе опок: классификация и производство [Текст] / К. А. Лапунова, В. Д. Котляр, Ю. В. Терехина // Строительные материалы. – 2011. – № 12. – С. 17-19.
12. Герасимов, В. В. Шлаки фосфорного производства как модификаторы керамических материалов [Текст] / В. В. Герасимов, В. А. Ефимова // Современные проблемы строительного материаловедения: 2 Академические чтения Рос. акад. архит. и строит. наук : материалы Междунар. научн.-техн. конф. [Казань, 1996]. – Казань, 1996. – Ч. 2. – С. 47-48.
13. Применение фосфорных шлаков в производстве стеновой керамики [Текст] / А. Н. Емельянов [и др.] // Технич. инф. Сер. Промышленность керамических стеновых материалов и пористых заполнителей. – М.: ВНИИЭСМ, 1973. – Вып. 7. – С. 19.
14. Мавлянов, А. С. Керамический материал на основе побочных продуктов промышленности [Текст] / А. С. Мавлянов // Строительные материалы из попутных продуктов промышленности. – Л., 1978. – С. 58-62.
15. Дементьев, В. Г. Опыт использования попутных продуктов промышленности в производстве стеновой керамики [Текст] / В. Г. Дементьев, А. А. Макаров, С. В. Кравченко // Реконструкция. – С.-Петербург – 2005 : Материалы 3 Междунар. симпоз., Санкт-Петербург 16-20 мая 1994 г. – СПб., 1995. – С. 211-215.
16. Диаграммы состояния силикатных систем. Вып. 3. Тройные силикатные системы [Текст]: справочник / Н. А. Торопов, В. П. Барзаковский, В. В. Лапин [и др.]. – Л.: Наука, Ленингр. отд., 1972. – 448 с.
17. Ferguson R. B. The crystal structure of low-temperature and high-temperature albites / R. B. Ferguson, R. J. Traill, W. H. Taylor // Actacrytallogr. –1958. – V. 11. – P. 331.
18. MacKenzie W. S. The crystalline modification of  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  / W. S. MacKenzie // Amer. Journ. Sci. – 1957. – V. 255. – P. 481-516.

---

Дерев'янюк Віктор Миколайович, д-р техн. наук, професор, кафедра технології будівельних матеріалів, виробів і конструкцій Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Тел. +38(0562) 47-16-22. E-mail: derev@mail.pgasa.dp.ua.

Гришко Ганна Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації гідромеліоративних систем і технологій будівництва Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. Тел. +38(0562) 713-51-37. E-mail: gryshko.anna0101@gmail.com.

Derevianko Viktor Mykolaevich, Doct. of techn. Sciences, professor department of technology of construction materials, products and designs, State Institution of Higher Education "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture". Tel. +38 (0562) 47-16-22. E-mail: derev@mail.pgasa.dp.ua.

Hryshko Hanna Mykolayvna, Cand. of techn. Sciences, department of operation of hydromelioration systems and construction technology, Dnipropetrovsk State Agrarian-Economic University. Tel. +38 (0562) 713-51-37. E-mail: gryshko.anna0101@gmail.com.

Стаття прийнята 05.06.2017 р.

УДК 669.056.9

**АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ  
ЗНОСОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ**

Д-р техн. наук Л. А. Тимофеева, асист. Л. В. Волошина, П. М. Гордієнко

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ**

Д-р техн. наук Л. А. Тимофеева, ассист. Л. В. Волошина, П. М. Гордиенко

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PROCESS WEARPOOF OF  
COVERAGE**

Doct. of techn. sciences L. Timofeeva, assist. L. Voloshyna, P. Gordienko

*Проведено аналіз технологічних параметрів процесу нанесення зносостійкого покриття. Виконано металографічні, лабораторні дослідження на знос, рентгеноспектральний та фазовий аналіз покриття, яке наноситься із водних розчинів солей на залізовуглецеві сплави, що працюють в умовах тертя. Встановлено залежності між технологічними параметрами процесу та експлуатаційними властивостями утвореного покриття.*

**Ключові слова:** моделювання технологічних параметрів, експлуатаційні властивості, зносостійкі покриття, паротермічна обробка сплавів, зносостійкість, мікроструктура сплавів.

*Проведен анализ технологических параметров процесса нанесения износостойкого покрытия. Выполнены металлографические, лабораторные исследования на износ, рентгеноспектральный и фазовый анализ покрытия, которое наносится из водных растворов солей на железоуглеродистые сплавы, работающие в условиях трения. Установлены зависимости между технологическими параметрами процесса и эксплуатационными свойствами образованного покрытия.*

**Ключевые слова:** моделирование технологических параметров, эксплуатационные свойства, износостойкие покрытия, паротермическая обработка сплавов, износостойкость, микроструктура сплавов.

*The work carried out analysis of technological parameters of process formed of wearpoof of coverage. Completed metallographic, laboratory tests for wear, and X-ray phase analysis coating that is applied to water solutions of salts ironcarbon alloys, working in conditions of friction. The established dependens between technological parameters of process and operation properties formed coverage.*

*Thus, the carried-out analysis allows to predict changes of quality of a surface depending on change of parameters of new technological process.*

**Keywords:** modeling process parameters, operating properties, wearpoof of coverage, vapourthermal treatment of alloys, wear resistance, microstructure alloys.

**Вступ.** У наш час у світовій практиці розроблено ряд методів підвищення трибо-

технічних властивостей матеріалів [1]. Особливу увагу приділяють тим методам та

способам, які забезпечують не тільки досягнення заданих властивостей, але й гарантують екологічну чистоту технологічного процесу [2, 3].

Перспективним напрямком підвищення зносостійкості пар тертя є метод хіміко-термічної обробки залізвуглецевих сплавів з використанням водних розчинів солей [4].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У більшості випадків техніка виходить з ладу внаслідок зносу вузлів тертя: руйнується тільки робоча поверхня деталі, яку можна захистити нанесенням шару матеріалу зі спеціальними властивостями. Аналіз методів [5], що використовуються для покращення експлуатаційних властивостей робочої поверхні, показує, що вони трудомісткі, тривалі, вимагають застосування шкідливих, дефіцитних хімікатів і складного обладнання. У дослідженні пропонується застосування водного розчину алюмохромфосфатної солі (АХФС) [6] з використанням технології обробки деталей у парогазовому середовищі для підвищення триботехнічних властивостей пари тертя шестірня – корпус, що веде до подовження строку служби масляного насоса системи змащення двигунів внутрішнього згоряння [5].

**Визначення мети та задачі дослідження.** Дані дослідження спрямовані на визначення оптимальних параметрів технологічного процесу нанесення покриттів та визначення їх впливу на триботехнічні властивості пар тертя. Досягти цього пропонується за рахунок виконання моделювання показників: концентрації діючої речовини, часу витримки та температури обробки. Визначено провести металографічне дослідження утворених після обробки покриттів для визначення наявності елементів та фаз і дослідити їх вплив на триботехнічні властивості пари тертя. Після нанесення покриття провести дослідження впливу утвореного

поверхневого шару на триботехнічні властивості пари тертя, а саме зносостійкість, значення коефіцієнта тертя, припрацьовуваність.

**Основна частина дослідження.** Відомо, що технологічні параметри впливають на формування поверхневого шару при хіміко-термічній обробці [1]. Для визначення оптимальних параметрів нового способу нанесення покриття, залежно від експлуатаційних умов роботи пари шестірня - корпус масляного шестеренного насоса двигунів внутрішнього згоряння, були змодельовані дані властивостей покриття залежно від параметрів технологічного процесу.

Як було виявлено за попередніми лабораторними дослідженнями, коли концентрація солі у водному розчині наближається до нуля, зносостійкість зменшується, в той самий час концентрація солі більша за 20 % призводить до відшарування покриття.

Тривалість витримки при обробці є дуже важливою, оскільки недостатній час на обробку не дає можливості повноцінно утворитися дифузійному шару, від якого залежать властивості поверхні контакту пар тертя, а також утворити необхідну товщину покриття для збільшення зносостійкості. При надмірному часі витримки утворюється занадто товстий шар покриття, погіршується адгезія покриття з основним металом, і зменшення коефіцієнта лінійного розширення покриття призводить до відшарування останнього при підвищенні температури в зоні контакту.

Таким чином, було прийнято, що технологічні параметри процесу обробки деталей мають варіюватися в таких межах: концентрація АХФС в насичувальному середовищі в межах 2 – 20 %; час витримки деталей у насичувальному середовищі – від 10 до 100 хв; температура насичувального середовища змінювалася від 250 до 700 °С.

Моделювання дасть змогу визначити діапазон значень параметрів технологічного процесу, за рахунок зміни яких можна

досягти найкращих експлуатаційних і триботехнічних властивостей, а саме утворення оптимальної товщини покриття, мінімальних значень зносу, оптимального часу припрацювання, витримки максимального навантаження до утворення задирів.

Для встановлення залежностей між параметрами технології нанесення покриттів із парогазового середовища та експлуатаційними властивостями покриття (зносом, коефіцієнтом тертя, товщиною покриття) було виконано множинний регресійний аналіз [7] за допомогою програми Statistica. Технологічні параметри процесу обробки деталей варіювалися в таких межах: концентрація ( $C$ ) АХФС у насичувальному середовищі – в межах 2-20 %; час витримки деталей ( $\tau$ ) в насичувальному середовищі – від 10 до 100 хв; температура ( $t$ ) насичувального середовища змінювалася від 250 до 700 °С.

Аналізуючи одержані в ході моделювання залежності, визначили, що оптимальні експлуатаційні властивості поверхні (рис. 1, 2) пари тертя шестірня – корпус масляного шестеренного насоса системи змащення двигунів внутрішнього згорання забезпечуються застосуванням запропонованої технології поверхневої обробки, коли технологічні параметри перебувають у межах: температура обробки в насичувальному середовищі  $t$  – від 550 до 650 °С, час витримки в насичувальному середовищі  $\tau$  – від 30 до 40 хв, концентрація  $C\text{rAl}_3(\text{H}_2\text{PO}_4)_{8,8-9,6}$  у водному розчині  $C$  – від 8 до 14 %.

Для проведення металографічних та лабораторних досліджень на знос хіміко-термічна обробка виконувалася на зразках, виготовлених із сірого чавуну, і сталі 40Х, що використовуються для виготовлення пари тертя шестірня – корпус масляного шестеренного насоса. Основними параметрами технологічного процесу нанесення покриттів із парогазового середовища є температура обробки деталей, концентрація солі у водному

розчині та час витримки в насичувальному середовищі. Від цих параметрів залежить формування поверхневого шару, а також його експлуатаційні властивості.

Обробка поверхні матеріалів здійснювалася перегрітою парою водного розчину АХФС концентрацією 10 % при температурі  $600\pm 20^\circ\text{C}$ , час витримки в насичувальному середовищі склав 40 хв, з наступним охолодженням у маслі.

Металографічні дослідження зразків проводилися за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 та мікроскопа „НЕОРНОТ 2” на прямих та косих шліфах до травлення поверхні і після. Рентгеноспектральний аналіз зразків проводився на сканувальному вакуумному кристал-дифракційному спектрометрі „Спрут”-В у діапазоні довжин хвиль  $0,4\div 11\text{\AA}$ . Дослідження фазового складу зразків виконувалося на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4.

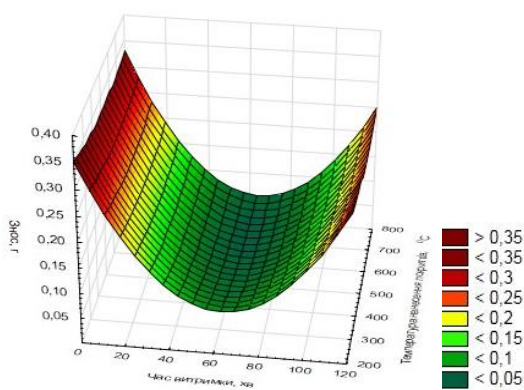
Результати аналізу показали, що після нанесення покриття на поверхні зразків виявили наявність таких хімічних елементів як алюміній  $\text{Al}=0,5\%$ ; фосфор  $\text{P}=1,37\%$ ; хром  $\text{Cr}=0,47\%$ .

Як показали результати фазового дослідження, основними фазами (кристалічними) на сталевих і на чавунних зразках є  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Насамперед потрібно звернути увагу на фон, який збільшується із зростанням кута дифракції, що є характерним для матеріалів, які мають у своєму складі значний відсоток аморфної складової.

Після нанесення покриття були проведені дослідження впливу утвореного поверхневого шару на триботехнічні властивості пари тертя, а саме зносостійкість, значення коефіцієнта тертя, припрацьовуваність.

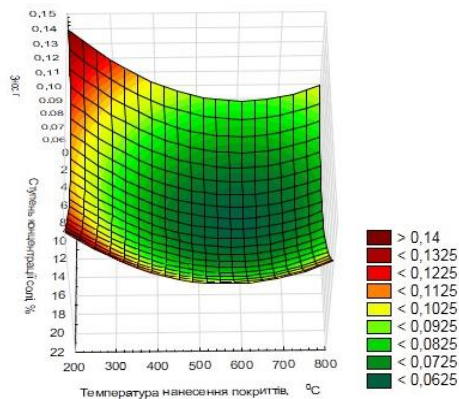
Дослідження проводилися на машині тертя МІ-1 у маслі М10Г2, зі зміною навантаження від 490 Н до 1961 Н, при фіксованому значенні часу випробування.





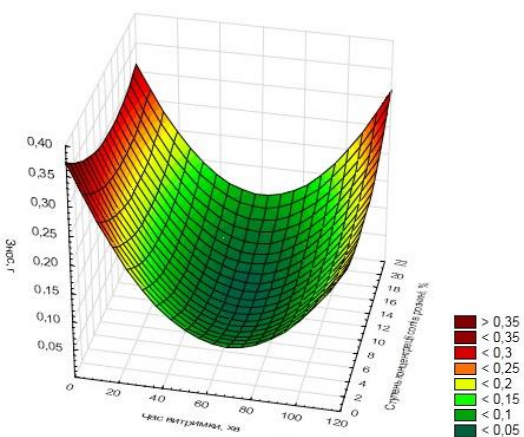
$$J(\tau, t) = 0,3936 - 0,0083 \cdot \tau - 0,0003 \cdot t + 6,5483 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 - 2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot \tau \cdot t + 2,154 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$$

а)



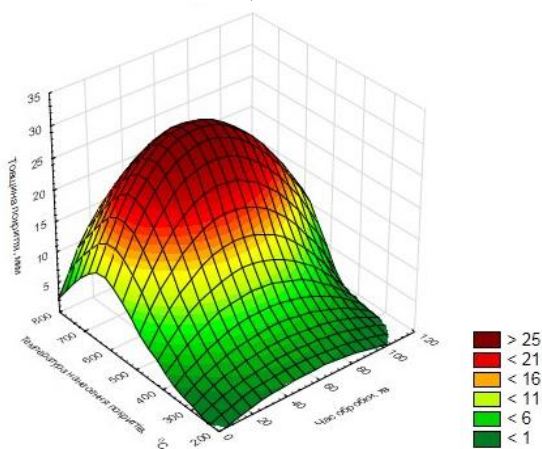
$$J(t, C) = 0,2017 - 0,0064 \cdot t - 0,0004 \cdot C + 0,0003 \cdot t^2 + 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot C + 3,0182 \cdot 10^{-7} \cdot C^2$$

б)



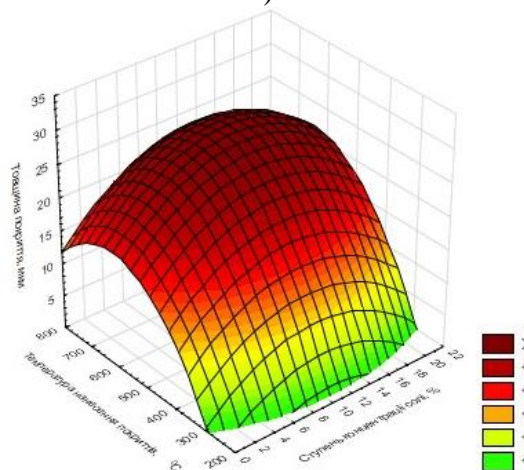
$$J(\tau, C) = 0,3732 - 0,0082 \cdot \tau - 0,0124 \cdot C + 5,9566 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 + 4,9533 \cdot 10^{-5} \cdot \tau \cdot C + 0,0004 \cdot C^2$$

в)



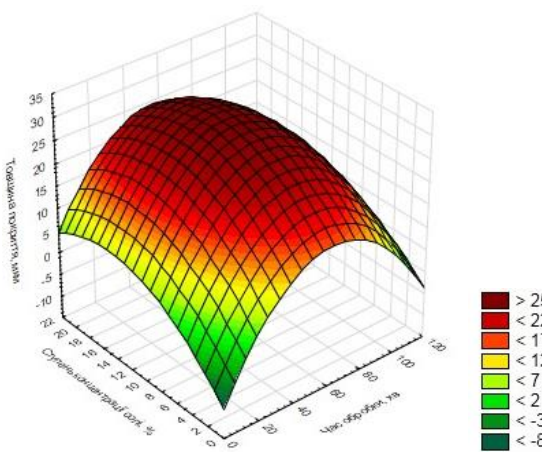
$$h(\tau, t) = -30,0767 + 0,3457 \cdot \tau + 0,1056 \cdot t - 0,0034 \cdot \tau^2 + 6,2222 \cdot 10^{-5} \cdot \tau \cdot t - 5,3939 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$$

г)



$$h(C, t) = -43,8522 + 1,268 \cdot C + 0,1991 \cdot t - 0,0647 \cdot C^2 + 0,0006 \cdot C \cdot t - 0,0002 \cdot t^2$$

д)

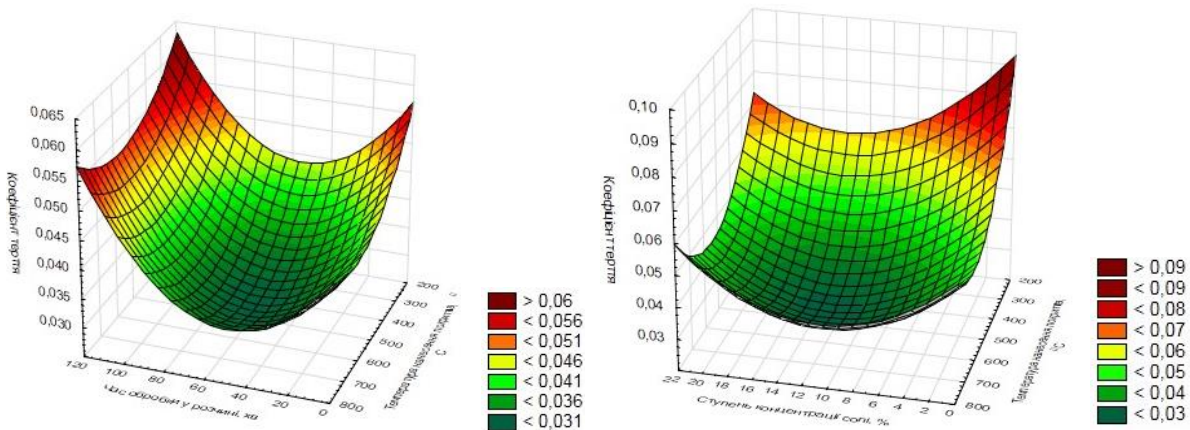


$$h(\tau, C) = -873944 + 0,7727 \cdot \tau + 2,3086 \cdot C - 0,0061 \cdot \tau^2 - 0,0035 \cdot \tau \cdot C - 0,078 \cdot C^2$$

е)

Рис. 1. Залежності параметрів покриття від технологічних параметрів процесу обробки: а – зносу  $J$  від ступеня концентрації розчину  $C$ ; б – зносу  $J$  від температури обробки,  $t$ ; в – зносу  $J$  від часу витримки в насичувальному середовищі  $\tau$ ; г – товщини покриття  $h$  від ступеня концентрації розчину  $C$ ; д – товщини покриття  $h$  від часу витримки в насичувальному середовищі  $\tau$ ; е – товщини покриття  $h$  від температури обробки  $t$



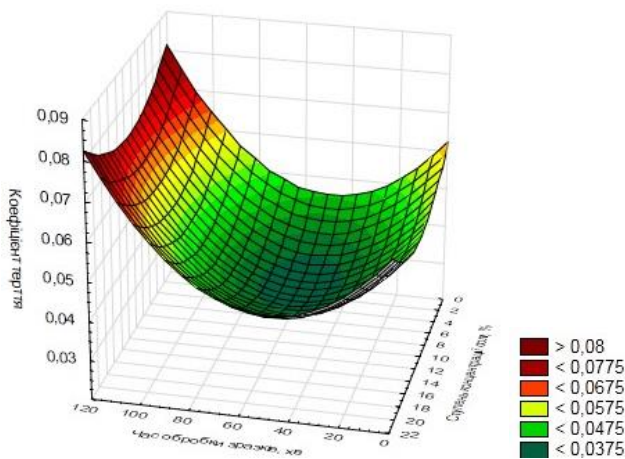


$$f_{тр}(t, \tau) = 0,0742 - 0,0005 \cdot t - 0,0001 \cdot \tau + 4,5038 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 8,6538 \cdot 10^{-8} \cdot t \cdot \tau + 8,2727 \cdot 10^{-8} \cdot \tau^2$$

а)

$$f_{тр}(t, C) = 0,1434 - 0,0046 \cdot t - 0,0003 \cdot C + 0,0002 \cdot t^2 + 1,701 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot C + 2,401 \cdot 10^{-7} \cdot C^2$$

б)



$$f_{тр}(\tau, C) = 0,0626 - 0,0007 \cdot \tau - 0,0019 \cdot C + 7,178 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^2 + 3,3058 \cdot 10^{-8} \cdot \tau \cdot C + 8,6364 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$$

в)

Рис. 2. Залежність коефіцієнта тертя від технологічних параметрів процесу обробки: а – зносу коефіцієнта тертя  $f_{тр}$  від температури обробки  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , та часу витримки в насичувальному середовищі  $\tau$ , хв; б – коефіцієнта тертя  $f_{тр}$  від температури обробки  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , та ступеня концентрації розчину  $C$ , %; в – коефіцієнта тертя  $f_{тр}$  від часу витримки в насичувальному середовищі  $\tau$ , хв, та ступеня концентрації розчину  $C$ , %

Дослідженням було передбачено одержання характеристик зносу залежно від часу випробування, порівняння характеру і величин зносу зразків до нанесення та після нанесення покриття (а також залежно від навантаження на зразки) і вивчення поведінки при терті зразків, оброблених при різних режимах нанесення покриття, з метою встановлення оптимальних технологічних параметрів обробки.

Аналіз кривих сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженні 490 Н показав, що сумарний знос зразків з покриттям (крива 1, рис. 3) найменший, тобто у 5,9 разу менший, ніж сумарний знос зразків без покриття (крива 5), у 8 разів менший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям - чавун без покриття” (крива 8), а також, у 1,96 разу менший порівняно із сумарним зносом

пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 2).

Сумарний знос вихідних зразків (крива 5) менший у 1,4 разу, ніж сумарний знос пари тертя „сталь із покриттям - чавун без покриття” (крива 8), а також у 5,9 разу більший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 2).

Показники сумарного зносу зразків при навантаженні 980 Н показали, що сумарний знос зразків із покриттям (крива 3) менший у 3 рази, ніж сумарний знос зразків без покриття (крива 9), у 3,3 разу менший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь із покриттям - чавун без покриття” (крива 10), а також у 1,4 разу менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 4).

Сумарний знос вихідних зразків (крива 9) менший у 1,1 разу, ніж сумарний

знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття” (крива 10), а також у 2 рази більший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 4).

При навантаженні 1961 Н зразки з покриттям (крива 6) дали сумарний знос менший у 3,8 разу, ніж сумарний знос вихідних зразків (крива 12), у 3,7 разу менший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям - чавун без покриття” (крива 11), а також у 1,2 разу менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 7). Сумарний знос вихідних зразків (крива 12) більший у 1,04 разу, ніж сумарний знос пари тертя „сталь із покриттям - чавун без покриття” (крива 11), а також у 3,1 разу більший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 7).

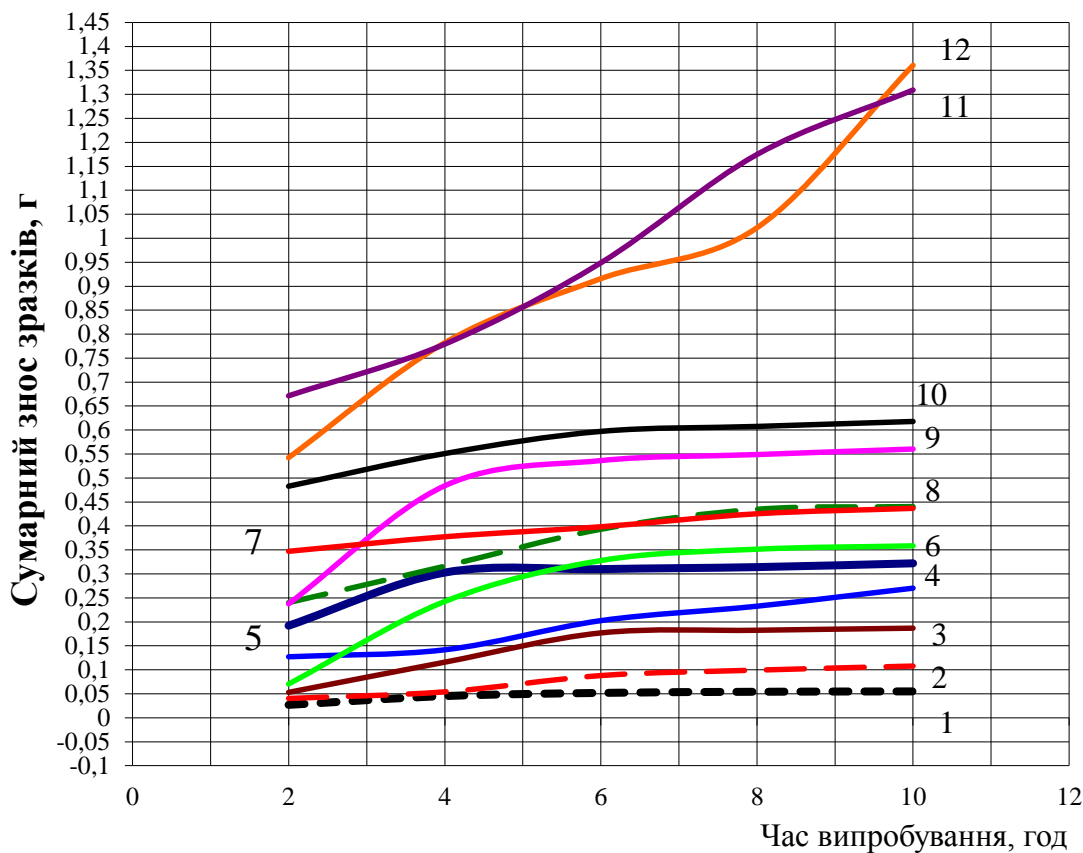


Рис. 3. Залежність сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженнях від 490 до 1961 Н

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Обробка деталей масляного насоса в парогазовому середовищі водного розчину АХФС має такі переваги: підвищення зносостійкості пар тертя за рахунок утворення на поверхні деталей аморфних структур, оксидів ( $Fe_2O_3$ ) та шпінелей ( $Fe_3O_4$ ); скорочення періоду припрацювання пари тертя; значне скорочення часу на обробку деталі порівняно з традиційними технологіями

ХТО; забезпечення дифузійного насичення у важкодоступних місцях; відносно невелика собівартість, ресурсозбереження і екологічна чистота завдяки низькій концентрації насичувальних елементів.

Таким чином, проведений аналіз моделювання параметрів технологічного процесу дає змогу прогнозувати зміни триботехнічних властивостей поверхні залежно від зміни параметрів нового технологічного процесу.

### Список використаних джерел

1. Лахтин, Ю. М. Поверхностное упрочнение сталей и сплавов [Текст] / Ю. М. Лахтин // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1988. – № 11. – С. 14-25.
2. Тимофеева, Л. А. Научные и практические основы экологически чистой химико-термической обработки железоуглеродистых сплавов с использованием водных растворов солей [Текст]: автореф. дис... д-ра техн. наук / Л. А. Тимофеева. – К.: ИПМ, 1992. – 29 с.
3. Повышение износостойкости восстановленных деталей транспортных двигателей [Текст] / Л. А. Тимофеева, С. С. Тимофеев, И. И. Федченко [и др.] // *Трение и износ: сб. науч. трудов.* – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2016. – Т. 37. – № 6. – С. 699-704. (Индексируется в SCOPUS).
4. Спосіб хіміко-термічної обробки деталей із металів та сплавів [Текст] : пат. України №45841А: В22F3/24 / Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Тимофеев С.С., Федченко И.И.; заявник та патентовласник УкрДАЗТ. – №2001075170; заявл. 19.07.2001; опубл. 15.04.2002, Бюл. №4.
5. Тимофеева, Л. А. Повышение эксплуатационных характеристик деталей масляного насоса двигателя СМД 60 [Текст] / Л. А. Тимофеева, Л. В. Проскурина, С. С. Тимофеев // *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць НТУ „ХПІ”.* – Харків, 2001. – Вип.1(4). – С. 263-265.
6. Огнеупорные изделия, материалы и сырье [Текст]: справочник / под ред. А. К. Каркалита. – М.: Металлургия, 1991. – 405 с.
7. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / Н. Дрейпер, Г. Смит. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
8. Dyomin, A.Y. Increasing the wear resistance of reworked parts of transport engines / L.A. Timofeeva, S.S. Timofeev, I.I. Fedchenko, A.Y. Dyomin // *Journal of Friction and Wear.* – 2017. – Vol. 38. – № 1. – P. 13–16.

Тимофеева Лариса Андріївна, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-49.

Волошина Людмила Володимирівна, асистент кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-49.

Гордієнко Павло Михайлович, студент групи 10-III-Те Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-49.

Timofeeva Larisa, doct. of techn. sciences, professor, department of quality, standardization, certificate and technology of production materials, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-49.

Voloshyna Liudmyla, assistant, department of quality, standardization, certificate and technology of production materials, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-49.

Pavel Gordienko, a student of 10-III-Te Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-49.

Стаття прийнята 13.06.2017 р.

УДК 629.423

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭЛ5 В РЕЖИМЕ ТЯГИ**

Д-р техн. наук В. Г. Ягуп (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова),  
А. А. Краснов (филиал ПИИЖТ ПАО «Укрзалізниця»)

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА 2ЕЛ5  
У РЕЖИМІ ТЯГИ**

Д-р техн. наук В. Г. Ягуп (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова),  
О. О. Краснов (філія ПІВІЗТ ПАТ «Укрзалізниця»)

**MATHEMATICAL MODELING OF 2EL5 ELECTRIC LOCOMOTIVE ELECTRIC  
TRACTION SYSTEM**

**Doct. of Techn. Sciences V. G. Yagup, A. A. Krasnov**

*Математическая модель тягового электропривода грузового электровоза переменного тока 2ЭЛ5 (для режима тяги) разработана с целью проведения исследований, направленных на повышение энергетической эффективности этих электровозов. На основе логических функций формирования и распределения импульсов получено математическое описание алгоритма управления выпрямительно-инверторным преобразователем. Результаты виртуальных экспериментов подтвердили адекватность разработанной модели.*

**Ключевые слова:** электровоз переменного тока, электропривод, выпрямительно-инверторный преобразователь, моделирование.

*Математична модель тягового електропривода вантажного електровоза змінного струму 2ЕЛ5 (для режиму тяги) розроблена з метою проведення досліджень, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності цих електровозів. На основі логічних функцій формування та розподілу імпульсів отримано математичний опис алгоритму управління випрямно-інверторним перетворювачем. Результати віртуальних експериментів підтвердили адекватність розробленої моделі.*

**Ключові слова:** електровоз змінного струму, електропривод, вирямно-інверторний перетворювач, моделювання.

*The efficiency of the AC electric traction system is decisively influenced by the electric locomotives power factor. The power factor of electric locomotives with thyristor AC/DC converters is 0.8...0.84, when a recommended value is at least 0.95. The mathematical model of AC cargo electric locomotive 2EL5 traction electric drive (for traction mode) is developed to study ways to increase the energy efficiency of these electric locomotives. Based on the logical functions of the formation and distribution of pulses, a mathematical description of the AC/DC converter algorithm is obtained. This model is implemented by MATLAB.*

*The mathematical model of 2EL5 traction electric drive allows investigating electromagnetic processes taking into account a voltage nonsinusoidality on the pantograph. The resulting graphs of voltages and currents correspond to the concept of electromagnetic processes in the traction electric drive of an electric locomotive, as described in previously publications.*

**Key words:** AC electric locomotive, traction electric drive, AC/DC converter, modeling.

**Введение.** На коэффициент полезного действия системы электрической тяги переменного тока решающее влияние оказывает коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) электроподвижного состава. Однако для электровозов с диодными выпрямителями (ВЛ80К, ВЛ80Т) его величина составляет  $0,82 \dots 0,85$ , а для электровозов с тиристорными преобразователями (2ЭС5К, 2ЭЛ5) —  $0,8 \dots 0,84$  при рекомендуемом значении не менее  $0,95$  [1, 3]. Поэтому необходим поиск путей повышения их энергетической эффективности. Наиболее эффективным методом исследований, который может заменить дорогостоящие испытания электровозов на линии, является математическое моделирование с реализацией моделей средствами компьютерных программных пакетов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [2-7] представлены математические модели электровозов, имеющих тяговые преобразователи, аналогичные электровозу 2ЭЛ5. Эти модели были реализованы в программных пакетах DesignLab, MATLAB и средствами языков программирования. При этом, как правило, движение поезда моделировалось упрощенно: скорость поезда или ток тягового двигателя принимались постоянными величинами. Отсутствует математическое описание алгоритмов управления выпрямительно-инверторным преобразователем (ВИП), за исключением работы [5], в которой приведена лишь логическая блок-схема.

**Определение цели и задачи исследований.** Разработать математическую модель тягового электропривода применительно к электровозу 2ЭЛ5; разработать математическое описание алгоритма управления ВИП; с помощью модели исследовать электромагнитные процессы при работе электровоза в режиме тяги.

**Модель системы электроснабжения.** В описываемой модели система электрической тяги переменного тока представлена в виде двух укрупненных подсистем — подсистемы электроснабжения, в которую входят тяговая подстанция и тяговая сеть, и подсистемы электроподвижного состава (ЭПС), которая включает в себя основное электрическое и электронное оборудование электровоза. Поскольку длительность исследуемых электромагнитных процессов достаточно мала (единицы секунд), влияние механической части локомотива можно не учитывать [4].

Целью исследования является анализ электромагнитных процессов лишь в подсистеме ЭПС, поэтому схема замещения тяговой подстанции (рис. 1, а) может быть представлена эквивалентными параметрами трансформатора (э. д. с.  $e_{тп}$ , индуктивность  $L_{тп}$ , активное сопротивление  $r_{тп}$ ), приведенными к его вторичной обмотке [2, 5]. Схема замещения тяговой сети (один путь) представлена в виде каскадного соединения четырехполюсников [3], которые являются элементарными участками длиной  $0,4$  км (рис. 1, б).

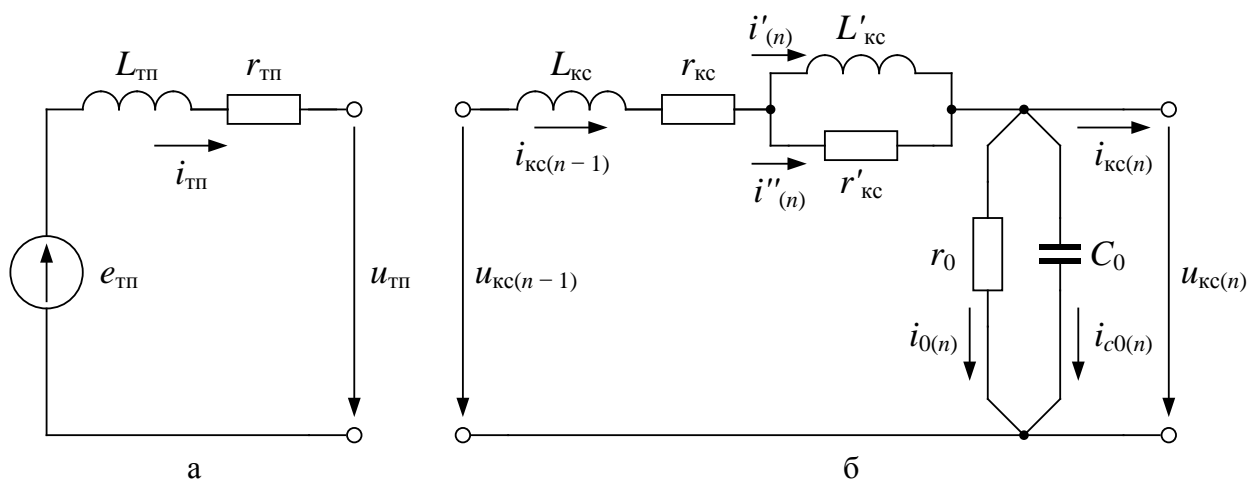


Рис. 1. Схема замещения тяговой подстанции (а) и участка контактной сети длиной  $0,4$  км (б)

Система дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные

процессы в цепях тяговой подстанции и тяговой сети, имеет вид:

$$\frac{di_{\text{тп}}}{dt} = -\frac{1}{L_{\text{тп}} + L_{\text{кк}}} [(r_{\text{тп}} + r_{\text{кк}})i_{\text{тп}} + r'_{\text{кк}}i''_{(1)} + r_0i_{0(1)} - e_{\text{тп}}]; \quad (1)$$

$$\frac{di_{\text{кк}(n-1)}}{dt} = -\frac{1}{L_{\text{кк}}} (r_{\text{кк}}i_{\text{кк}(n-1)} + r'_{\text{кк}}i''_{(n)} + r_0i_{0(n)} - u_{c0(n-1)}); \quad (2)$$

$$\frac{di'_{(n)}}{dt} = \frac{r'_{\text{кк}}}{L'_{\text{кк}}} i''_{(n)}; \quad (3)$$

$$\frac{du_{c0(n)}}{dt} = \frac{1}{C_0} \left( i_{\text{кк}(n-1)} - i_{\text{кк}(n)} - \frac{1}{r_0} u_{c0(n)} \right); \quad (4)$$

$$i_{\text{кк}(n)} = i_{\text{кк}(n-1)} - i_{0(n)} - i_{c0(n)}; \quad (5)$$

$$i_{c0(n)} = C_0 \frac{du_{c0(n)}}{dt}; \quad (6)$$

$$i''_{(n)} = i_{\text{кк}(n-1)} - i'_{(n)}; \quad (7)$$

$$i_{0(n)} = \frac{u_{c0(n)}}{r_0}. \quad (8)$$

В уравнениях (1) - (8):  $u_{\text{тп}}$  — напряжение на выходе тяговой подстанции;  $u_{\text{кк}(n-1)}$ ,  $u_{\text{кк}(n)}$ ,  $u_{c0(n)}$  — напряжения на участках тяговой сети;  $L_{\text{кк}}$ ,  $r_{\text{кк}}$  — индуктивность и активное сопротивление тяговой сети;  $r_0$ ,  $C_0$  — активное сопротивление и емкость цепи «тяговая

сеть — земля»;  $i_{\text{тп}}$  — ток на выходе тяговой подстанции;  $i_{\text{кк}(n-1)}$ ,  $i_{\text{кк}(n)}$ ,  $i_{\text{кк}(n)}$ ,  $i'_{(n)}$ ,  $i''_{(n)}$ ,  $i_{0(n)}$ ,  $i_{c0(n)}$  — токи участков тяговой сети;  $n$  — номер элементарного участка.

Напряжения на участках тяговой сети можно найти по формулам:

$$u_{\text{тп}} = e_{\text{тп}} - L_{\text{тп}} \frac{di_{\text{тп}}}{dt} - r_{\text{тп}} i_{\text{тп}}; \quad (9)$$

$$u_{\text{кк}(n)} = u_{c0(n)} = L_{\text{кк}} \frac{di_{\text{кк}(n+1)}}{dt} + r_{\text{кк}} i_{\text{кк}(n+1)} + r'_{\text{кк}} i''_{(n+1)} + r_0 i_{0(n+1)}. \quad (10)$$

Параметры тяговой подстанции с питающей ЛЭП 110 кВ длиной 13,5 км (провода АС-150) и трансформатором мощностью 40 МВ·А рассчитаны согласно

[2]:  $E_{\text{тп}} = 27,5$  кВ;  $L_{\text{тп}} = 9,6735$  мГн;  $r_{\text{тп}} = 0,2497$  Ом.

Параметры элементарного участка тяговой сети: контактная подвеска

ПБСМ1-95+2МФ-100, рельсы Р-75, один путь;  $r_{кc} = 5,307 \cdot 10^{-2}$  Ом;  $L_{кc} = 2,48 \cdot 10^{-4}$  Гн;  $r'_{кc} = 0,4669$  Ом;  $L'_{кc} = 4,4 \cdot 10^{-5}$  Гн;  $r_0 = 2,4 \cdot 10^6$  Ом;  $C_0 = 8$  нФ [5]. Длина участка 10 км (25 элементарных участков).

**Модель электровоза и тягового двигателя.** Рассмотрим схему замещения силовых цепей одного ВИП (рис. 2). Одна секция электровоза 2ЭЛ5 имеет два таких преобразователя [11].

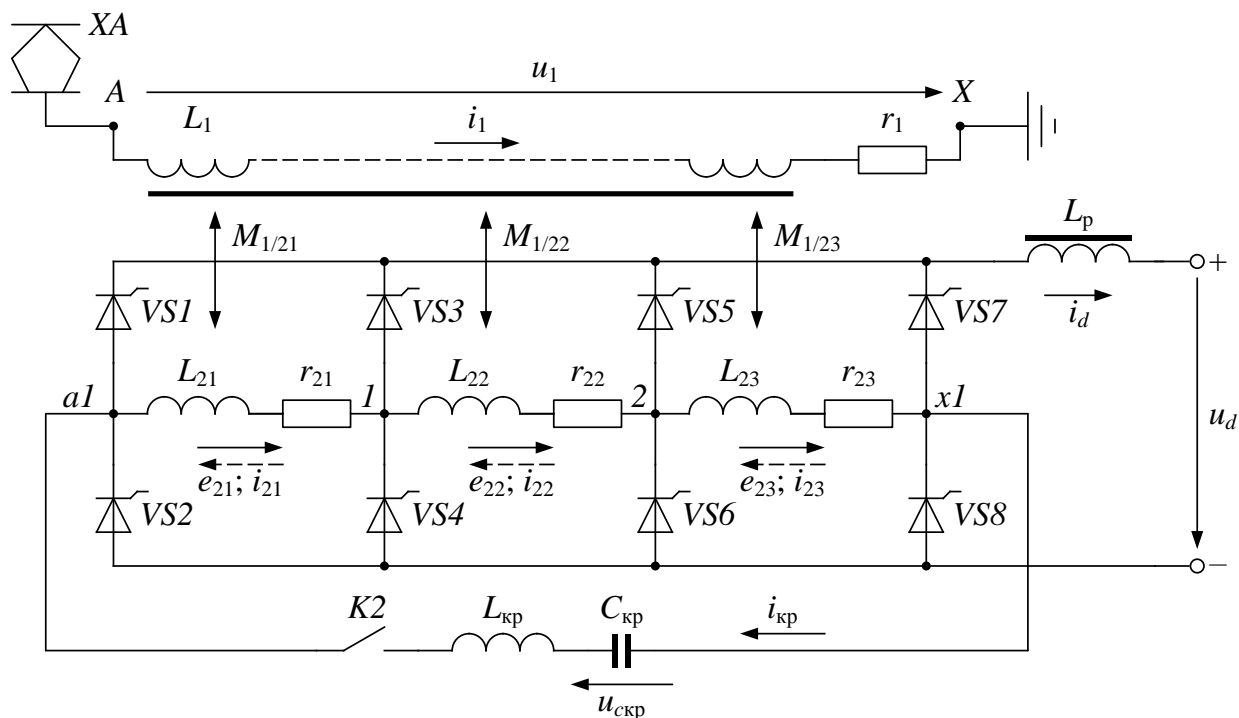


Рис. 2. Схема замещения силовых цепей одного ВИП электровоза 2ЭЛ5

От токоприемника ХА напряжение контактной сети поступает на первичную обмотку А—Х тягового трансформатора. Вторичная обмотка имеет две секционированные тяговые обмотки (на рис. 2 показана одна обмотка а1—х1), к каждой из которых подключается ВИП, имеющий восемь тиристорных плеч VS1—VS8. Номинальное напряжение секций вторичных обмоток а1—1, 1—2 составляет  $u_{21} = u_{22} = 315$  В, секции 2—х1  $u_{23} = 630$  В. К выводам вторичной обмотки а1—х1 подключен компенсатор реактивной мощности, состоящий из реактора  $L_{кр}$  и батареи конденсаторов  $C_{кр}$ . К зажимам постоянного тока «+», «-» подключаются параллельно два тяговых двигателя. На

электровозах 2ЭЛ5 каждый двигатель имеет свой сглаживающий реактор  $L_p$ .

На схеме замещения обозначены:  $u_1$ ,  $L_1$ ,  $r_1$  — напряжение, индуктивность и активное сопротивление первичной обмотки тягового трансформатора;  $e_{21}$ ,  $e_{22}$ ,  $e_{23}$ ,  $u_{21}$ ,  $u_{22}$ ,  $u_{23}$  — э. д. с. и напряжения секций вторичной обмотки;  $i_{21}$ ,  $i_{22}$ ,  $i_{23}$  — токи секций вторичных обмоток;  $i_{кр}$  — ток компенсатора;  $M_{1/21}$ ,  $M_{1/22}$ ,  $M_{1/23}$  — взаимные индуктивности между первичной обмоткой и секциями вторичной обмотки;  $u_d$ ,  $i_d$  — выпрямленное напряжение и ток.

Не учитывая взаимную индуктивность между секциями вторичной обмотки, можно записать следующие уравнения связи между параметрами тягового трансформатора:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{1/21} \frac{di_{21}}{dt} + M_{1/22} \frac{di_{22}}{dt} + M_{1/23} \frac{di_{23}}{dt}; \quad (11)$$

$$u_{21} = i_{21} r_{21} + L_{21} \frac{di_{21}}{dt} + M_{1/21} \frac{di_1}{dt}; \quad (12)$$

$$u_{22} = i_{22} r_{22} + L_{22} \frac{di_{22}}{dt} + M_{1/22} \frac{di_1}{dt}; \quad (13)$$

$$u_{23} = i_{23} r_{23} + L_{23} \frac{di_{23}}{dt} + M_{1/23} \frac{di_1}{dt}. \quad (14)$$

На электровозе 2ЭЛ5 применяется выпрямительно-инверторный преобразователь серии ВИП-4000, который комплектуется тиристорами Т353-800. Параметры тягового трансформатора

ОНДЦЭ-4350/25 [13] указаны в табл. 1, параметры тиристора Т353-800 [5] — в табл. 2. К каждому тиристорному последовательно подключен индуктивный делитель тока величиной 14 мкГн.

Таблица 1

Параметры тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25

Параметр	Секция обмоток	Ед. изм.	Обозначение	Значение
Активное сопротивление	A-X	Ом	$r_1$	0,314
	a1-x1	Ом	$r_2$	0,00351
	a1-1, 1-2	Ом	$r_{21}, r_{22}$	0,0008775
	2-x1	Ом	$r_{23}$	0,001755
Индуктивность	A-X	Гн	$L_1$	57,262539
	a1-1, 1-2	Гн	$L_{21}, L_{22}$	0,009091
	2-x1	Гн	$L_{23}$	0,036364
Коэффициент связи	—	—	$K_{1/21}, K_{1/22}$	0,99845
	—	—	$K_{1/23}$	0,99898

Таблица 2

Параметры тиристора Т353-800

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Величина
Дифференциальное сопротивление во включенном состоянии	$r_T$	Ом	$4,6 \cdot 10^{-4}$
Индуктивность во включенном состоянии	$L_T$	Гн	0
Падение напряжения в прямом направлении	$U_T$	В	2,2
Ток удержания	$I_L$	А	$20 \cdot 10^{-3}$
Время выключения	$T_q$	с	$20 \cdot 10^{-6}$
Начальный ток	$I_c$	А	0
Активное сопротивление демпфирующей цепи	$R_s$	Ом	30
Емкостное сопротивление демпфирующей цепи	$C_s$	Ф	$2 \cdot 10^{-6}$



Параметры сглаживающего реактора и компенсатора реактивной мощности:  $L_p = 8,2$  мГн;  $r_p = 0,014$  Ом;  $L_{кр} = 3,249$  мГн,  $C_{кр} = 433$  мкФ [4].

Математическая модель тягового двигателя (ТЭД) ДТК-820 разработана на

основе его схемы замещения (рис. 3). Продольную составляющую реакции якоря и влияние магнитного потока дополнительных полюсов можно не учитывать ввиду малых величин.

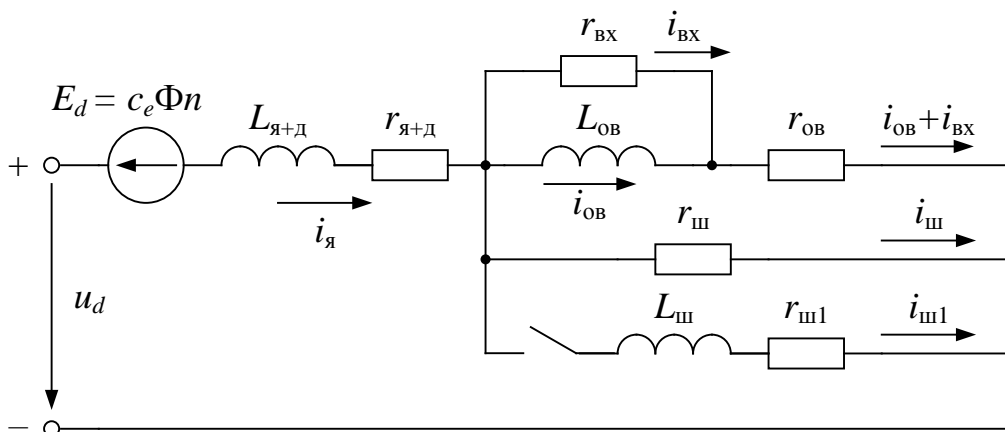


Рис. 3. Схема замещения цепи тягового двигателя

На рис. 3 обозначены:  $c_e = 11,6$  — конструктивная постоянная двигателя;  $\Phi = f(i_я)$  — магнитный поток, Вб;  $n$  — частота вращения якоря, об/мин;  $i_я, i_об, i_ш, i_ш1, i_вх$  — соответственно токи якоря, обмотки возбуждения, шунтирующего резистора, индуктивного шунта и цепи вихревых токов. Включение цепи ослабления поля ( $L_ш, r_ш1$ ) учитывается

логической переменной  $f_ш^*$ , которая равна 1 или 0 соответственно для включенного и отключенного состояния.

Эффект вихревых токов учитывается в виде активного сопротивления  $r_вх$ , шунтирующего индуктивность обмотки возбуждения. Величина этого сопротивления принята равной  $r_вх = 7r_об$  [4].

Для схемы (рис. 3) справедлива система уравнений:

$$\frac{di_я}{dt} = \frac{1}{L_{я+д}} [u_d - c_e \Phi n - r_{я+д} i_я - r_ш i_ш]; \tag{15}$$

$$\frac{di_об}{dt} = \frac{1}{L_{об}} [r_ш i_ш - r_{об} (i_об + i_вх)]; \tag{16}$$

$$\frac{di_ш1}{dt} = f_ш^* \frac{1}{L_ш} (r_ш i_ш - r_{ш1} i_ш1); \tag{17}$$

$$i_ш = i_я - i_об - i_вх - f_ш^* i_ш1; \tag{18}$$

$$i_вх = -\frac{1}{r_вх} L_{об} \frac{di_об}{dt}. \tag{19}$$

Параметры тягового двигателя ДТК-820 (табл. 3) взяты из [10, 12]. Магнитная характеристика ТЭД приведена в [10]. Сопротивление цепи вихревых токов  $r_{вх} = 7r_{ов} = 0,0483$  Ом.

В разработанной модели скорость движения поезда определяется путем интегрирования уравнения движения,

которое в режиме тяги при отсутствии торможения имеет вид [8]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{30}(f_k - w). \quad (20)$$

где  $v$  — скорость движения поезда, км/ч;  
 $f_k$  — удельная сила тяги, Н/кН;  
 $w$  — удельная сила сопротивления движению поезда, Н/кН.

Таблица 3

Параметры тягового двигателя ДТК-820

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Величина
Активное сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов	$r_{я+д}$	Ом	0,0237
Индуктивность обмотки якоря и дополнительных полюсов	$L_{я+д}$	Гн	$0,52 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление обмотки возбуждения	$r_{ов}$	Ом	0,0069
Индуктивность обмотки возбуждения	$L_{ов}$	Гн	$0,85 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление резистора постоянного шунтирования	$r_{ш}$	Ом	0,294
Индуктивность индуктивного шунта	$L_{ш}$	Гн	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление резисторов ослабления возбуждения	$r_{ш1}$ $r_{ш2}$ $r_{ш3}$	Ом	0,0039 0,017 0,058

Основное удельное сопротивление движению электровоза и вагонов, Н/кН, определяется по формулам [9]:

— для электровоза 2ЭС5К (2ЭЛ15) на бесстыковом пути

$$w'_0 = 0,65 + 0,00906v + 0,000227v^2; \quad (21)$$

— для 4-осных вагонов на роликовых подшипниках

$$w''_0 = 0,7 + (3 + 0,09v + 0,002v^2)/q_0, \quad (22)$$

где  $q_0 = 17,5$  т — средняя распределенная масса на ось вагона.

При моделировании примем силу тяги постоянной величиной ( $F_k = \text{const}$ ). Тогда, согласно [8], уравнение (20) может быть записано в виде

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_k - g(m_{эл}w'_0(v) + m_вw''_0(v))}{30(m_{эл} + m_в)g}. \quad (23)$$

В результате интегрирования уравнения (23) получаем скорость движения поезда в километрах в час. Тогда частота вращения ТЭД, об/мин:

$$n = \frac{\mu}{0,188D_k} v. \quad (24)$$

В формуле (24)  $\mu = 4,19$  — передаточное число редуктора;  $D_k = 1205$  мм — диаметр бандажа колесной пары. Уравнения (15) - (19), (23), (24) составляют полную систему уравнений цепи тягового двигателя.

**Алгоритм управління ВИП.**

Алгоритм управління тиристорами ВИП в режимі тяги [11] приведений в табл. 4. Положительное направление э. д. с.  $e_2$  вторичной обмотки трансформатора (см. рис. 2) показано сплошной стрелкой, а отрицательное — штриховой.

Формирование импульсов ВИП (рис. 4) осуществляется путем сравнения опорного пилообразного сигнала  $u_{оп}(t)$

амплитудой 180 В (это соответствует 180 эл. град.) с двумя уровнями срабатывания. Первый уровень численно равен углу  $\alpha$ , а второй — величине  $\alpha + \tau_{и}$ , где  $\tau_{и}$  — длительность импульса, выраженная в градусах. Для моделируемого ВИП  $\tau_{и} = 15,3^\circ$  (850 мкс) для углов  $\alpha_0, \alpha_p$ ;  $\tau_{и} = 45^\circ$  (2500 мкс [3]) для углов  $\alpha_{03}$ .

Таблица 4

Алгоритм управления тиристорами ВИП в режиме тяги

Зона регулирования	Направление э. д. с. $e_2$	Номера тиристорov ВИП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
I	+				$\alpha_p$	$\alpha_0; \alpha_p$			
	-			$\alpha_0$			$\alpha_p$		
II	+		$\alpha_p$		$\alpha_{03}$	$\alpha_0$			
	-	$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$		
III	+				$\alpha_p$		$\alpha_{03}$	$\alpha_0$	
	-			$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$
IV	+		$\alpha_p$		$\alpha_{03}$			$\alpha_0$	
	-	$\alpha_p$		$\alpha_{03}$					$\alpha_0$

В табл. 4:  $\alpha_0$  — нерегулируемый по фазе импульс;  $\alpha_{03}$  — нерегулируемый задержанный по фазе импульс;  $\alpha_p$  — регулируемый по фазе импульс.

Опорный пилообразный сигнал можно вычислить по формуле

$$u_{оп}(t) = \frac{180}{\pi} \arctg \left( \operatorname{tg} \omega t + \frac{\pi}{2} \right) + 90, \quad (25)$$

где  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота сети ( $f = 50$  Гц), рад/с.

Для описания алгоритма работы ВИП составлены уравнения, в которых применены символы « $\wedge$ » (логическое И), « $\vee$ » (логическое ИЛИ), « $\leftrightarrow$ » (логическое ЕСЛИ... ТО). С целью формализации

описания алгоритма введем следующие логические величины:

— переменные выбора зоны регулирования  $z_j$ , где  $j = 1 \dots 4$  — номер зоны. Если соответствующая переменная  $z_j$  равна единице, электровоз работает на  $j$ -й зоне регулирования;

— функции формирования импульсов  $f^*_\alpha$ , где  $\alpha$  — угол управления ВИП. При  $f^*_\alpha = 1$  формируется прямоугольный импульс длительностью  $t_{и}$  с задержкой от начала полупериода, равной углу  $\alpha$ ;

— функции распределения импульсов  $f^*_k$ , где  $k = 1 \dots 8$  — номер тиристора ВИП. При  $f^*_k = 1$  на тиристор с номером  $k$  подается импульс.

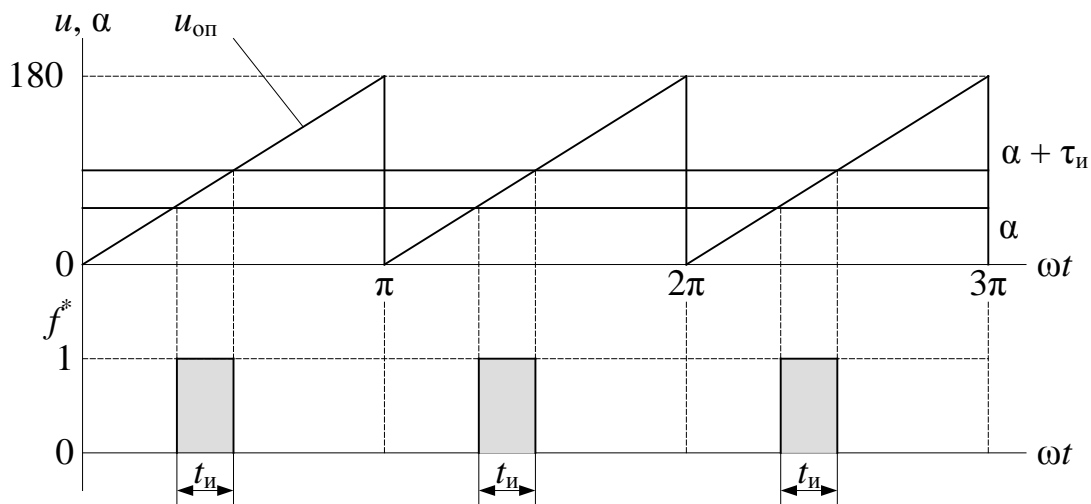


Рис. 4. Диаграммы формирования импульсов управления ВИП

Логические функции формирования импульсов ВИП  $f_{\alpha}^*$ :

$$\begin{aligned}
 f_{\alpha 0}^* &= (u_{ax} > 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_0 \geq 0) \wedge (\alpha_0 + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi+\alpha 0}^* &= (u_{ax} < 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_0 \geq 0) \wedge (\alpha_0 + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\alpha 03}^* &= (u_{ax} > 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_{03} \geq 0) \wedge (\alpha_{03} + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi+\alpha 03}^* &= (u_{ax} < 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_{03} \geq 0) \wedge (\alpha_{03} + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\alpha p}^* &= (u_{ax} > 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_p \geq 0) \wedge (\alpha_p + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi+\alpha p}^* &= (u_{ax} < 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_p \geq 0) \wedge (\alpha_p + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1.
 \end{aligned} \tag{26}$$

Логические функции распределения импульсов  $f_k^*$ :

$$\begin{aligned}
 f_1^* &= (z_2 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha p}^* = 1) \rightarrow 1; \\
 f_2^* &= (z_2 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\alpha p}^* = 1) \rightarrow 1; \\
 f_3^* &= ((z_1 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 0}^* = 1)) \vee ((z_2 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 03}^* = 1)) \vee \\
 &\quad \vee ((z_3 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha p}^* = 1)) \rightarrow 1; \\
 f_4^* &= ((z_1 = 1) \vee (z_3 = 1) \wedge (f_{\alpha p}^* = 1)) \vee ((z_2 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\alpha 03}^* = 1)) \rightarrow 1; \\
 f_5^* &= ((z_1 = 1) \wedge (f_{\alpha 0}^* = 1) \wedge (f_{\alpha p}^* = 1)) \vee ((z_2 = 1) \wedge (f_{\alpha 0}^* = 1)) \vee \\
 &\quad \vee ((z_3 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 03}^* = 1)) \rightarrow 1; \\
 f_6^* &= ((z_1 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha p}^* = 1)) \vee ((z_2 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 0}^* = 1)) \vee ((z_3 = 1) \wedge (f_{\alpha 03}^* = 1)) \rightarrow 1; \\
 f_7^* &= (z_3 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\alpha 0}^* = 1) \rightarrow 1; \\
 f_8^* &= (z_3 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 0}^* = 1) \rightarrow 1.
 \end{aligned} \tag{27}$$

При невыполнении условий (26), (27) все соответствующие логические функции равны нулю.

**Результаты моделирования.** Разработанная математическая модель реализована в программном пакете MATLAB. Сила тяги и начальная скорость движения поезда (по тяговой характеристике [11]), масса состава, номер зоны регулирования, углы регулирования ВИП задаются пользователем модели.

Условия моделирования: метод интегрирования ode23tb (с переменным шагом), минимальный шаг интегрирования  $10^{-10}$ , максимальный шаг  $10^{-4}$ , начальный шаг  $10^{-6}$ , относительная погрешность  $10^{-3}$ . Масса поезда 2500 т, начальная скорость 60 км/ч, сила тяги 350 кН. Электровоз работает на IV зоне регулирования; углы открывания тиристоров  $\alpha_0 = 9^\circ$ ,  $\alpha_p = 90^\circ$ . Результаты моделирования приведены на рис. 5 и 6.

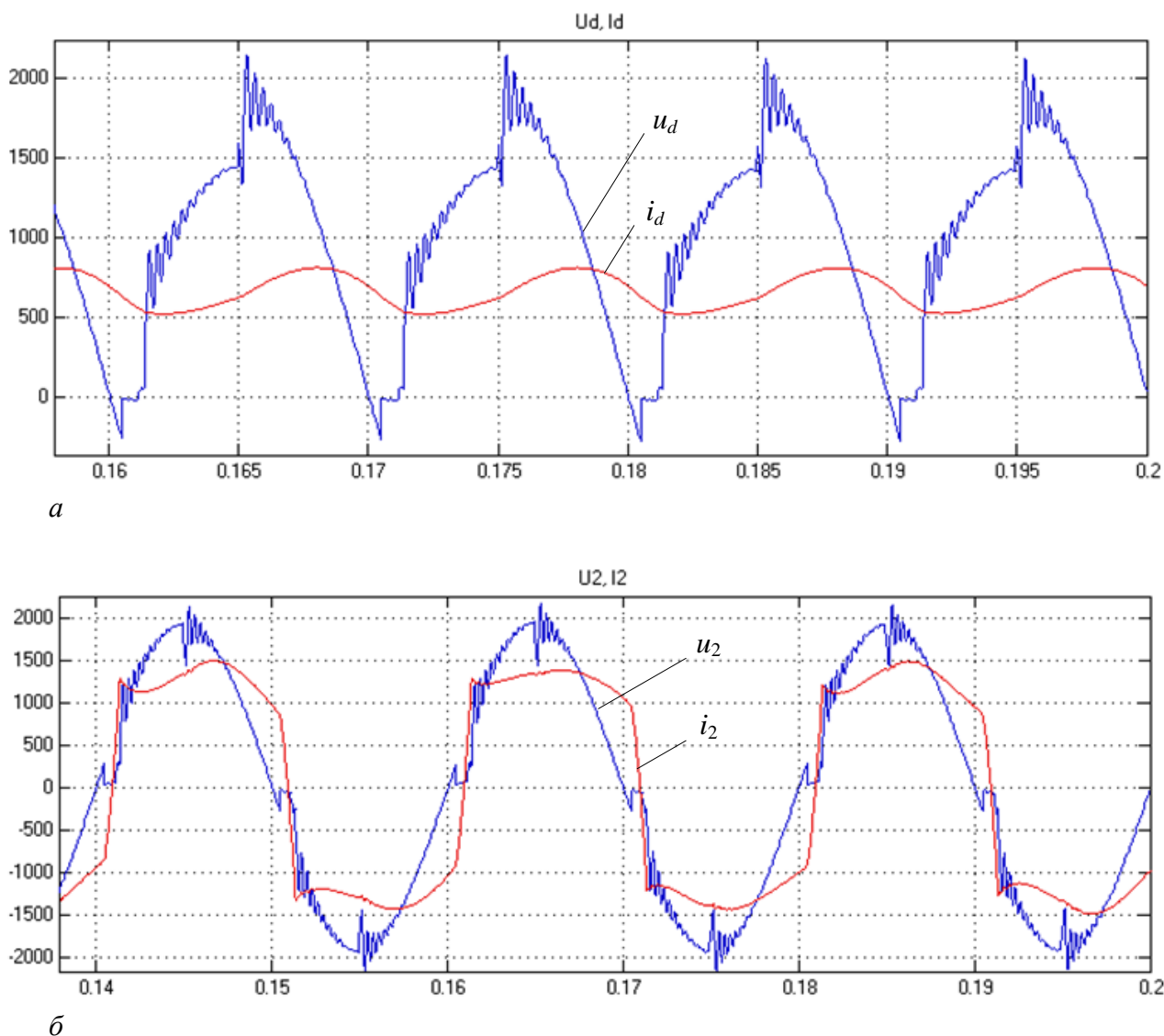


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования: выпрямленное напряжение  $u_d$  и ток  $i_d$  (а); напряжение  $u_2$  и ток  $i_2$  вторичной обмотки трансформатора (б)

Из рис. 5, а видно, что в моменты времени, соответствующие  $\alpha_p = 90^\circ$ , происходит переключение ВИП на вторичную обмотку с высшим напряжением. В начале полупериода  $u_d$  снижается до нуля, что объясняется процессами сетевой и фазной коммутации. Ток  $i_d$  имеет пульсирующую форму.

Искажение кривой напряжения  $u_2$  вторичной обмотки трансформатора (рис. 5, б) вызвано процессами коммутации в ВИП и волновыми процессами в тяговой сети [2, 3, 5, 6]. Такие же искажения характерны и для напряжения на токоприемнике  $u_1$  (рис. 6). Токи  $i_1$  и  $i_2$  имеют форму, близкую к прямоугольной, вследствие индуктивного характера

нагрузки. Первая гармоника тока  $i_1$  отстает от напряжения  $u_1$  на угол  $\varphi$ , поэтому полная компенсация реактивной мощности в данном режиме не обеспечивается.

При указанных условиях моделирования получены следующие показатели: коэффициент мощности электровоза 0,856; коэффициент несинусоидальности напряжения на токоприемнике 6,1%; коэффициент искажения первичного тока электровоза 0,9671; коэффициент мощности на шинах тяговой подстанции 0,859. Характер электромагнитных процессов и результаты моделирования в целом соответствуют данным, полученным в [2-6], что позволяет считать разработанную модель адекватной.

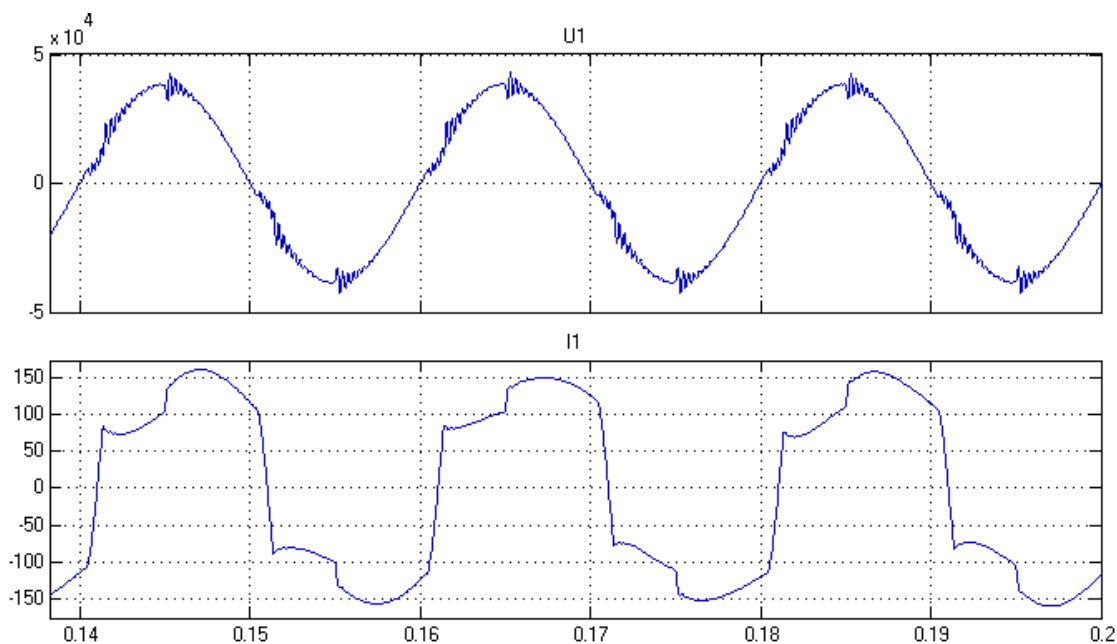


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования: напряжение  $u_1$  и ток  $i_1$  на токоприемнике электровоза

**Выводы из исследований и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** Разработанная математическая модель тягового электропривода электровоза 2ЭЛ5 позволяет исследовать электромагнитные процессы с учетом несинусоидальности

напряжения на токоприемнике и нелинейности цепи выпрямленного тока. Имеется возможность оценки показателей качества электроэнергии. Результаты виртуальных экспериментов подтвердили адекватность разработанной модели.

*Список использованных источников*

1. Бакланов, А. А. Анализ энергетической эффективности электрической тяги [Текст] / А. А. Бакланов // Материалы международного симпозиума Eltrans 2007. — СПб.: ПГУПС (ЛИИЖТ), 2009. — С. 63-68.
2. Математическое моделирование динамики электровозов [Текст] / А. Г. Никитенко, Е. М. Плохов, А. А. Зарифьян [и др.]; под ред. А. Г. Никитенко. — М.: Высш. школа, 1998. — 274 с.
3. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения [Текст]: монография / Ю. М. Кулинич. — Хабаровск: ДВГУПС, 2001. — 153 с.
4. Янов, В. П. Оценка эффективности компенсатора реактивной мощности на электровозе ЗЭС5К [Текст] / В. П. Янов, П. Г. Колпахчян // Вестник ВЭЛНИИ. — 2009. — № 1 (57). — С. 23-32.
5. Мельниченко, О. В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока [Текст]: дисс... д-ра техн. наук: 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы / О. В. Мельниченко. — Хабаровск, 2015. — 392 с.
6. Bunyaeva E. V., Skorik V. G., Vlas'evskii S. V., Fokin D. S. A method for improving the energy efficiency of an alternating current electric locomotive in the regenerative braking mode // Russian Electrical Engineering. — 2016. — Vol. 87. — No. 2. — P. 73-76.
7. Cismaru C. D. Mathematical Models of High-Speed Trains Movement // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. — 2008. — Vol. 7. — No. 2. — P. 67-74.
8. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель; под ред. В. Д. Кузьмича. — М.: Маршрут, 2004. — 448 с.
9. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст]: монография в 2 т. — Т. 1 / Г. К. Гетьман. — Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2011. — 456 с.
10. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст]: монография в 2 т. — Т. 2 / Г. К. Гетьман. — Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2011. — 364 с.
11. Электровоз 2ЭЛ5. Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661142.010РЭ1 [Текст]. — Новочеркасск, 2005. — 169 с.
12. Электровоз 2ЭЛ5. Руководство по эксплуатации. Книга 3. Описание и работа. Электрические машины. ИДМБ.661142.010РЭ3 [Текст]. — Новочеркасск, 2005. — 33 с.
13. Электровоз 2ЭЛ5. Руководство по эксплуатации. Книга 4. Электрические аппараты. ИДМБ.661142.010РЭ4 [Текст]. — Новочеркасск, 2005. — 245 с.

---

Ягуп Валерій Григорович, д-р техн. наук, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: (050) 973-81-99. E-mail: yagup\_walery@rambler.ru.

Краснов Олексій Олександрович, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу «Інфраструктура залізниць та електрична тяга» Харківського відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Укрзалізниця». Тел.: (057) 724-41-20. E-mail: uzdlines@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7538-8965>.

Yagup Valery Grygorovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Systems and Electric Power Supply of Cities, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: (050) 973-81-99. E-mail: yagup.walery@gmail.com.

Krasnov Oleksiy Oleksandrovych, Leading Researcher, Kharkiv Department of Railway Transport Design and Survey Institute, JSC "Ukrzaliznytsya". Tel.: (057) 724-41-20. E-mail: uzdlines@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7538-8965>.

Стаття прийнята 13.06.2017 р.

УДК 624.042

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ И ДЛИТЕЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

Д-р техн. наук Г. Л. Ватуля, канд. техн. наук А. В. Лобяк (УкрГУЖТ),  
инж. В. Б. Черногиль (ООО «Национальные ресурсы»)

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРУБОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ КОРОТКОЧАСНОМУ ТА ТРИВАЛОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Д-р техн. наук Г. Л. Ватуля, канд. техн. наук А. В. Лобяк (УкрДУЗТ),  
інж. В. Б. Черногіль (ТОВ «Національні ресурси»)

## SIMULATION OF PERFORMANCE OF CIRCULAR CFST COLUMNS UNDER SHORT-TIME AND LONG-TIME LOAD

Doct. of techn. sciences G. Vatulia, cand. of techn. sciences A. Lobiak, engineer V. Chernogil

*Рассмотрен подход расчета трубобетонных элементов с учетом физической нелинейности материалов, геометрической нелинейности обоймы и эффекта увеличения прочности ядра. Методика использует шагово-итерационный алгоритм с участием аналитических зависимостей и конечно-элементного моделирования. Учет ползучести бетона основан на использовании обобщенной кинетической кривой длительного деформирования. Адекватность методики обеспечивается сопоставлением экспериментальных и теоретических данных. Предложенная методика позволила исследовать напряженно-деформированное и предельное состояние трубобетонных элементов, а также оценить их эффективность с учетом фактора времени.*

**Ключевые слова:** трубобетон, эффект обоймы, ползучесть, физическая нелинейность, метод конечных элементов.

*Розглянуто підхід розрахунку трубобетонних елементів з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів, геометричної нелінійності обойми та ефекту збільшення міцності ядра. Методика використовує кроково-ітераційний алгоритм за участю аналітичних залежностей і скінченно-елементного моделювання. Облік повзучості бетону побудований на використанні узагальненої кінетичної кривої деформування. Адекватність методики забезпечується порівнянням експериментальних і теоретичних даних. Запропонована методика дала змогу дослідити напружено-деформований та граничний стан трубобетонних елементів, а також оцінити їх ефективність з урахуванням фактора часу.*

**Ключові слова:** трубобетон, ефект обойми, повзучість, фізична нелінійність, метод скінченних елементів.

*The method of calculation of concrete pipe elements with consideration of physical nonlinearity of materials, geometric nonlinearity of the confinement and the effect of the gain in strength of the core is considered. The method uses a step iteration algorithm which involves analytical dependencies and the ultimate element simulation method. Allowance for creep of concrete is based on using the generalized kinetic long-term deformation curve and phenomenological deformation development equations. Creep of concrete is controlled through new structural factors that determine the structure of cement rock layers between sand and mortar grains between chip grains. The method is validated by comparing experimental findings and theoretical data. The suggested method allowed*



to study the stress-strain and limit state of concrete pipe elements, as well as to evaluate their effectiveness with account for the time factor.

**Keywords:** concrete pipe elements, effect of the gain, creep, physical nonlinearity, finite element method.

**Введение.** Увеличение масштабов строительства транспортных объектов и высотных зданий требует применения надежных и экономически эффективных вертикальных несущих конструкций. Один из способов обеспечения заданных целей заключается в применении трубобетонных элементов, обладающих высокой несущей способностью, надежностью и долговечностью при малых поперечных сечениях.

Трубобетонные конструкции широко применяются в строительной практике за счет своей эффективности, исключения опалубочных и арматурных работ, снижения поперечного сечения колонн, расхода металла и бетона, сокращения сроков строительства и трудозатрат [1]. При этом, несмотря на фундаментальные исследования в этой области, в практике проектирования нет полноценной методики расчета напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов при кратковременных и длительных нагрузках, адекватно отражающей его специфические особенности. В основе этой проблемы лежат сложности работы системы сердечник-оболочка, трудности моделирования эффекта обоймы и контактного взаимодействия между ядром и оболочкой, геометрической нелинейности обоймы и физической нелинейности бетона.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На сегодняшний день существует множество аналитических методик расчета сжатых трубобетонных элементов [2]. Для сталебетона применимы и общий подход к расчету железобетонных конструкций с жестким или косвенным армированием, и способы приведения бетона к стали, численные методы расчета на основе нелинейной деформационной модели, а также подходы, рекомендуемые Eurocode 4 [3]. Существующие способы

учета реологических свойств бетонного ядра, как правило, отличаются сложными вычислениями и немалой погрешностью.

**Определение цели и задачи исследования.** Данная работа направлена на повышение эффективности трубобетонных элементов путем построения комплексной методики расчета прочности, наиболее адекватно учитывающей особенности напряженно-деформированного состояния бетонного ядра и стальной оболочки при действии как кратковременной, так и длительной нагрузки.

**Основная часть исследования.** Решение задачи построено на основе нелинейной модели с учетом особенностей деформирования ядра и обоймы в условиях неоднородного напряженного состояния. Основная сложность при расчете трубобетона в такой постановке заключается в отсутствии диаграмм деформирования ядра  $\sigma_{c3} - \varepsilon_{c3}$ , внешний вид которых будет определяться заранее неизвестной величиной бокового давления стальной обоймы на бетон  $\sigma_{cr}$  (рис. 1).

Реализовать данное решение математически, учитывая современный уровень компьютерных технологий, возможно с применением вычислительного комплекса как основного инструмента моделирования [4]. Предлагаемая методика использует шагово-итерационный алгоритм. Принимается, что на первой итерации первого шага нагружения боковое давление  $\sigma_{cr} = 0$  и прочность ядра определяется прочностью цилиндра осевому сжатию  $f_{cc}$ . Далее осуществляется итерационный процесс поиска истинных значений прочности  $f_{c3}$  в соответствии с критерием Н. И. Карпенко [5] при объемном сжатии элемента:

$$f_{c3} = f_{cc} + k\sigma_{cr} . \quad (1)$$

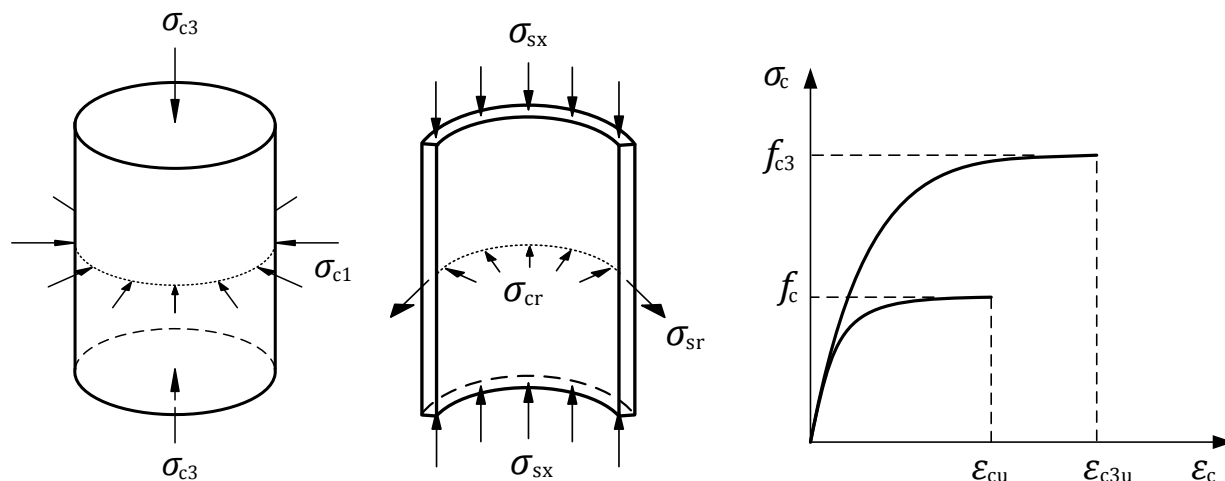


Рис. 1. Напряженное состояние бетонного сердечника и стальной оболочки

Коэффициент бокового давления  $k$  определяется в зависимости от относительного уровня бокового обжатия  $m = \sigma_{c1} / \sigma_{c3}$ :

$$k = 1 / (0.1 + 0.9m) . \quad (2)$$

Последняя итерация определяет истинные компоненты напряженно-деформированного состояния первого шага нагружения: продольные  $\sigma_{c3}$  и поперечные  $\sigma_{c1}$  напряжения в бетоне, сжимающие  $\sigma_{sx}$  и радиальные  $\sigma_{sr}$  напряжения в обойме, а также относительные деформации  $\varepsilon_{c3}, \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{sx}, \varepsilon_{sr}$ . Далее выполняется расчет на второй и последующие шаги нагружения вплоть до исчерпания несущей способности. При этом допускается, что предельное состояние, для сжатия с малыми эксцентриситетами, наступает при выполнении одного из условий: при исчерпании прочности бетонного ядра  $\sigma_{c3} = f_{c3}$ , обоймы  $\sigma_{sr} = f_y$  или в результате достижения предельных деформаций бетона  $\varepsilon_{c3} = \varepsilon_{cu}$ .

Модель, реализующая расчет НДС, составлена из двух блоков (обоймы и бетонного сердечника), объединенных в

совместную работу при помощи односторонних связей, воспринимающих сжатие и сдвиг (рис. 2, а). Обойма моделируется с учетом физической и геометрической нелинейности, а материал ядра задается переменными законами деформирования. Способ передачи нагрузки обеспечивает перераспределение усилий по плоскости нагружения.

Проверка адекватности методики выполнена сопоставлением результатов расчета с данными экспериментов. Принятые элементы выполнены из трубы 102×3 длиной 500 мм, заполненной бетоном с призменной прочностью 16 МПа. Передача нагрузки осуществляется одновременно на бетон и трубу. Результаты расчетов для предельного состояния показаны на полях напряжений (рис. 2).

Анализ результатов расчета выполнен по зависимостям изменения напряжений (рис. 3, а) и деформаций (рис. 4).

Диаграмма прочности ядра  $f_{c3}$  (рис. 3, б) имеет общее решение с кривой продольных напряжений  $\sigma_{c3}$ , что устанавливает прочностный критерий предельного состояния  $N_{plf} = 652$  кН. Несущая способность  $N_{pl\varepsilon} = 648$  кН получена по величине предельных относительных деформаций  $\varepsilon_{cu}$ . Анализ графиков показывает

приблизно однаковий вид залежностей змінення деформацій в ядрі і оболонці, що свідчить про їх спільну роботу. Коефіцієнт, встановлюючий

ефект оболонки, визначається співвідношенням міцності сердечника в граничному і початковому стані (при  $D/t = 34, k_{c3} = 2.6$ ).

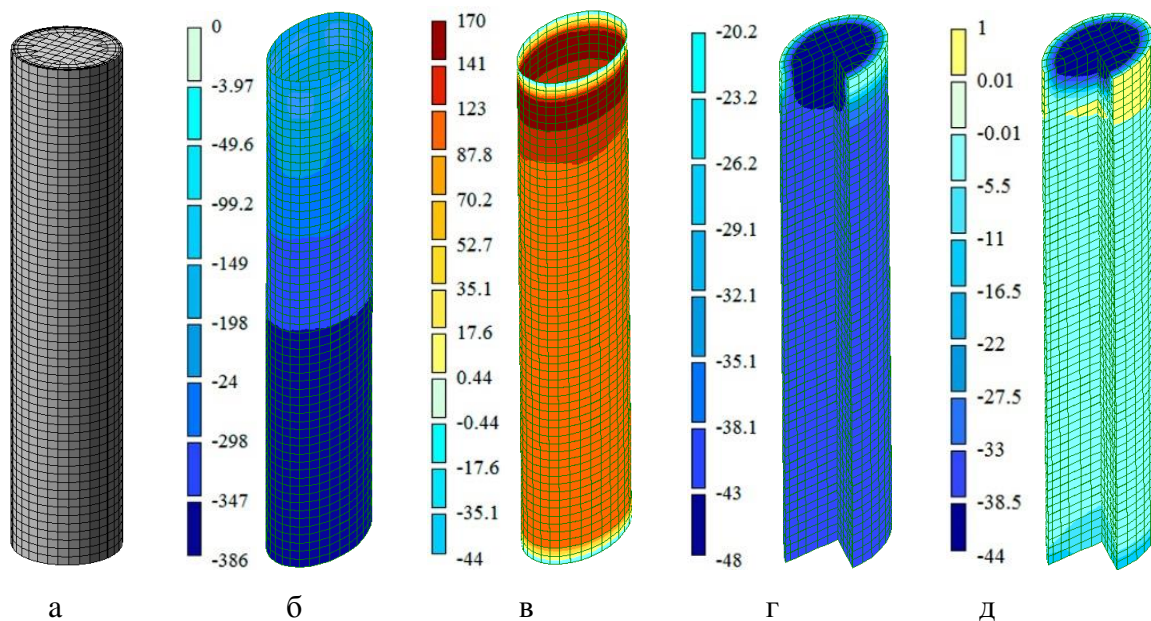


Рис. 2. Напружене стан трубоконтного елемента: а – загальний вид моделі; б і в – напруження в оболонці  $\sigma_{sx}$  і  $\sigma_{sr}$ ; г і д – напруження в ядрі  $\sigma_{c3}$  і  $\sigma_{c1}$

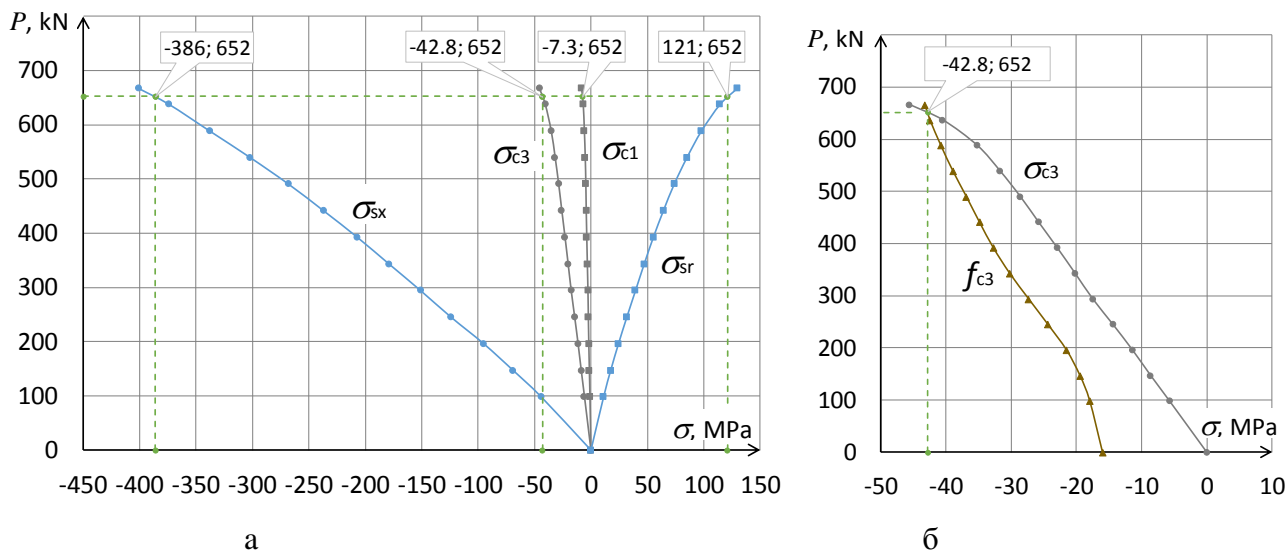


Рис. 3. Графики змінення напружень: а – графики напружень; б – діаграма міцності ядра  $f_{c3}$  і график напружень в бетоні  $\sigma_{c3}$

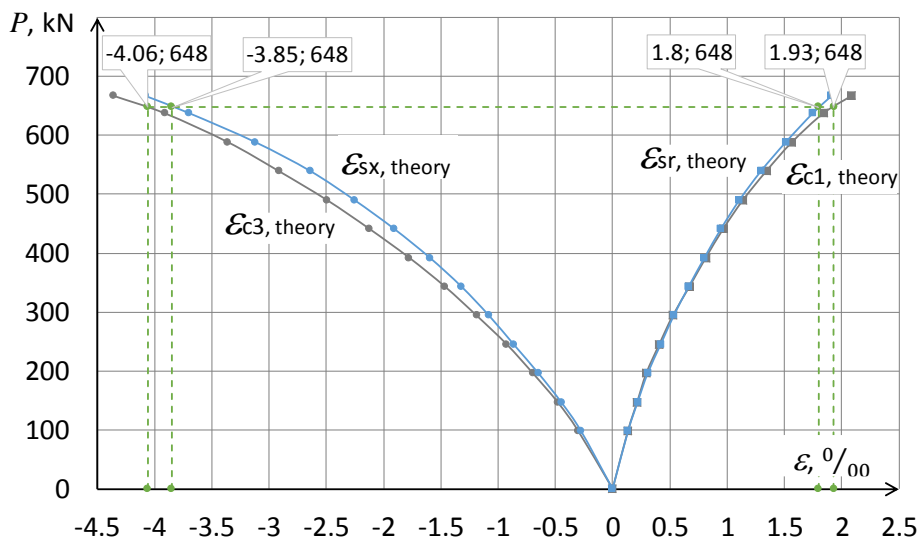


Рис. 4. Графики изменения деформаций в труботетонном элементе

Образцы для экспериментальных исследований (рис. 5) изготавливались в лаборатории кафедры строительной механики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Для бетонной смеси использовали мелкозернистый бетон с В/Ц = 0.55, портландцемент М500 и щебень

фракцией 2.5-7 мм. Деформации в бетоне определялись в геометрическом центре объема ядра при помощи глубинных тензометрических датчиков [6]. Установлено, что средняя погрешность, полученная для относительных деформаций, составляет 10.5 %. По несущей способности не превышает 2.5 %.

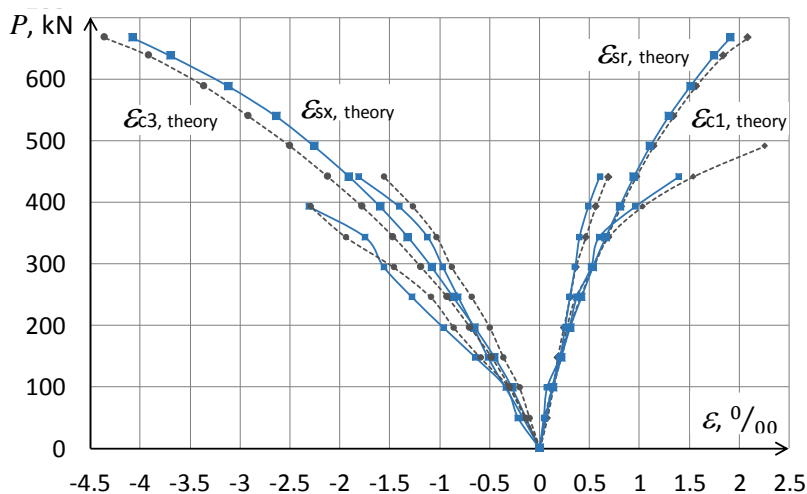


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований

Принимая удовлетворительную сходимость теоретических и опытных данных для кратковременных нагрузок, на следующем этапе рассматривается влияние

фактора времени на деформации в ядре и в целом на НДС элемента.

Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют, что в

конструкциях с применением бетона, находящихся под длительным действием нагрузок, возникают неупругие деформации, которые в несколько раз могут превышать начальные, условно упругие деформации. Наиболее остро проблема ползучести представляется для сооружений из сталежелезобетона и в частности – для сталебетонных плит [7,8] и трубобетона. В связи с этим, вопросы прогнозирования длительного деформирования бетонного ядра в трубобетонных элементах и синхронного перераспределения усилий остаются актуальными.

В основу национальных строительных норм Украины, гармонизированных с Eurocode 2 [9], положен наиболее простой, феноменологический подход, основанный на данных экспериментов и устанавливающий зависимость между деформациями и временем через коэффициент ползучести  $\varphi(t, t_0)$ . В соответствии с этой методикой предельные деформации ползучести определяются коэффициентом, зависящим от средней прочности бетона, его возраста и относительной влажности, а развитие

ползучести во времени  $t$  зависит от относительной влажности и размеров поперечного сечения.

$$\varepsilon_{c,t} = \sigma_c / E_c [1 + \varphi_0 \beta(t, t_0)], \quad (3)$$

где  $\beta(t, t_0)$  – коэффициент, описывающий развитие ползучести во времени;

$t_0$  – возраст бетона на момент первого нагружения.

Несмотря на свои достоинства, данный способ не позволяет управлять механизмом деформирования бетона и влиять на предельные деформации ползучести. Принимая возможность реализации альтернативных методов учета ползучести в среде вычислительных комплексов, предлагается методика, основанная на коллоидно-химическом представлении механизма длительного деформирования бетона в соответствии с теорией профессора А. А. Плугина [10]. В основу теории положено более точное представление о кинетической кривой деформирования бетона (рис. 6).

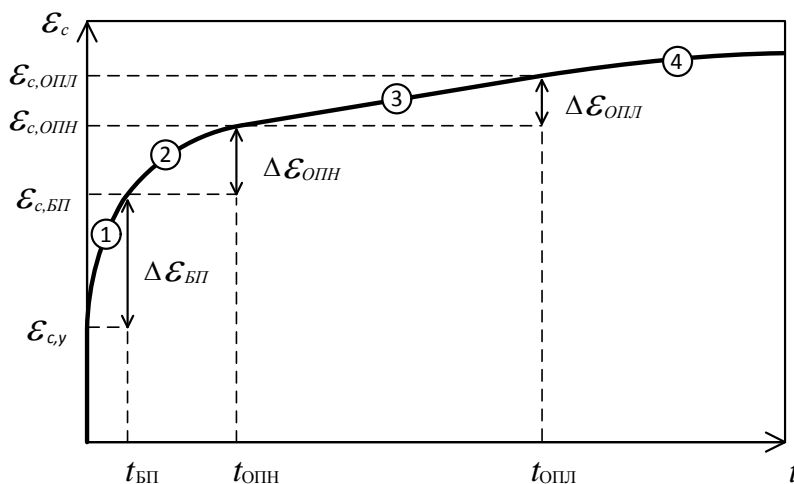


Рис. 6. Обобщенная кинетическая номограмма ползучести бетона

В результате получены уравнения развития деформаций в зависимости от 4 стадий работы бетона: сжатия в условно упругой постановке, стадии быстрой

ползучести (1), обычной ползучести, состоящей из нелинейной (2) и линейной (3) части, а также стадии долговременной ползучести (4). Результаты подтверждаются

експериментальними дослідженнями при  
длительном нагрєженнн цементных призм  
размером 10×10×40 см.

В соответствии с рис. 6 схема  
длительного деформирования бетона при  
сжатии и общее уравнение деформаций  
бетона принимает вид:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_y + \Delta\varepsilon_{БП} + \Delta\varepsilon_{ОПН} + \Delta\varepsilon_{ОПЛ} + \Delta\varepsilon_{ДП} \quad (4)$$

Частные уравнения, моделирующие кинетику деформаций каждой стадии:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c,БП}(t) &= \varepsilon_y + \Delta\varepsilon_{БП}(1 - e^{-t/T_r^{БП}}), \\ \varepsilon_{c,ОПН}(t) &= \varepsilon_{БП} + \Delta\varepsilon_{ОПН}(1 - e^{-t/T_r^{ОПН}}), \\ \varepsilon_{c,ОПЛ}(t) &= \varepsilon_{ОПН} + k_{ОПЛ}(t - t_{ОПН}), \\ \varepsilon_{c,ДП}(t) &= \varepsilon_{ОПЛ} + k_{Д}(t - t_{ОПЛ}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $T_r^{БП}$ ,  $T_r^{ОПН}$  – время релаксации в  
соответствии с дисперсно-фазовой  
моделью Терцаги на экспоненциальных  
стадиях деформирования;

$k_{ОПЛ}$ ,  $k_{Д}$  – кинетические коэффи-  
циенты, отражающие скорость роста  
деформаций общей (на линейном участке)  
и долговременной ползучести.

Коэффициент ползучести на любой  
стадии деформирования

$$\varphi(t) = (\varepsilon_c(t) - \varepsilon_{c,y}) / \varepsilon_{c,y} \quad (6)$$

Полные относительные деформации  
бетона, соответствующие завершению ста-  
дий быстроснатекающей ( $\varepsilon_{c,БП}$ ) и обычной  
( $\varepsilon_{c,ОПН}$ ,  $\varepsilon_{c,ОПЛ}$ ) ползучести, определяют-

ся исходя из гипотезы о механизме  
поведения субмикроструктуры бетона,  
состоящего из электрически заряженных  
частиц (глобул) гидросиликатного геля, при  
воздействии на нее сжимающего  
напряжения. Предполагается, что предель-  
ные деформации ползучести определяются  
деформациями геля за счет сжатия ДЭС,  
фильтрации воды из сжатых зон в  
растянутые по законам безнапорной  
водопроницаемости, а кинетика ползучести  
будет зависеть от масштабного фактора при  
фильтрационном выдавливании воды из  
геля.

Управление деформациями  
ползучести осуществляется через новые  
структурные коэффициенты,  
определяющие строение прослоек  
цементного камня между зернами песка и  
раствора между зернами щебня:

$$\alpha = V_p / V_{нус}^{Щ} = \left( \frac{\Pi}{\rho^{\Pi}} + \frac{\Ц}{\rho^{\Ц}} + \frac{B}{\rho^B} \right) / \left( \frac{\Pi\Ц}{\rho_{нас}} \Pi_{нус}^{Щ} \right), \quad (7)$$

$$\mu = V_{ЦП} / V_{нус}^{\Pi} = \left( \frac{\Ц}{\rho^{\Ц}} + \frac{B}{\rho^B} \right) / \left( \frac{\Pi}{\rho_{нас}} \Pi_{нус}^{\Pi} \right).$$

Оптимальные коэффициенты  $\alpha_{opt}$  и  $\mu_{opt}$  получены из условия наиболее полного контакта, который снижает расклинивающее давление и, соответственно, деформации сжатия и микротрещины.

Предложен алгоритм расчета на длительное действие нагрузки (рис. 7),

который в сочетании с программным комплексом Лири-САПР позволяет выполнять уточненный расчет конструкций на длительные воздействия и управлять деформациями ползучести через структурные характеристики  $\alpha$  и  $\mu$ .

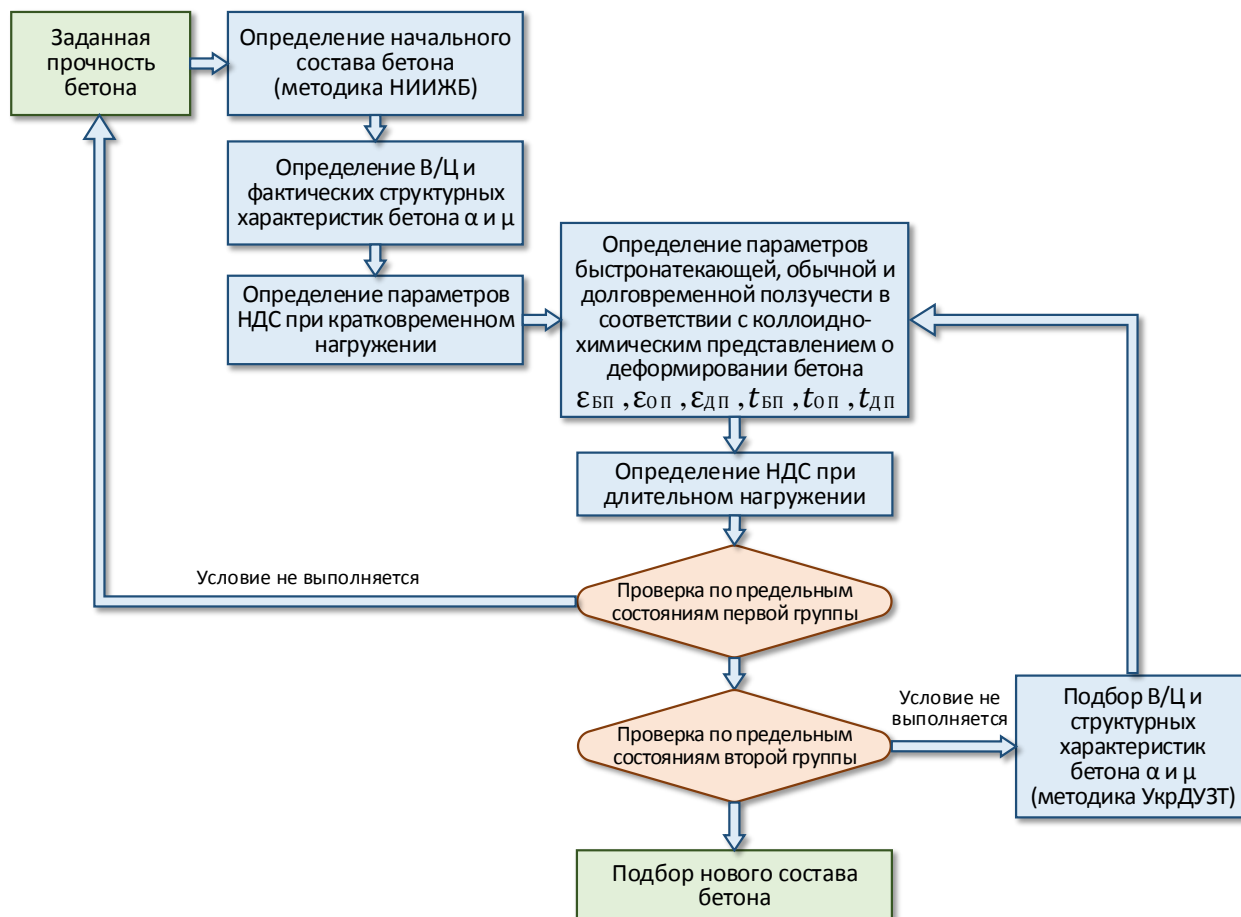


Рис. 7. Алгоритм минимизации предельных деформаций ползучести

Для определения дозировки составляющих бетона по заданным характеристикам применяется специализированная программа ПСБ, разработанная на кафедре строительных материалов, конструкций и сооружений Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Для рассматриваемых трубобетонных элементов расчет с учетом длительного действия нагрузки установил значительное перераспределение напряжений в сторону обоймы (рис. 8). Так, например, через 730 суток при нагрузке, равной 50 % от несущей способности, продольные  $\sigma_{sx}$  и поперечные  $\sigma_{sr}$  напряжения в обойме увеличиваются соответственно на 60 % и

70 %. Продольные напряжения в ядре  $\sigma_{c3}$  снижаются на 40 %, а поперечные напряжения  $\sigma_{c1}$ , наоборот, увеличиваются на 50 %. Прочность бетонного ядра  $f_{c3}$  за

период длительного действия нагрузки дополнительно увеличивается на 20 %. На 70 % увеличиваются продольные деформации в ядре  $\varepsilon_{c3}$ .

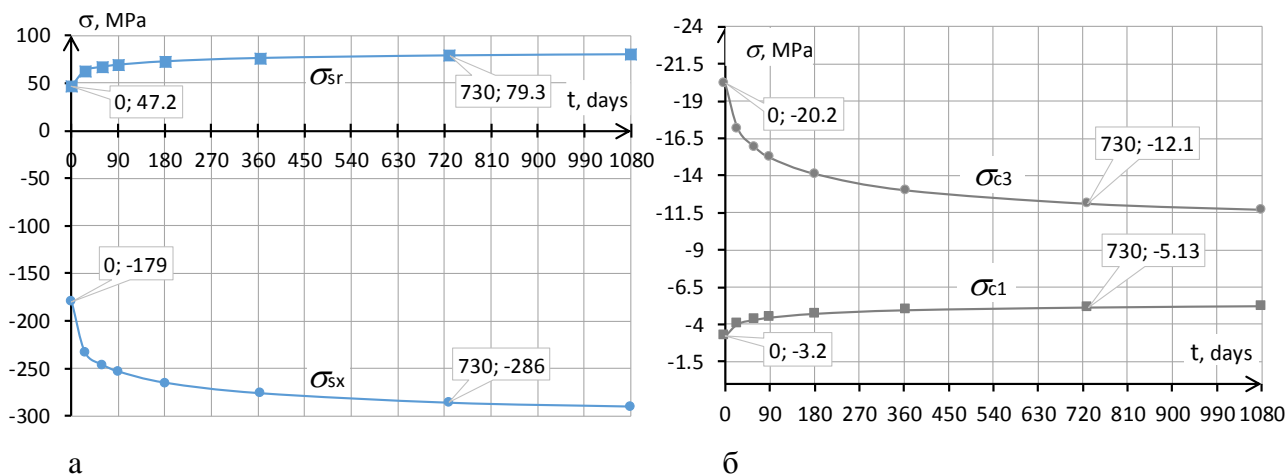


Рис. 8. Графики изменения напряжений: а – изменения напряжений  $\sigma_{sx}$  и  $\sigma_{sr}$  в обойме; б – изменения напряжений  $\sigma_{c3}$  и  $\sigma_{c1}$  в ядре

**Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** В результате выполненных исследований получена методика расчета напряженно-деформированного состояния и несущей способности трубобетонных элементов с учетом кратковременного и длительного действия нагрузки, физической нелинейности материалов, геометрической нелинейности обоймы, эффектов обжатия бетона и увеличения прочности ядра. Адекватность методики обеспечивается

сопоставлением экспериментальных и теоретических результатов.

Принятый подход учета длительного нагружения включает алгоритм управления ползучестью через структурные характеристики бетона. Также установлено, что длительные процессы, которые происходят в бетонном ядре, существенно влияют на напряженно-деформированное состояние. Эффективность трубобетона со временем не снижается и будет зависеть от рационального состава бетона и оптимальных соотношений конструктивных параметров.

#### Список использованных источников

1. Mechanical Properties of High Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns [Текст] / Ke Feng Tan, Lai Bao Liu // Advanced Materials Research Vols. 472-475 (2012) – P. 1119-1125.
2. Стороженко, Л. И. Сравнение методик расчета трубобетонных конструкций [Текст] / Л. И. Стороженко, А. В. Семко // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – К.: Техника, 2005. – Вып. 63. – С. 59-70.



3. Eurocode 4: EN 1994-1-1: 2004 Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1. Brussels, 2004. – 127 p.
4. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К.: Факт, 2007. – 394 с.
5. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона [Текст] / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
6. Ватуля, Г. Л. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков [Текст] / Г. Л. Ватуля, Е. И. Галагура, Д. Г. Петренко // Вестник ПНИПУ: Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – Пермь, 2014. – № 2. – С. 48-56.
7. Лобяк, О. В. Моделирование работы сталебетонных пустотных плит перекрытий с учетом нелинейных свойств конструкций и материалов [Текст] / О. В. Лобяк, Д. В. Головки // Зб. наук. статей. Сер. Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація. – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – Вип. 11. – С. 156-162.
8. Лобяк, А. В. Моделирование ползучести бетона при оценке напряженно-деформированного состояния сталебетонных плит перекрытия [Текст] / А. В. Лобяк, А. А. Плугин, Д. В. Головки // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2016. – Вип. 63. – С. 79-83.
9. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004. – 226 p.
10. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст]: монография в 3-х т. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / [А. Н. Плугин, А. А. Плугин, Л. В. Трикоз и др.]; под ред. д-ра хим. наук, проф. А. Н. Плугина. – К.: Наук. думка, 2012. – 286 с.

---

Ватуля Гліб Леонідович, д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-70. E-mail: glebvatulya@gmail.com.

Лобяк Олексій Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-70. E-mail: Lobiak@ukr.net. Черногіль Віталій Богданович, інженер ТОВ «Національні ресурси».

Vatulya Glib, DSc, associate Professor, Head of Structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, Tel.: (057) 730-10-70. E-mail: glebvatulya@gmail.com.

Lobiak Alexey, Ph.D., Department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, Tel.: (057) 730-10-70. E-mail: Lobiak@ukr.net.

Chernogil Vitaliy, engineer, National Resources Ltd.

Стаття прийнята 13.06.2017 р.

УДК 624.016

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ В ТРУБОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Д-р техн. наук Д. А. Єрмоленко, канд. техн. наук О. В. Демченко (ПолтНТУ)

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА В ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Д-р техн. наук Д. А. Ермоленко, канд. техн. наук О. В. Демченко (ПолтНТУ)

## EVALUATION OF EFFICIENCY OF HIGH-STRENGTH CONCRETE IN FILLED STEEL TUBES

Dr. tehn. sciences D. A. Yermolenko, Ph.D., PhD tehn. O. V. Demchenko

*У статті наведено результати оцінки ефективності застосування високоміцних бетонів у сталобетонних конструкціях на основі експериментальних досліджень коротких центрально-стиснутих трубобетонних елементів. Визначено несучу здатність, відносні деформації, проаналізовано систему коефіцієнтів ефективності роботи бетонів у трубобетоні залежно від способу завантаження та міцності бетонного осердя.*

**Ключові слова:** трубобетон, високоміцний бетон, несуча здатність, коефіцієнт ефективності.

*В статье приведены результаты оценки эффективности использования высокопрочных бетонов в сталобетонных конструкциях на основе экспериментальных исследований коротких центрально-сжатых трубобетонных элементов. Определено несущую способность, относительные деформации, проанализировано систему коэффициентов эффективности работы бетонов в трубобетоне в зависимости от способа загрузки и прочности бетонного сердечника.*

**Ключевые слова:** трубобетон, высокопрочный бетон, несущая способность, коэффициент эффективности.

*The article gives the results of evaluation of efficiency of high-strength concretes in composite steel-concrete constructions based on experimental researches of shot axial-compressed concrete felled steel tube elements. It has been defined the carrying capacity and relative strains. It has been analyzed the system of coefficients of concrete effectiveness in concrete felled steel tube according to dependence on loading way and strength of concrete core.*

**Keywords:** concrete filled steel tube, high-strength concrete, carrying capacity, coefficient of efficiency.

**Вступ.** Трубобетонні конструкції складаються зі сталеві труби і бетонного ядра, що працюють спільно. Такі конструкції характеризуються багатьма позитивними якостями. При відносно малому поперечному перерізі вони здатні витримувати великі зусилля, а бетон у

таких конструкціях за рахунок об'ємного напруженого стану сприймає подовжні напруження, що значно перевищують його призову міцність. Останнім часом на великих будівництвах Західної Європи, США, Китаю, Японії все частіше зустрічаються трубобетонні конструкції

[1, 3]. Трубобетонні конструкції ефективні при великих стискаючих навантаженнях, тому мають меншу витрату металу і бетону в порівнянні із звичайними залізобетонними стрижнями. В таких конструкціях відкривається широка можливість для використання сучасних високоміцних бетонів. Тут практично подолано один з основних недоліків таких бетонів – їх високу крихкість [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато досліджень спрямовано на отримання балансу між міцністю труби-оболонки та міцністю бетонного ядра на несучу здатність трубобетонного елемента. З тим, що вплив міцності сталі на міцність трубобетону суттєвий, погоджуються всі дослідники. Але щодо впливу міцності бетону погляди розділяються. Ю. В. Сітніков вважає, що більш ефективним є використання високих класів бетону та сталей низької міцності, а О. А. Долженко, Л. І. Стороженко, В. М. Сурдін [4] переконують, що більш ефективно застосовувати бетони невисоких класів. У трубобетонних елементах застосовувалися в основному бетони класів за міцністю на стиск С12/15 – С32/40. Однак застосування бетонів класів за міцністю на стиск більше С40/50 майже не досліджувалося. Крім того, підвищити ефективність роботи елементів на осьовий стиск можна за рахунок зміни структури бетонного ядра і його композиційної основи, які істотно впливатимуть на деформативні властивості [5].

У нашій країні значному поширенню трубобетонних конструкцій перешкоджає ряд причин, основною серед яких є відсутність вітчизняних норм проектування трубобетонних конструкцій. Удосконалення трубобетонних конструкцій пов'язано, по-перше, із застосуванням високоміцних бетонів, що дасть змогу істотно знизити розміри поперечних перерізів, а отже, і загальні витрати на будівництво, і, по-друге, із забезпеченням найбільш

сприятливих умов спільної роботи бетонного ядра і сталеві оболонки на всіх етапах навантаження [6].

**Визначення мети та задачі дослідження** Метою досліджень було оцінити ефективність застосування в трубобетонних конструкціях високоміцного бетону, які виготовлено із застосуванням вітчизняної бази будівельних матеріалів. Для цього ставились такі задачі: провести експериментальні дослідження коротких трубобетонних елементів при різних способах передачі навантаження та різній міцності бетонного осердя; на основі аналізу напружено-деформований стану та несучої здатності стиснутих конструктивних елементів оцінити ефективність застосування високоміцного бетону в трубобетонних конструкціях.

**Основна частина дослідження.** Відповідно до завдання було розроблено програму експериментальних досліджень [8], яка передбачала випробовування міцності трубобетонних елементів різних серій стискаючим поздовжнім зусиллям залежно від міцності бетонного осердя, товщини оболонки та способу передачі навантаження: ТБ – навантаження передається на комплексний переріз; БВТ – навантаження передається на бетонне осердя.

Для виготовлення зразків було використано сталеві труби діаметром 159 мм із товщиною стінки 3,5 4,0 та 6 мм, що заповнювалися бетоном п'яти класів з різною міцністю [9]. Усі трубобетонні зразки мали довжину 640 мм ( $L/D = 4$ ). Прикладання навантаження здійснювалося ступінчасто в 0,1-0,05 від граничного значення. На всіх ступенях вимірювалися поздовжні і поперечні деформації із застосуванням приладу ВНП-8.

Під час завантаження фіксувалось два характерні для трубобетону зусилля (таблиця): зусилля  $N_1$  – досягнення матеріалом оболонки межі текучості; зусилля  $N_2$  – максимальне зусилля зразків.

Результати випробування дослідних зразків

Серія зразків	Зусилля $N_1$ , кН	Зусилля $N_2$ , кН	Відношення $N_2/N_1$	$m1$	$m2$	$\eta$
ТБ-1-1	875	1250	1,43	0,99	1,28	0,96
ТБ-1-2	1300	1645	1,27	0,94	1,12	0,91
ТБ-1-3	1400	1705	1,22	0,89	1,03	0,85
ТБ-1-4	1450	1810	1,25	0,87	1,03	0,82
ТБ-1-5	1600	1770	1,11	0,86	0,91	0,82
ТБ-2-2	1350	1775	1,31	0,88	1,09	0,81
ТБ-2-3	1500	2020	1,35	0,87	1,11	0,81
ТБ-2-4	1600	2090	1,31	0,88	1,10	0,83
ТБ-2-5	1700	2400	1,41	0,85	1,15	0,80
БВТ-1-6	950	1275	1,34	1,07	1,31	1,11
БВТ-1-7	1500	1530	1,02	1,08	1,04	1,11
БВТ-1-8	1620	1750	1,08	1,03	1,06	1,04
БВТ-1-9	1975	2130	1,08	1,15	1,21	1,20
БВТ-1-10	2050	2275	1,11	1,10	1,17	1,13
ТБ-3-2	1900	2510	1,32	1,04	1,31	1,08
ТБ-3-3	2050	2600	1,27	1,02	1,24	1,04
ТБ-3-4	2100	2740	1,30	1,00	1,25	1,01
ТБ-3-5	2600	3200	1,21	1,14	1,35	1,24

Момент досягнення зусилля  $N_1$  фіксувався за такими ознаками: стрілка зусиллевимірної апаратури «застигала» на певній величині, але при цьому за електротензорезисторами спостерігався приріст відносних деформацій; лакове покриття втрачало «глянець». Далі зусилля продовжувало зростати. Досягнення зусилля  $N_2$  характеризується інтенсивним деформуванням зразка. На час розвантаження довжина зразків зменшувалась на 5-8 % від початкової довжини.

Слід зазначити, що міцність бетонного осердя суттєво впливає на характер розвитку напружено-деформованого стану трубобетонних елементів. Так, у зразках із бетоном високої міцності до зусилля  $N_1$  розвиток деформацій мав лінійний характер (рис. 1).

При завантаженні дослідних зразків на комплексний переріз було зафіксовано, що зі збільшенням міцності бетону

збільшується несуча здатність трубобетону. З цих графіків можна зробити висновки, що зі збільшенням міцності бетонного ядра на 60 % несуча здатність зразків трубобетону збільшилась на 43 %, деформації зростають пропорційно прикладеному зусиллю.

При досягненні величини руйнівного зусилля  $N_2$  усі дослідні зразки мали значне перевищення несучої здатності трубобетонного елемента над сумарною – від 7 до 28 %. А при досягненні зусилля  $N_1$  спосіб передачі навантаження виявився суттєвим фактором, що впливає на ефективність конструктивного трубобетонного елемента із високоміцним бетоном. Спільним при досягненні зусиль  $N_1$  та  $N_2$  є вплив коефіцієнта армування. Так, при його зростанні відбувається збільшення ефективності сумісної роботи труби-оболонки та осердя із високоміцного бетону.

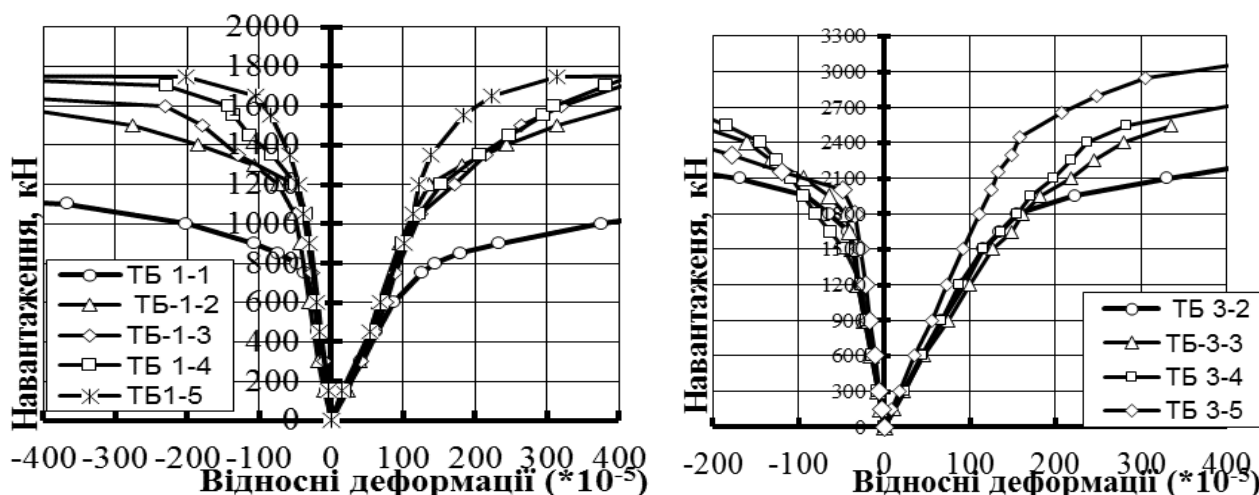


Рис. 1. Залежність поздовжніх та поперечних деформацій від навантаження зразків серії ТБ-1 та ТБ-3

Максимальні значення несучої здатності  $N_2$  на 2-30 % перевищували значення навантажень при початку пластичності труби  $N_1$ . Найбільше значення  $N_1$  мав центрально-стиснутий зразок ТБ3-5:  $N_1 = 2600$  кН, найбільше значення  $N_2$  мав зразок ТБ-3-5:  $N_2 = 3200$  кН. Спостерігається збільшення несучої здатності елементів зі збільшенням міцності бетону та товщини стінки труби.

За результатами випробувань було обчислено коефіцієнт ефективності роботи бетонного осердя труботбетону  $\eta$  та коефіцієнт ефективності роботи в цілому  $m$ .

$$m = \frac{N_{mb}}{N_m + N_c}$$

де  $N_{mb}$  – несуча здатність центрально-стиснутого труботбетонного елемента;  $N_m$  – несуча здатність труби-оболонки;  $N_c$  – несуча здатність бетонного осердя.

Для оцінювання ефективності роботи бетонного ядра був використаний коефіцієнт, що визначається за такою формулою:

$$\eta = \frac{\sigma_c}{f_{cm}}$$

При цьому

$$\sigma_c = \frac{N_{mb} - N_m}{A_c}$$

де  $f_{cm}$  – призмова міцність;  $A_c$  – площа поперечного перерізу бетонного ядра.

Значення коефіцієнта  $\eta$  наведені в таблиці. Коефіцієнт оцінювання ефективності бетонного ядра (рис. 2) коливається в межах 0,8 – 1,24 і залежить від товщини стінки та способу передачі навантаження.

Значення коефіцієнтів ефективності роботи труботбетонних елементів в цілому  $m$  наведені в таблиці. Коефіцієнт  $m$  залежить від способу передачі навантаження на труботбетонний елемент, товщини стінки труби та міцності бетону. При передачі навантаження на комплексний переріз  $m = 0,85-1,14$ , при передачі навантаження тільки на бетон цей коефіцієнт дорівнював 1,03-1,15. У зразках серій ТБ-1 та ТБ-2 зменшується значення цього коефіцієнта зі збільшенням міцності бетону (рис. 3).

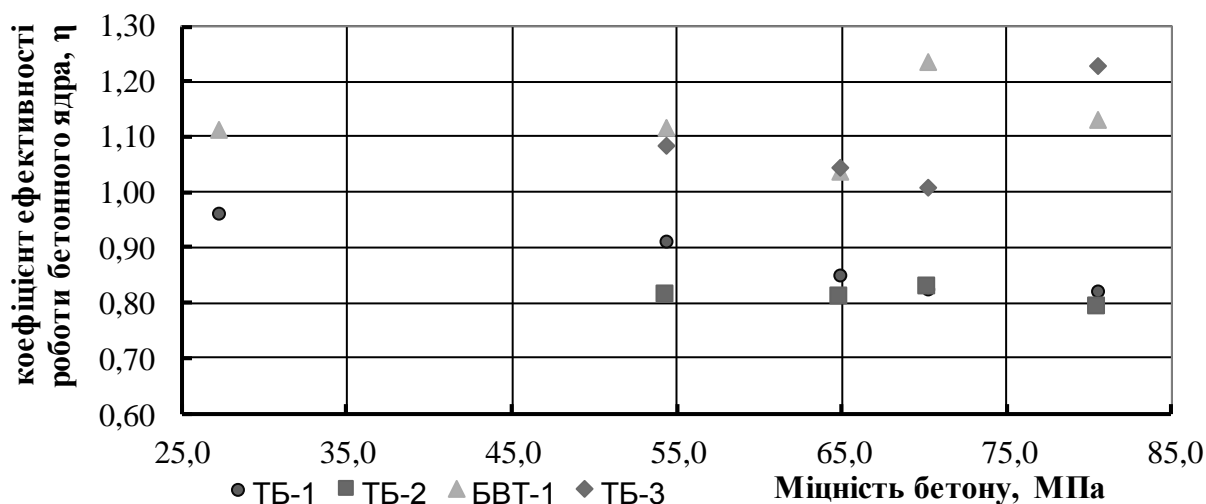


Рис. 2. Розвиток коефіцієнта ефективності роботи бетонного ядра

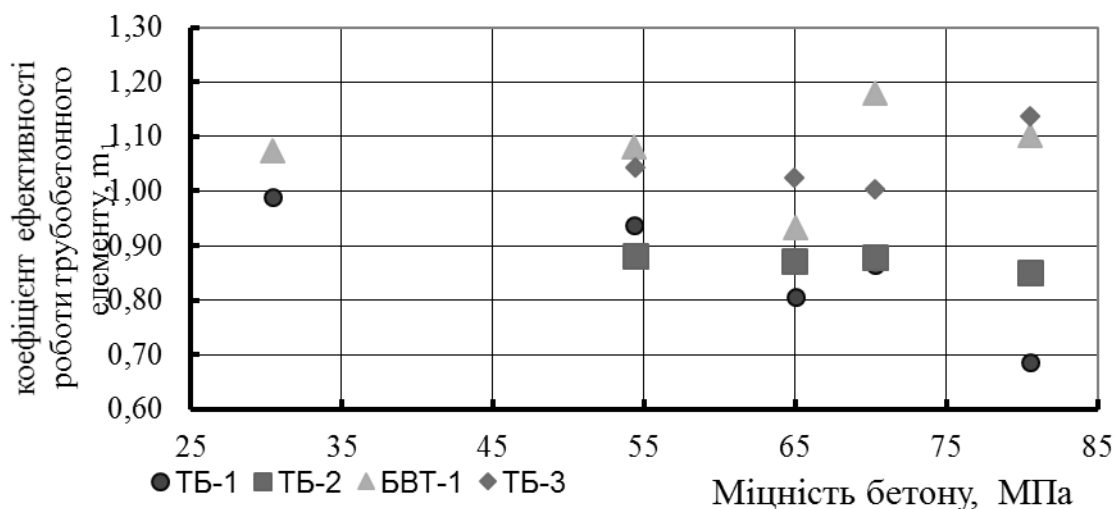


Рис. 3. Розвиток коефіцієнта ефективності роботи трубобетонного елемента

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** У результаті експериментальних досліджень були отримані експериментальні дані про несучу здатність та деформований стан центрально-стиснутих трубобетонних елементів із ядрами з високоміцного бетону та обчислено коефіцієнти ефективності застосування високоміцного бетону в трубобетонних конструкціях. За результатами випробувань центрально-

стиснутих трубобетонних елементів встановлено, що граничне зусилля  $N_2$  на 2-43% перевищує значення  $N_1$ . Таким чином, співвідношення  $N_2/N_1$  змінювалось у межах від 1,02 до 1,43. Причому зі збільшенням міцності бетонного осердя це співвідношення зменшується. Залежно від коефіцієнта армування (товщини стінки) та міцності бетонного ядра значення коефіцієнта ефективності роботи бетонного ядра  $\eta$ , яке обчислено для зусилля  $N_1$ , коливається в межах від 0,8 до 1,24.

Максимальне значення коефіцієнта має труобетонний елемент ТБ-3-5 з товщиною стінки сталеві оболонки 6 мм та міцністю бетону 80,5 МПа. Коефіцієнт ефективності роботи труобетону  $m$  збільшується із збільшенням коефіцієнта армування, а зі

збільшенням міцності бетону коливається від 0,8 до 1,14. Найбільш ефективними виявились зразки серії ТБ-3 з товщиною стінки сталеві оболонки 6 мм та міцністю бетону 80,5 МПа.

### Список використаних джерел

1. Кебенко, В. Н. Опыт строительства сталебетонных конструкций в Германии [Текст] / В. Н. Кебенко // Проблемы теории та практики залізобетону: зб. наук. статей. – Полтава: ПДТУ ім. Ю. Кондратюка, 1997. – С. 206-209.
2. Стороженко, Л. І. Загальні відомості про труобетон [Текст] / Л. І. Стороженко // Сталезалізобетон: зб. наук. праць Полт. ДТУ ім. Ю. Кондратюка; за ред. д.т.н., проф. Л. І. Стороженка. – Полтава: ПДТУ, 2006. – С. 11-154.
3. Mechanical Properties of High Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns [Текст] / Ke Feng Tan, Lai Bao Liu // Advanced Materials Research Vols. 472-475 (2012) – P. 1119-1125.
4. Стороженко, Л. І. Труобетон [Текст] / Л. І. Стороженко, О. І. Лапенко, Д. А. Єрмоленко. – Полтава : ПолтНТУ, 2009. – 306 с.
5. Кикин, А. И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном [Текст] / А. И. Кикин, Р. С. Санжаровский, В. А. Труль. – М.: Стройиздат, 1974. – 145 с.
6. Кришан, А. Л. Сталетруобетонные колонны с предварительно обжатым ядром [Текст] / А. Л. Кришан, М. Ш. Гареев, А. И. Сагадатов // Бетон и железобетон. – 2004. – №6. – С. 11-14.
7. Стороженко, Л. І. Сумісна робота компонентів в труобетонному конструктивному елементі [Текст] / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко // Теорія і практика будівництва: Вісник національного університету "Львівська політехніка". – Львів: Львівська політехніка, 2010. – Вип. 662. – С. 350-354.
8. Стороженко, Л. І. Несуча здатність коротких сталевих труб заповнених високоміцним бетоном [Текст] / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, О. В. Демченко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 69. – С. 492-496.
9. Стороженко, Л. І. Експериментальні дослідження високоміцних бетонів для ядер труобетонних елементів [Текст] / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, О. В. Демченко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2013. – Вип. 27. – С. 222-228.

---

Єрмоленко Дмитро Адольфович, д-р техн. наук, професор кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Тел.: (066) 450-33-49. E-mail: yermolenko-da@ukr.net.

Демченко Оксана Володимирівна, канд. техн. наук, старший викладач кафедри технології будівельних

конструкцій виробів і матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Тел.: (050) 189-34-19. E-mail: homenko\_81@ukr.net.

Yermolenko Dmitry, doctor of technical science, professor department of highways, geodesy, land management and rural building, Poltava national technical Yuri Kondratyuk university. Tel.: (066) 450-33-49. E-mail: yermolenko-da@ukr.net.

Demchenko Oksana candidate of technical sciences, senior lecture, department of technology building designs, products and materials, Poltava national technical Yuri Kondratyuk university. Tel.: (050) 189-34-19. E-mail: homenko\_81@ukr.net.

Стаття прийнята 13.06.2017 р.

УДК 66.04

**ЛАНЦЮГИ МАРКОВА ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ У БАРАБАННІЙ ПЕЧІ ПРИ СПАЛЮВАННІ МУНІЦИПАЛЬНИХ ВІДХОДІВ**

Кандидати техн. наук О. П. Крот (ХНУБА), О. І. Ровенський (ПСНЦ НАН України)

**ЦЕПИ МАРКОВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СМЕШИВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ В БАРАБАННОЙ ПЕЧИ ПРИ СЖИГАНИИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

Кандидаты техн. наук. О. П. Крот (ХНУСА), О. И. Ровенский (ПСНЦ НАН Украины)

**AN APPLICATION OF MARKOV CHAINS TO MODELING OF MIXING OF COMPONENTS IN A ROTARY KILN DURING MUNICIPAL WASTE INCINERATION**

PhD. tehn. O. P. Krot, O. I. Rovenskyi

*Термічний метод утилізації відходів має ряд переваг перед іншими методами. Особливо значущим є зменшення обсягу відходів і генерування додаткової теплової та електричної енергії. Мета роботи: побудова аналітичної математичної моделі змішування компонентів у барабанній печі. Модель базується на математичному апараті ланцюгів Маркова. Модель дає змогу визначити концентрацію ключового компонента в будь-якому елементарному обсязі циркуляційного контура барабана в будь-який момент часу і розраховувати статистичні характеристики однорідності суміші.*

**Ключові слова:** спалювання відходів, барабанна піч, ланцюги Маркова, відходи в енергію, термічна обробка.

*Термический метод утилизации отходов имеет ряд преимуществ перед другими методами. Особо значимым является уменьшение объема отходов и генерирование дополнительной тепловой и электрической энергии. Цель работы: построение аналитической математической модели смешивания компонентов в барабанной печи. Модель базируется на математическом аппарате цепей Маркова. Модель позволяет определять концентрацию ключевого компонента в любом элементарном объеме циркуляционного контура барабана в любой момент времени и рассчитывать статистические характеристики однородности смеси.*

**Ключевые слова:** сжигание отходов, барабанная печь, цепи Маркова, отходы в энергию, термическая обработка.

*The thermal method of management of municipal waste has a number of advantages over other methods. Especially significant are the decrease in the waste and the produce of additional thermal and electrical energy. Waste incineration technology is widely used in many countries. The application of a multi-stage emission control system minimizes pollution of the environment. The waste incineration process is a complex mechanism due to the heterogeneity of composition of the waste. The goal of the research is to build an analytical mathematical model of mixing of components in a rotary kiln. The model is based on the mathematical apparatus of Markov chains. The model allows to determine the concentration of the key component in any elementary volume of material circulating in the rotary kiln at any time and to calculate the statistical characteristics of the homogeneity of the mixture. The model can be used to optimize the recycling process. For a batch-type machine, the proposed model allows to evaluate various sequences of charging of*



*components. In the future, the model will be used to research new designs of the equipment with rotary kilns.*

**Keywords:** *waste incineration, rotary kiln, Markov chain, waste to energy, heat treatment.*

**Вступ.** Муніципальні відходи є джерелом енергії, які за теплою згоряння можна порівняти з деякими марками вугілля і торфом. Технологія спалювання відходів широко використовується в багатьох країнах. Наприклад, у Швеції щорічно спалюється близько 2,5 млн т побутових відходів. Місто Мальме (Швеція) використовує 60 % енергії, отриманої з відходів. Сприяє цьому зростаюча частка пластику у відходах. Для утилізації побутових відходів, що видаляються з вагонів пасажирських поїздів, залізничних станцій і служб, на Південній залізниці було впроваджено в експлуатацію пересувну сміттєспалювальну установку в Харкові і стаціонарну установку в Люботині Харківської області. Для ефективного спалювання сміття, різного за властивостями, у тому числі і великогабаритного, використовується термokatалітична установка з обертовою піччю. Установки такого типу містять: барабанну обертову піч з пальником, завантажувальний пристрій, камеру допалювання, систему каталітичного очищення, систему зрошення для розбризкування содового розчину, систему пилоочистки, димосос і димову трубу. Крім того, установка обладнується системою теплообмінників для нагрівання повітря, що подається на спалювання, і охолодження димових газів перед їх подачею до димососа.

Компоненти, які містяться в спалюваному смітті, з високою теплою згоряння значно знижують витрати палива при спалюванні. Ці компоненти – пластик, дерево, папір тощо. Для ефективного згоряння важливим є стабільність співвідношення палива (як у складі сміття, так і газового) і кисню. Це означає, що відсотковий склад горючих компонентів в

складі сміття повинен бути стабільним. Подача сміття до установки зазвичай дуже нестабільна. До того ж завантажувальні пристрої сприяють сегрегації матеріалу: конвеєр – через скочування великих частинок сміття від середини до периферії, завантажувальна каретка – через періодичність дії. Обертова піч забезпечує найкраще змішування компонентів серед усіх відомих печей. У цьому аналітичному дослідженні запропоновано підхід до моделювання процесу змішування компонентів у обертовій печі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тема досліджень процесу спалювання відходів є актуальною. Одним з пріоритетних напрямків у процесах спалювання відходів є енергозбереження – низьке споживання енергії й мінімальні теплові втрати.

В [1] автори відзначили, що однією з причин незадовільного управління поведінкою з твердими відходами є недостатнє і неправильне функціонування обладнання, яке використовується для спалювання сміття.

У [2] було проаналізовано перспективність комбінованого використання теплової та електричної енергії на сучасних сміттєспалювальних заводах у Мальме і Гетеборзі (Швеція). Також автор [2] провів критичний аналіз впливу ефективності рекуперації енергії на викиди парникових газів. Наведено баланс на основі даних наявних заводів, а не модель заводу. Авторами [3] була використана модель барабанної печі для виконання аналізу поведінки печі при різних експлуатаційних і конструктивних параметрах, а саме: швидкості потоку відходів, коефіцієнта надлишку повітря, властивостей і товщини вогнетривких матеріалів та ізоляторів.

Розрахунок балансу енергії й маси в печі для спалювання відходів є дуже

важливою частиною розроблення та оцінювання процесу спалювання.

Автори [4] описують комп'ютерну модель, яка використовується для розрахунку балансу енергії й маси обертової печі для спалювання відходів. Розрахунок оснований на припущенні, що існує термодинамічна умова рівноваги в камері згоряння. Враховано параметри моделі: теоретична витрата повітря для горіння, кількість надлишкового повітря, необхідного для конкретних випадків горіння, швидкість потоку димового газу й температури на виході. Нинішні моделі печей, у тому числі барабанних, побудовані на тепловому й матеріальному балансі в процесі переробки. Вони не враховують характеру руху матеріалу всередині барабана.

**Метою статі** є моделювання підготовки багатокомпонентних муніципальних відходів до спалювання в барабанних обертових печах для підвищення ефективності спалювання і зниження викидів в атмосферу.

Підтримка стабільних умов горіння означає наявність стабільного складу різних компонентів у відходах, стабільної вологості та однорідності компонентів, що може бути досягнуто якісним змішуванням.

**Постановка задачі дослідження.** Для ефективного спалювання необхідно рівномірно змішувати матеріал. Барабанні бетонозмішувачі найбільш універсальні серед змішувачів, вони можуть працювати із заповнювачем як дрібним, так і дуже крупним [5].

Серед методів визначення раціональних режимів змішування та вибору конструкції змішувача найперспективнішим можна вважати аналітичне математичне моделювання як найменш ресурсомісткий і найбільш оперативний метод.

Аналітично процес змішування прийнято розглядати як складну фізико-механічну систему (ФМС). Комплексний системний аналіз процесу змішування припускає на першому етапі якісний аналіз ФМС [6]. При цьому виділяються два рівні ієрархії фізико-механічних ефектів і явищ, що наявні при протіканні процесу змішування сипких матеріалів: 1) сукупність фізико-механічних явищ у локальному об'ємі (мікрорівень); 2) те ж саме в об'ємі всього апарата (макрорівень). Під локальним об'ємом розуміють деякий елементарний об'єм, у якому міститься досить багато частинок дисперсних фаз. Структурну схему ефектів першого рівня ієрархії ФМС для сполученого процесу змішування - здрібнювання розглянуто в роботі [6] і вона може бути використана при аналізі процесу змішування після внесення відповідних спрощень.

Розглянемо більш докладно другий рівень – макрорівень.

Для опису процесу змішування сипких матеріалів найчастіше використовують *дифузійну* і *коміркову* математичні моделі.

*Дифузійна* модель [7] відповідає потоку з поршневым рухом матеріалу при наявності поздовжнього і поперечного перемішування частинок. Основне рівняння має вигляд

$$\frac{dC}{dt} = -V \frac{dC}{dx} - \bar{D}_L \frac{d^2C}{dx^2} + \frac{\bar{D}_R}{R} \frac{d}{dR} \left( R \frac{dC}{dR} \right), \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація ключового компонента;  $t$  – час;  $V$  – лінійна швидкість потоку;  $x$  – координата вздовж потоку;  $D_L$  і  $D_R$  – коефіцієнти поздовжнього і поперечного

перемішування (аналогі коефіцієнтів дифузії);  $R$  – радіус поперечного перерізу потоку.

Основний недолік цього підходу полягає в складності розв'язання рівняння двопараметричної дифузійної моделі й необхідності експериментального визначення значень  $D_L$  і  $D_R$  на дослідних установках.

Сутність другого підходу (*коміркова* математична модель) полягає в тому, що процес змішування подається як результат перерозподілу частинок при їх русі в потоці матеріалу через систему ланцюжків, складених з комірок ідеального змішування й утворюючих циркуляційний контур змішувача. Цей підхід докладно розглянуто в роботі [8]. Використовуючи його, можна скласти рівняння для розрахунку кінцевої концентрації циркуляційного контура практично з будь-яким з'єднанням зон, але для багатоконтурних схем кінцеві вирази для концентрацій, перетворених за Лапласом, виявляються складними.

Для побудови моделі на другому рівні ієрархічної структури ФМС з урахуванням процесів, що протікають не в локальному об'ємі апарата, а у всьому його робочому просторі, найбільш ефективним визнано математичний апарат випадкових марківських процесів. Приклади їх використання, але для машин з іншими принципами змішування, наведено в роботі Першина В. С. з колегами [9], а також у [8, 10, 11] та у [12].

Як відомо з [9,13], марківські процеси підрозділяють на три види: 1) дискретні в просторі і в часі; 2) дискретні в просторі і

безперервні в часі; 3) безперервні в просторі і в часі.

Для випадку барабанної машини не всі компоненти одночасно беруть участь у процесі змішування, а тільки ті, що в цей момент часу зісковзують з поверхні матеріалу і приземлюються на матеріал (рис. 1). Тому використовуємо перший вид марківських процесів [9]. Рухи переходу ключового компонента на рис. 1 позначені стрілками.

Процес називають марківським, якщо стан системи в деякий момент часу визначає лише ймовірність  $P_{ij}(t)$  того, що через проміжок часу  $t$  система буде перебувати в стані  $E_j$ , причому ця ймовірність не залежить від протікання процесу в попередній період. Ймовірності  $P_{ij}(t)$  називають перехідними ймовірностями.

**Застосування математичного апарату марківських процесів для аналітичного моделювання змішування сміття перед спалюванням у барабанній печі.** Суть методу ланцюгів Маркова така. Нехай  $\{E_1, E_2, \dots, E_k\}$  – множина станів деякої фізичної системи. У будь-який момент часу система може перебувати в одному стані й змінює свій стан тільки в моменти  $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$ . Для однорідних ланцюгів Маркова ймовірність  $p_{ij}$  переходу системи зі стану в стан за один крок залежить тільки від того, з якого стану в який здійснювався перехід. Ймовірності переходу  $p_{ij}$  розташовуємо у вигляді матриці. Позначимо її

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1k} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{k1} & p_{k2} & \dots & p_{kk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

і будемо називати *матрицею переходу* однорідного ланцюга Маркова за один крок. Матриця  $P$  має такі властивості:

$$a) 0 \leq p_{ij} \leq 1; \quad (3)$$

$$б) \sum_{j=1}^k p_{ij} = 1 \quad (i=1, 2, \dots, k), \quad (4)$$

тобто сума елементів кожного рядка матриці переходу дорівнює одиниці. Квадратні матриці, для яких виконуються умови а і б, називаються *стохастичними*.

Вектор  $a=(a_1, a_2, \dots, a_k)$ , де  $a_i= P(E_i)$  – імовірність появи стану  $E_i$  ( $i=1, 2, \dots, k$ ) у початковому випробуванні, називається *вектором початкових імовірностей*.

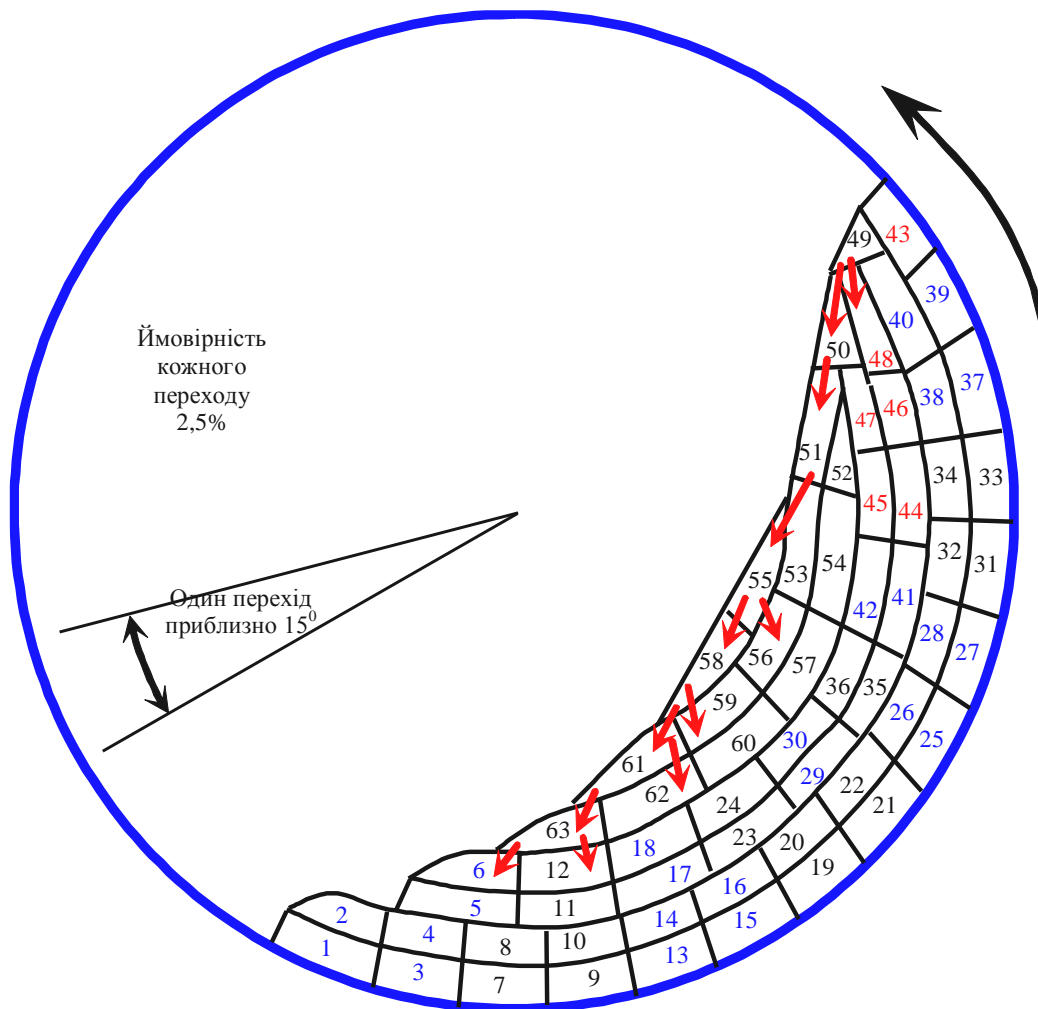


Рис. 1. Циркуляційний контур та шляхи розподілу ключового компонента.  
Один повний оберт орієнтовно 24 переходи (кожен з переходів –  $15^0$ )

Розділимо весь матеріал, що міститься в барабанній печі, на підшари (наприклад шість-сім підшарів (рис. 1)). Тут зовнішній шар: комірки 1, 3, 7, 9, 13, 15, 19, 21, ... Усі підшари розділимо радіальними лініями на комірки приблизно однакового розміру. При цьому кількість комірок у підшарах, що перебуває ближче до центра барабана, виявиться меншою, ніж у зовнішніх підшарах. На більшій частині

одержаного *циркуляційного контура* матеріал перебуває в щільному стані – комірки від 1 до 5, від 7 до 11, від 13 до 47 та ін. (рис. 1). У зонах, де кут нахилу матеріалу перевищує кут внутрішнього тертя (границі комірок 63-6, 63-12, 61-63, 61-62, 58-61, 58-59, 55-58, 55-56, 51-55, 50-51, 49-50, 49-48), починається сповзання матеріалу. У зонах сповзання шарів матеріалу відбувається сегрегація матеріалу

за крупністю та за густиною внаслідок неоднаковості значень кінетичної енергії частинок різних розмірів і різної густини. На сегрегації основане змішування в таких системах. Частинки більшого розміру і меншої густини продовжують рух у своєму

шарі, дрібніші частинки і частинки більшої густини можуть частково переходити у внутрішні підшари. На рис. 1 такі можливі переходи позначено стрілками. Взаємопроникнення компонентів різних фракцій проілюстровано на рис. 2.

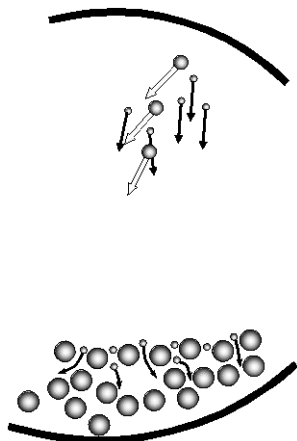


Рис. 2. Ілюстрація розподілення ключового компонента серед масиву заповнювача

Скориставшись сформованою термінологією, назовемо компонент, розподіл якого у всьому обсязі сміття будемо досліджувати, *ключовим* компонентом [5, 11]. Як ключовий компонент можемо розглядати горючий пластик. Решту сміття назовемо *основним* компонентом. Назвемо *переходом* зсув матеріалу на певну кількість комірок. Якщо умовитись, що номери комірок (рис. 1) є координатами в просторі, то *один перехід* – це зсув матеріалу з комірок 1, 2, 3, 4, 5, 6 в комірки 7, 8, 9, 10, 11, 12 і т. д. У запропонованій моделі (рис. 1) одному переходу відповідає поворот барабана на кут 15-20°.

Активність сегрегації на кожній ділянці, де вона може відбуватися, визначається ймовірністю переходу частинок з однієї комірки в іншу. Важливим є питання визначення цієї ймовірності для кожної комірки. У [9] ймовірність переходу частинок в об'єми, що перебувають ближче до центра циркуляції, тобто при  $j > i$ , визначають за такою формулою:

$$P_{ij} = P_0(1 - C_{j,m-1}), \quad (5)$$

де  $P_0$  – сталий коефіцієнт, що визначається при ідентифікації параметрів математичної моделі реальному процесу, він дорівнює ймовірності переходу частинок ключового компонента в елементарний об'єм, що перебуває ближче до центра циркуляції при нульовій концентрації в ньому ключового компонента;

$C_{j,m-1}$  – концентрація ключового компонента в  $j$ -му елементарному об'ємі після переходу  $m-1$ .

До визначення (чи призначення) коефіцієнта  $P_0$  можна підходити виходячи з аналізу процесу, що протікає. У [9] він розраховується виходячи з відмінності густин ключового й основного компонентів:

$$P_0 = 1 - \frac{2 K_{main}}{3 K_{key}}, \quad (6)$$

де  $K_{main}$  – густина частинок основного компонента (main component),  $K_{key}$  – густина частинок ключового компонента (key component). Якщо густина ключового компонента удвічі більша за густину

основного компонента, а розміри частинок однакові, то значення  $P_0$  буде дорівнювати 0,67 (за формулою (6)).

Таким чином, для описаного випадку [9] імовірність перебування ключового компонента в комірці, з якої він «готовий виходити», складає 0,67; імовірність того, що ключовий компонент виявляється в комірці, до якої він «готовий входити» (з якою обмінюється «0,67-а» комірка), складає 0,33; імовірність перебування ключового компонента в комірці, з якої він «не готовий виходити», складає 1; імовірність перебування ключового компонента в

комірці, з якою «ніхто не готовий обмінюватися», дорівнює 0.

Інший спосіб визначення коефіцієнта  $P_0$  – експериментальний.

Традиційно цей коефіцієнт чи аналогічні йому коефіцієнти визначають ітераційними методами, використовуючи кінетичну криву процесу, отриману на лабораторному змішувачі. Вважаємо, що ймовірність кожного переходу, позначеного стрілками на рис. 1, складає 2,5 %, В інших комірках, яких не торкаються стрілки, переходи не відбуваються. Матриця переходів для цього випадку визначається виразом

$$P = \begin{matrix} & \dots & 5 & 6 & 7 & \dots & 11 & 12 & 13 & \dots & 47 & 48 & 49 & 50 & 51 & 52 & 53 & 54 & 55 & 56 & 57 & 58 & 59 & 60 & 61 & 62 & 63 & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0,975 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0,975 & 0,025 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0,950 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0,025 & 0,950 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0,950 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0,975 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0,925 & 0,025 & 0 & 0,025 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0,975 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0,925 & 0 & 0,925 & 0,025 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0,025 & 0 & \dots & 0 & 0,025 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0,975 & 0 & 0,925 & 0 & 0 & \dots \end{matrix} \quad (7)$$

**Матриця переходів** – квадратна матриця з довжиною сторони 63 (кількість комірок, яка вибрана нами довільно (рис. 1)). У наведеному фрагменті матриці подано її ділянки, де відбувається перерозподіл компонентів (матриця цілком не помістилася б на сторінці). На головній діагоналі розміщено ймовірності того, що відповідна комірка залишається незмінною

(перерозподіл матеріалу у цій комірці не відбувається).

Для комірки «6» (рис. 1) імовірність того, що стан комірки не зміниться, складає 0,975; імовірність обміну ключовим компонентом з коміркою «63» складає 0,025. Для комірки «49» імовірність того, що стан комірки не зміниться, складає 0,95, імовірність обміну ключовим компонентом

з коміркою «48» складає 0,025, імовірність обміну ключовим компонентом з коміркою «50» складає також 0,025. *Вектор початкових імовірностей* (вектор стану

$$E_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (8)$$

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 63

Вектор початкових імовірностей містить 63 комірки (рис. 1); імовірність перебування ключового компонента в кожній з комірок від 1-ї до 12-ї дорівнює

$$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,975 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,975 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,05] \quad (9)$$

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 ..... 56 57 58 59 60 61 62 63

Як видно з матриць (8) і (9), сумарна кількість ключового компонента незмінна (складає 12 умовних одиниць). Перехід (у результаті обертання барабана) являє собою зсування стану всіх комірок у кожному підшарі на один крок (рис. 1) – приблизно на 15-20<sup>0</sup>, що відповідає зсуву на 6 комірок. Наприклад, стан комірки «1»

системи) для випадку, коли ключовий компонент (наприклад пластик) одномоментно потрапив (був завантажений) до барабана і зайняв комірки від 1 до 12:

одиниці; імовірність перебування в інших комірках (від 13-ї до 63-ї) дорівнює нулю. Множення матриці переходів (7) на вектор (8) дає такий вектор:

після переходу стає станом комірки «7», стан комірки «2» після цього ж переходу стає станом комірки «8» ..., стан комірки «62» після цього ж переходу стає станом комірки «2», і так для всіх комірок. Це легко змодельовати, одержавши таку матрицю:

$$E_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,05 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,975 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,975 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (10)$$

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 62 63

Отриманий вектор – вектор імовірностей після першого переходу (вектор стану  $E_1$ ). Згадаємо, що *номери комірок є координатами в просторі*; змінюються при цьому стани, тобто ймовірності перебування ключового компонента в кожній комірці.

За цим принципом множення вектора ймовірностей після першого переходу (вектора стану  $E_1$ ) на матрицю переходів  $P$  (7) з наступним зсуванням комірок на 6 номерів (згідно рис. 1)) дає вектор наступного стану  $E_2$  (так моделюється наступний перехід). Наступний стан –  $E_3$ , далі  $E_4$  і так далі. Очевидно, що якщо у циркуляційному контурі 63 комірки, а один перехід – це зсув на 6 комірок, то, наприклад,

21-й послідовний перехід відповідає двом обертам барабана. Після кожного переходу отриманий поточний вектор  $E_i$  ілюструє рівномірність розподілу ключового компонента.

**Використання моделі для аналізу процесу змішування.** У моделі рівномірність розподілу ключового компонента оцінювали за допомогою середньоквадратичного відхилення кожного стану  $E_i$ , коефіцієнта варіації  $i$  (для візуальності) номограм розподілу. Коефіцієнт варіації – відношення середньоквадратичного відхилення для кожного стану до середнього арифметичного [14]. Наприклад, середньоквадратичне відхилення для стану  $E_0$  (формула (8)) складає 0,394; коефіцієнт

варіації 2,068. Номограма розподілу початкового стану  $E_0$  подана на рис. 3, а. Номограми розподілу в деяких інших станах наведено на рис. 3, б та на рис. 4, 5.

Залежність отриманого середньоквадратичного відхилення та коефіцієнта варіації від числа переходів подано на рис. 6.

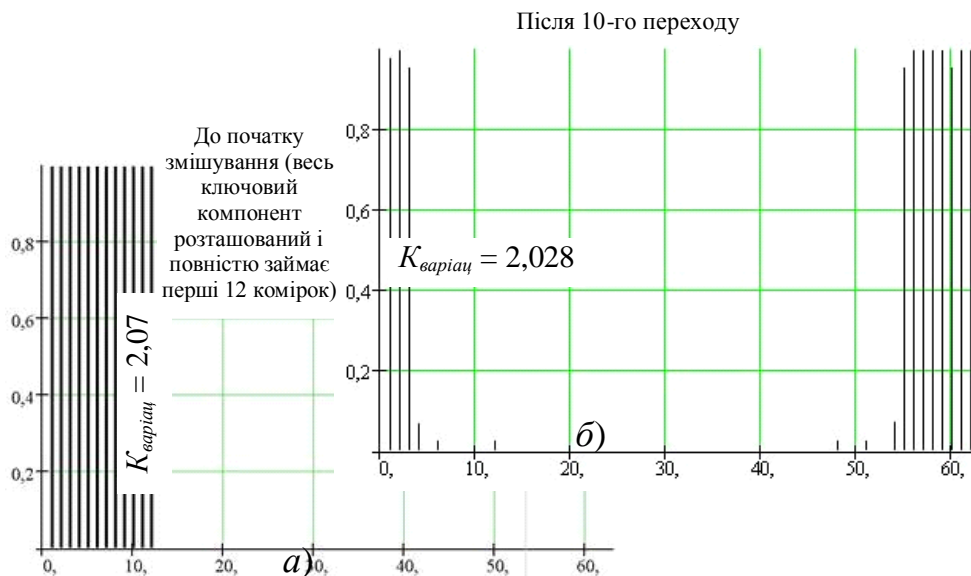


Рис. 3. Номограми розподілу ключового компонента до початку змішування (а); після 10-го переходу (б)

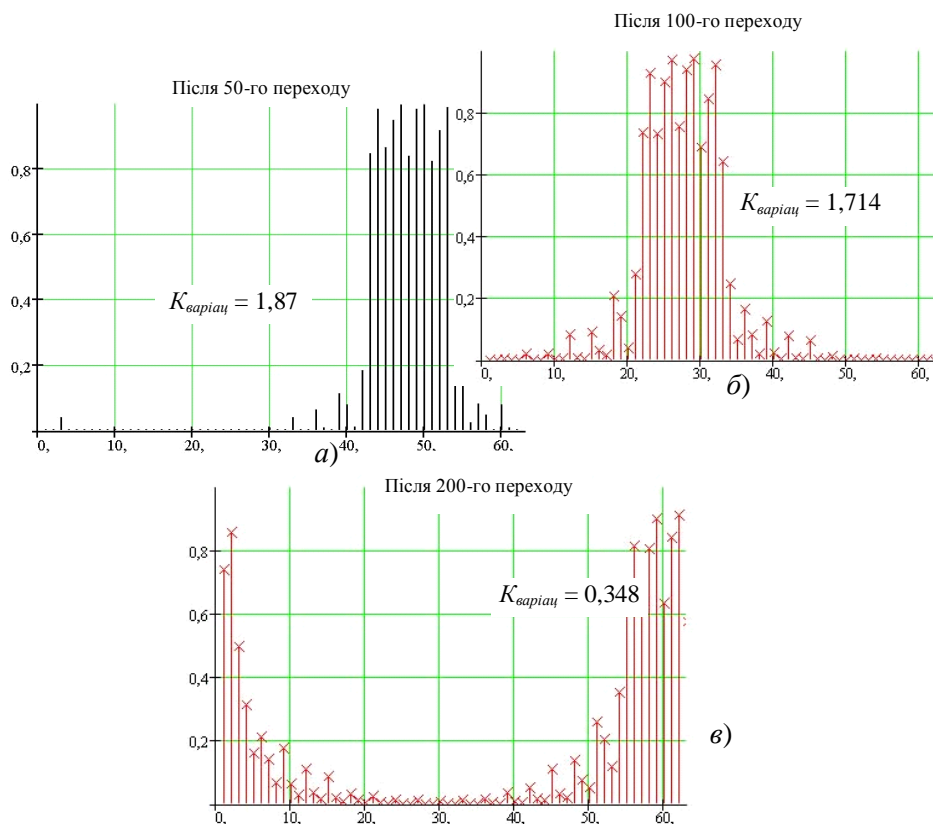


Рис. 4. Номограми розподілу ключового компонента після 50-го переходу (а); після 100-го переходу (б); після 200-го переходу (в) /8-10 обертів барабана/



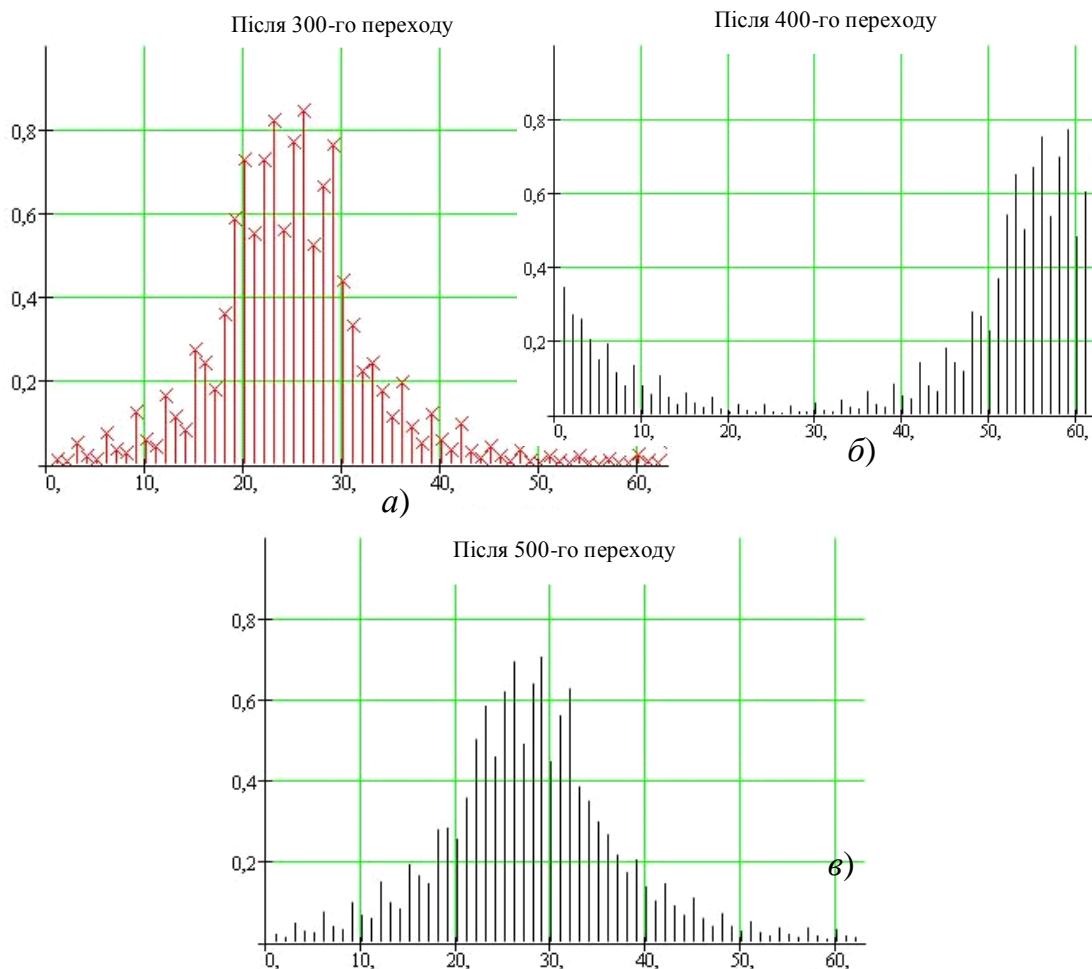


Рис. 5. Номограми розподілу ключового компонента після 30-го переходу (а); після 400-го переходу (б); після 500-го переходу (в) /20-27 обертів барабана/

Розрахунок великої кількості переходів потребує залучення суттєвих ресурсів комп'ютера. Через це запропоновано для подальшого моделювання процесу змішування здійснити опис одержаної залежності (рис. 7) за допомогою експоненціальної залежності. Знаходження відповідної емпіричної експоненціальної залежності здійснено засобами програми MathCAD. Рівняння має вигляд

$$f(x) = \frac{0,234 \cdot e^{-0,003x} + 0,156}{0,19}, \quad (11)$$

де 0,19 – середнє значення концентрації ключового компонента (12 комірок ключового компонента розподілено у 63 комірки всього сміття;  $12/63=0,19$ );

0,234; -0,003; 0,156 – емпіричні коефіцієнти конкретної залежності (рис. 5).

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** У розглянутому прикладі розраховано найгірший варіант з погляду рівномірності завантаження компонентів – ключовий компонент міститься в сусідніх комірках у трьох шарах (комірки від 1 до 12). З рис. 7 видно, що для заданих початкових умов (імовірності переходу складають 2,5 %) навіть після 1000 переходів (це 95 обертів барабана) коефіцієнт варіації зменшується удвічі (від 2,07 до 0,9), але залишається досить значним. Це підтверджує доцільність попереднього змішування сміття перед спалюванням.

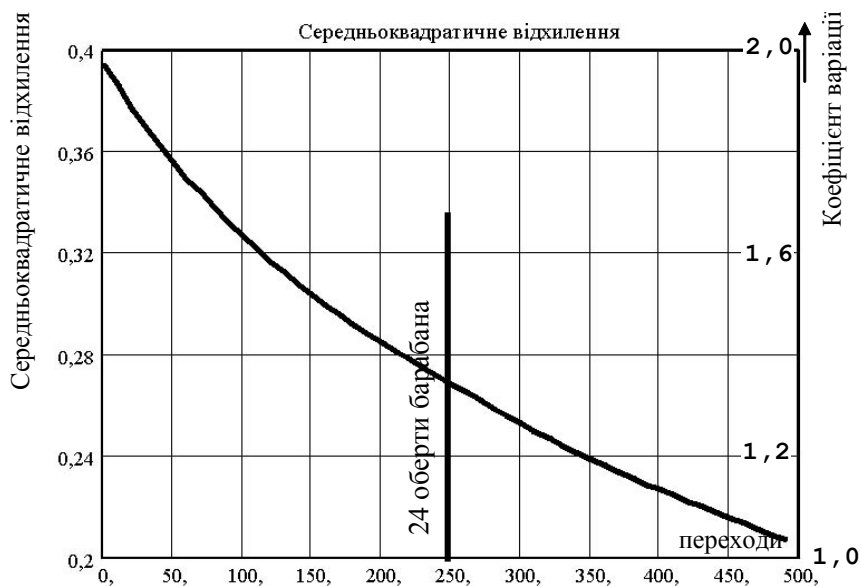


Рис. 6. Змінювання коефіцієнта варіації в ході переробки

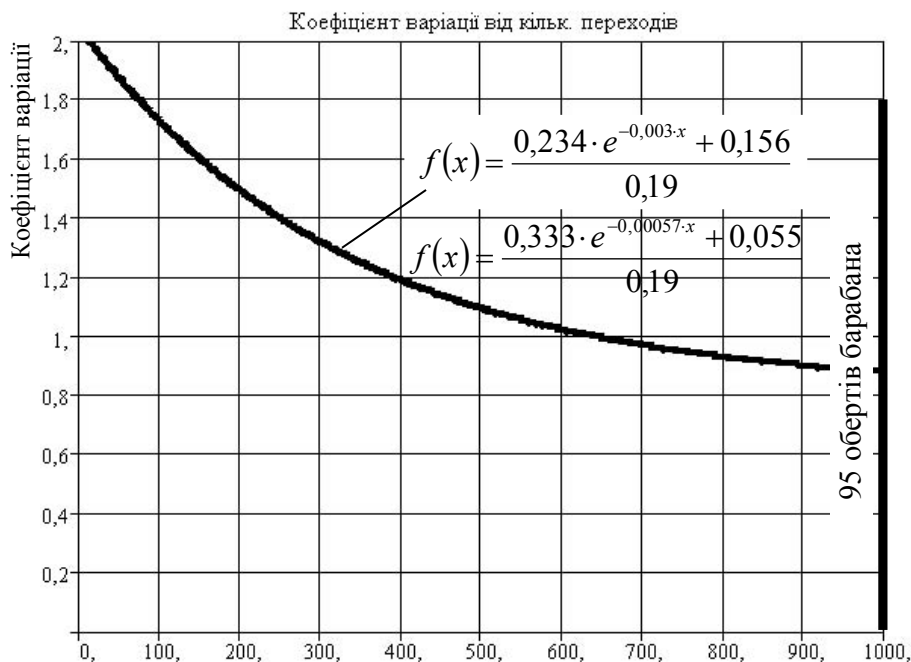


Рис. 7. Залежність коефіцієнта варіації суміші від кількості переходів (емпірична експоненціальна залежність)

Запропоновано підтвержену експериментальними дослідженнями математичну модель змішування компонентів у корпусі барабанної печі; модель базується на математичному апараті ланцюгів Маркова. Модель дає змогу визначати концентрацію ключового компонента в будь-якому елементарному об'ємі

циркуляційного контура машини в будь-який момент часу та розраховувати статистичні характеристики однорідності суміші; модель може бути застосована для оптимізації процесу спалювання.

Для машини періодичної дії запропонована модель дає змогу оцінювати різні регламенти завантаження компонентів.

У подальшому модель буде застосовано для дослідження нової конструкції

змішувача у вигляді барабана з співвісним з ним лопатевим змішувачем.

### Список використаних джерел

1. Dempsey C.R., Oppelt E.T. Incineration of Hazardous Waste: A Critical Review Update / C.R. Dempsey, E.T. Oppelt. // *Air & Waste*, 1993. – Vol.43. – P. 25-73.
2. Gohlke O. Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance / O. Gohlke // *Waste Management & Research*, 2009. – № 27. – P.894–906. DOI: 10.1177/0734242X09349857.
3. Lombardi F., Lategano E., Cordiner S., Torretta V. Waste incineration in rotary kilns: a new simulation combustion tool to support design and technical change / F. Lombardi, E. Lategano, S. Cordiner, V. Torretta // *Waste Management & Research*. – 2013. – № 31, 7. – P. 739 – 750.
4. Lee C.C., Huffman G.L. Energy and mass balance calculations for incinerators / C.C. Lee, G.L. Huffman // *Energy Sources*. – 1998. – № 20(1). – P. 990-1000
5. Емельянова, И. А. Современные строительные смеси и оборудование для их приготовления [Текст]: учеб. пособие / И. А. Емельянова, О. В. Доброходова, А. И. Анищенко. – Харьков: Тимченко, 2010. – 146 с.
6. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов [Текст] / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М., 1985. – 440 с.
7. Конструирование и расчет машин химических производств [Текст] / под. ред. Э.Э. Кольман-Иванова. – М., 1985. – 408 с.
8. Макаров, Ю. И. Основы расчета процессов смешения сыпучих материалов. Исследование и разработка смесительных аппаратов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю. И. Макаров. – М., 1975. – 35 с.
9. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа [Текст] / В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
10. Александровский, А. А. Исследование процесса смешения и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Александровский. – Казань, 1976. – 48 с.
11. Кафаров, В. В. Математическая модель кинетики смешения бинарных смесей, содержащих твердую фазу / В. В. Кафаров, А. А. Александровский, И. Н. Дорохов // *Доклады АН СССР*. – 1975. – Т. 224, № 5. – С. 1134-1137.
12. Крот, О. Ю. Експериментальні дослідження та аналітичне моделювання процесу змішування компонентів матеріалу в барабанно-валковому переробнику [Текст] / О. Ю. Крот // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2011. – Вип. 8. – С. 18–27.
13. Селиванов, Ю. Т. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств [Текст] / Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2004. – 120 с.
14. Крот, О. Ю. Лабораторний практикум з вивчення дисципліни “Основи наукових досліджень” [Текст]: навч.-метод. посібник / О. Ю. Крот, О. С. Непорожнев, О. П. Крот. – Харків: ХДТУБА, 2009. – 99 с.

---

Крот Ольга Петрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та інженерної екології Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (098) 204-71-65. E-mail: uch.opk@gmail.com.

---

Ровенський Олександр Іванович, канд. техн. наук, завідуючий відділом регіональної екології Північно-Східного Наукового Центру Національної академії наук України. Тел.: (050) 402-08-10. E-mail: uch.opk@gmail.com.

Krot Olga, PhD. tehn., Associate Professor the department safety life and environmental engineering Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (098) 204-71-65. E-mail: uch.opk@gmail.com.

Rovenskiy Oleksandr, PhD. tehn., Head of the regional ecology department, North-East Scientific Center of the National Academy of Sciences of Ukraine. Tel.: (050) 402-08-10. E-mail: uch.opk@gmail.com.

Стаття прийнята 14.06.2017 р.

УДК 621.313.333

## ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИСТРОЇВ РПН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Канд. техн. наук І. В. Хоменко, старш. викл. О. М. Федосєнко, асп. І. В. Стасюк  
(НТУ «Харківський політехнічний інститут»)

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ РПН СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Канд. техн. наук И. В. Хоменко, старш. препод. Е. Н. Федосеенко, асп. И. В. Стасюк  
(НТУ «Харьковский политехнический институт»)

## IMPROVING THE RELIABILITY OF POWER TRANSFORMERS OLTC DEVICES

Cand. of Techn. Sciences I. V. Khomenko, Senior Lecturer O. M. Fedoseenko,  
graduate student I. V. Stasiuk

*Встановлено, що одним із способів підвищення надійності роботи силового трансформатора є підвищення надійності роботи його пристрою регулювання під навантаженням (РПН). Наведено статистику відмов його окремих елементів, показано, що особливо ненадійними елементами пристрою РПН є привод і контактор. Для підвищення надійності розглядається можливість його розроблення на базі двигуна з ротором, що котиться (ДРК). Проведено критичний аналіз сучасних пристроїв РПН і пропонуваного технічного рішення. На основі загальної теорії електромагнітного поля розроблено методичку і алгоритм розрахунку нових типорозмірів ДРК для пристроїв РПН силових трансформаторів. Проведено аналіз експлуатаційної надійності пристроїв РПН на основі статистичних матеріалів, розраховані основні показники надійності його елементів. Показано перспективу розвитку нового пристрою РПН.*

**Ключові слова:** силовий трансформатор, пристрій РПН, двигун з ротором, що котиться, експлуатаційна надійність.

*Установлено, что одним из способов повышения надежности работы силового трансформатора является повышение надежности работы его устройства регулирования под нагрузкой (РПН). Приведена статистика отказов его отдельных элементов, показано, что наиболее ненадежными элементами устройства РПН являются привод и контактор. Для повышения надежности рассматривается возможность его разработки на базе двигателя с катящимся ротором (ДРК). Проведен критический анализ современных*

устройств РПН и предлагаемого технического решения. На основе общей теории электромагнитного поля разработана методика и алгоритм расчета новых типоразмеров ДКР для устройств РПН силовых трансформаторов. Проведен анализ эксплуатационной надежности устройств РПН на основе статистических материалов, рассчитаны основные показатели надежности его элементов. Представлена перспектива развития нового устройства РПН.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, устройство РПН, двигатель с катящимся ротором, эксплуатационная надежность.

*It is established that one of the effective ways to improve the reliability of the power transformer as a whole is to increase the reliability of its on-load tap-changer (OLTC). As a result of the analysis of statistical material obtained under real operating conditions (the number of transformers is 1000 pieces, the observation period is 4 years), the failure statistics of its individual elements are given. It is shown that the most not reliable elements of the OLTC are the drive and the contactor. To improve the reliability of the OLTC, the possibility of its development on the basis of an engine with a rolling rotor is considered. A critical analysis of modern OLTC and the proposed technical solution is carried out. The technical and economic feasibility of developing and implementing a new device has been established. On the basis of the general theory of the electromagnetic field, a technique and an algorithm for calculating new sizes of an engine with a rolling rotor for OLTC of power transformers has been developed. The analysis of operational reliability of OLTC based on statistical materials is carried out; the main reliability indices of its elements are calculated. It is established that the introduction of a new technical solution will increase the reliability of the OLTC by 25% and the power transformer by 2-4%. The perspective of the development of a new OLTC device is presented.*

**Keywords:** power transformer, on-load tap-changer, motor with rolling rotor, operational reliability.

**Вступ.** Трансформаторне обладнання є одним з найважливіших елементів електричної мережі. З точки зору ефективного управління режимом мережі, найбільший інтерес для фахівців становить система регулювання напругою трансформатора [1]. Це обумовлено тим, що рівні напруги у вузлових точках електричної мережі спільно з компенсацією потоків реактивної потужності в основному визначають втрати потужності і втрати напруги в цих мережах. Тому надійна експлуатація пристроїв регулювання напруги є важливою науково-технічною задачею, над якою працює значна кількість фахівців як у нас у країні, так і за кордоном [2].

**Досвід експлуатації і основні дефекти пристроїв РПН.** Пристрій регулювання напруги силових трансформаторів під навантаженням (РПН) за своїм виконанням є складним і часто недостатньо

надійним вузлом силового трансформатора [3]. В той же час РПН може призвести до серйозного пошкодження трансформатора в цілому, а в крайньому випадку – до пожежі і вибуху. Відомо, що до 40 % катастрофічних аварій трансформаторів пов'язані з пошкодженнями РПН [4].

Сучасні пристрої РПН мають такі основні складові частини: контактор, пристрій, що обирає (вибирач), приводний механізм, струмообмежувальний опір [4]. Ефективність роботи перемикача числа витків під навантаженням у значній мірі визначається роботою його контактора і привода.

З кінця ХХ століття застосовуються перемикачі числа витків з вакуумними вимикачами. Вакуумні вимикачі характеризуються низькою ерозією контактів, що дає змогу перемикачам числа витків виконувати більшу кількість операцій між

обов'язковими профілактичними роботами. Однак конструкція в цілому стає більш складною.

Також на ринку виникали експериментальні перемикачі числа витків, в яких функція перемикачів виконується силовими напівпровідниковими елементами. Ці моделі також спрямовані на те, щоб скоротити простоту на проведення технічного обслуговування.

Залежно від пропонованих вимог до регулювання напруги і особливостей конструкції трансформаторів у даний час застосовують різні схеми регулювання і різні типи пристроїв РПН, що відрізняються між собою технічними характеристиками і конструктивним виконанням.

Регулювання напруги силових трансформаторів, як правило, має здійснюватися в автоматичному режимі і досить надійно. Однак не завжди в енергосистемах пристрій РПН використовується в автоматичному режимі. Головна причина цього – недостатня надійність пристроїв РПН. Найбільш ненадійними елементами сучасних пристроїв РПН, як показав аналіз пошкоджень, є пошкодження приводів. Цей вид пошкоджень найбільш часто трапляється в експлуатації.

Причинами відмов приводів є залипання контактів пускачів, пошкодження кулачкових елементів, відмова кінцевих вимикачів, виткові замикання електродвигунів привода через зволоження, відсутність або недостатній обігрів, що не забезпечує нормальну роботу елементів пристроїв привода. Зокрема, пошкоджуються контролери типу 57212/4000 приводів М32 виробництва Болгарії. У контролерах виходить з ладу ролик через механічний знос. У приводах М32, М34 пошкоджуються також кінцеві і захисні вимикачі. Ущільнення кришки приводів, виготовлене з недостатньо якісного гумового шнура, прокладка такого шнура в каналі корпусу не може забезпечити потрібну герметичність. З цієї причини апаратура і різні сполучні колодки

привода схильні до окислення і покриття іржею і пилом. Через недосконалість автоматики привода його обігрів недостатньо надійний. У пристроях РПН є течі. Найбільш часто виникають течі масла з-під скла покажчика положення, у вузлі черв'ячної передачі на несучому фланці регуляторів через порушення сальникових ущільнень [5].

Відзначено підгоряння контактів вибирача. Цей недолік у ряді випадків в енергосистемах усувається посрібленням контактів. Підгоряння сприяють недостатні натискання контактів і чистота обробки поверхні контактів вибирача.

Недостатня міцність кріплення болтів контактора і їх конструктивне виконання значно ускладнюють ревізію, коли доводиться виймати увесь перемикальний пристрій з бака трансформатора.

Через неможливість зливу масла з контактора через засмічення сифона для повного видалення масла доводиться застосовувати продування повітрям.

Зазначено випадки, коли при транспортуванні пристроїв РПН типу РС у північні райони після прибуття трансформатора в пристроях виявляється шар льоду товщиною 23 см. Тому при тривалому транспортуванні трансформаторів з такими пристроями необхідно вживати заходи щодо запобігання зволоженню.

Привод типу ГЩП4у має недоліки: кулачкові елементи приводів недостатньо надійні, пошкоджується пластмасовий корпус, відзначено зсув контактної важеля. Через порушення ущільнення вертикального вала можливе проникнення вологи в шафи привода. Поширеним недоліком приводів ПДП4у, як усіх приводів, є залипання контактів або збільшення часу повернення пускачів під час перемикачів через забруднення робочих поверхонь сердечника пилом і мастилом. Залипання контактів пускачів викликає неприпустиме переміщення рухомих елементів пристрою в одне з крайніх положень [6].

Це призводить до небажаних наслідків:

1) різкого підвищення або зниження напруги на шинах підстанції в разі трифазного пристрою РПН;

2) несиметрії напруг між фазами при однофазних пристроях РПН, що викликає спрацьовування земляних захистів і відключення трансформатора;

3) виходу привода за крайне положення при відмові кінцевих вимикачів із пошкодженням перемикального пристрою та виводу трансформатора з роботи.

Зменшення наслідків від замикання контактів магнітних пускачів шляхом ускладнення схем управління привода не полегшує і не спрощує експлуатацію. Як і будь-яке ускладнення, це призводить до більшої ймовірності пошкоджень [7].

Ревізія пускачів пов'язана з демонтажем і повним розбиранням пускачів.

Реакторні пристрої РПН, що були на трансформаторах ранніх випусків, мають конструктивні недоліки, досить відомі в експлуатації, зокрема великі люфти в кінематиці привода, які утворюються в результаті зносу бакелітових валів між фазами перемикального пристрою в місцях з'єднання з металевими валами (при певному напрацюванні відбувається "розбивання" отворів шпильками). Поява недопустимих люфтів призводить до викривлення кругової діаграми, і, як наслідок, виникає неузгодженість у роботі перемикального пристрою, що врешті-решт призводить до пошкодження окремих елементів пристрою РПН. Періодична заміна бакелітових валів усуває люфт; вона є складною, але вимушеною роботою з підтримки перемикального пристрою в працездатному стані.

В експлуатації на реакторних перемикальних пристроях через недосконалість способу захисту масла гетинаксова перехідна плита і масло контактора схильні до зволоження. При порушенні ущільнень у маслі кріплення

контактів контактора в згаданій перехідній плиті, а також через порушення сальника вала перемикального пристрою можливе перетікання масла з бака трансформатора в кожух контактора і далі через фільтр, що сушить повітря контактора, назовні. Таке перетікання масла (спуск масла з бака трансформатора) при недостатньому контролі за станом трансформатора може привести до виводу трансформатора з ладу.

У реакторних пристроях РПН ослаблення пресування стержнів магнітної системи реактора призводить до появи підвищеної вібрації всіх елементів конструкції, що мають зв'язок з реактором. Так, вібрація струмоведучих елементів (відводів) призводить до обриву відводів, викликає ослаблення кріплення реактора з подальшим збільшенням вібрації. Приведення реактора в нормальний стан пов'язане з виконанням значного обсягу ремонтних робіт, пов'язаних з розкриттям активної частини трансформатора. Через недостатню електричну зносостійкість контактів необхідна частіша їх заміна.

Автоматичні регулятори типів БАУРПН1, 2, АРНТ67 і АРТ1Н (включаючи БАР і блок датчика струму) використовуються слабо і тому малоефективні. Блок БАР працює досить надійно в експлуатації, але в умовах температурних перепадів навколишнього повітря в зимовий час (наприклад, при його встановленні в КРУН) зазначено пошкодження друкованих плат (мікропориви доріжок). Тому при низьких температурах (нижче 40 °С) БАР може втратити працездатність. Зазначено також, що при подальшому підвищенні температури працездатність пристрою БАР може відновитися. Оптимальне число перемикачів пристроїв регулювання РПН досягається за рахунок обґрунтованих розрахунків уставок БАР за напругою, вибором зони нечутливості і витримки часу регулятора [5].

Схильні до пошкоджень також сучасні швидкодіючі прилади РПН.

Через наявність рухомих частин трансформатори з РПН вимагають у 3-5 разів більших трудовитрат у порівнянні з нерегульованими під навантаженням. Цей фактор, а також знижена, в середньому, надійність трансформаторів з РПН мають урахуватися при вирішенні питання про заміну або ремонт РПН.

Практика експлуатації показала, що більше 50 % витрат на ремонт трансформаторів було пов'язано з пристроями РПН. Введення з 1993 р. системи безперервного контролю РПН дав змогу збільшити число перемикачів до ремонту з 10000 до 30000 для РПН старих конструкцій і з 40000 до 60000 для нових конструкцій (з вакуумними перемикачами і резисторами) [4, 5].

Працездатність РПН у значній мірі визначає надійність трансформатора в цілому. Наявність дуги при перемиканні і складна механічна частина РПН і сьогодні є основними причинами виходу пристроїв з ладу.

Одним з перспективних способів підвищення надійності роботи пристроїв РПН є використання в їх конструктивному виконанні двигуна з ротором, що котиться (ДРК).

**Основні теоретичні положення розроблення двигунів з ротором, що котиться.** Двигун з ротором, що котиться, – це електромеханічний перетворювач, обертальна частина якого – ротор має механічний контакт з нерухомою частиною – статором. Під дією модульованого обертового (рухомого) магнітного поля і сили тертя ротор здійснює ексцентричний або процесійний рух відносно центру маси нерухомої частини статора.

Електромагнітні процеси, які протікають у ДРК, описуються такими рівняннями [8]:

1. Рівняння Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \delta, \quad (1)$$

де  $\vec{H}$  – вектор напруженості магнітного поля;  $\delta$  – вектор щільності струму провідності.

2. Рівняння електричного кола обмотки статора:

$$u = i \cdot r + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (2)$$

де  $u$  – миттєве значення напруги, що прикладена до обмотки статора;  $i$  – миттєве значення струму;  $\Psi$  – миттєве значення потокозчеплення обмотки статора;  $r$  – активний опір обмотки статора.

3. Рівняння безперервності магнітного поля двигуна:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (3)$$

де  $\vec{B}$  – вектор магнітної індукції.

4. Зв'язок між напруженістю магнітного поля, індукції і намагніченістю описується рівнянням:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (4)$$

де  $\mu$  – магнітна постійна у середовищі магнітної системи.

У результаті даних рівнянь описується характер поширення магнітної індукції у повітряному зазорі машини, а так само у її магнітопроводі. Після чого визначаються механічні складові двигуна, а саме сила одностороннього магнітного тяжіння і момент:

$$P = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot S_Z, \quad (5)$$

де  $\mu_0$  – магнітна постійна середовища протікання магнітних процесів;  $S_Z$  – площа магнітопроводу, через яку замикається основний магнітний потік,

$$M = P \cdot \frac{D_r}{2} \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

де  $D_r$  – діаметр ротора досліджуваного ДРК;  $\theta$  – кут навантаження ДРК.



Механічні процеси, що протікають у ДРК, дуже впливають на характер розподілу магнітного поля в повітряному зазорі машини, внаслідок його нерівномірності і постійного механічного контакту між статором і ротором. Ці механічні процеси викликають втрати моменту, які виражаються у вигляді втрат на тертя в точці контакту і механізму передачі неспіввісного обертання, облік і вплив на основний момент двигуна яких виражається в моменті опору [8]. Дана математична модель ДРК дає змогу якісно проаналізувати роботу двигуна і визначити його вихідні параметри [9].

Щодо застосування ДРК у пристроях РПН, то реалізація такого застосування є актуальним завданням, оскільки, наприклад, пара АД і низькообертовий редуктор у цих пристроях може бути замінено одним більш надійним електромеханічним перетворювачем енергії – ДРК, з урахуванням своїх конструктивно-технологічних переваг. Проведемо порівняльний аналіз використання ДРК у пристроях РПН силових трансформаторів.

**Критичний аналіз сучасних пристроїв РПН і пристрій регулювання напруги з використанням ДРК.** Розглянемо конструкцію пристрою РПН з приводом типу РС-3. У ньому асинхронний двигун (АД) за допомогою черв'ячної передачі приводить у рух головний вал. Живлення двигуна здійснюється трифазним змінним струмом через автоматичний вимикач. Циклічність роботи привода забезпечується багаторазовим колійним вимикачем. Внаслідок інерції мас, що обертаються, і нескладних комутацій забезпечується кожна операція перемикачів. Запуск привода здійснюється за допомогою керуючого імпульсу. Автоматичне управління здійснюється за допомогою постійного імпульсу. Привод налагоджується до введення трансформатора до експлуатації. Місця проходження вала через отвір у баку трансформатора ущільнюються сальниками,

швидкий вихід яких з ладу обумовлюється нерівностями на поверхнях вала. У місцях проходження вала його поверхню необхідно шліфувати з метою запобігання течі масла редуктора. Після монтажу привода на трансформатор знімають кругову діаграму РПН і виконують інші налагоджувальні роботи відповідно до заводської інструкції [5, 7].

Як показує досвід експлуатації, недоліками такої конструкції є:

- 1) наявність громіздкого електричного привода (АД + редуктор);
- 2) нетехнологічність експлуатації редуктора (наявність мастильних матеріалів);
- 3) додатковий підігрів пристрою РПН;
- 4) наявність режиму вибігу АД.

Достатньо технологічним є пристрій німецької фірми типу MR OILTAP® MSE 340 з моторним приводом TARMOTION® ED. Моторний привод модульного виконання призначений для узгодження робочого положення пристрою РПН. Перемикач на ступінь виконується завдяки включенню моторного привода одиночним керуючим імпульсом. Процес перемикачів завершується примусово, незалежно від того, чи були представлені інші керуючі імпульси. Наступне перемикачів можливе тільки після зупинки привода. Нагрівач для видалення конденсату виконаний у вигляді поверхневого електрорадіатора. Цей засіб обігріву забезпечує високоякісний антиконденсатний обігрів для всіх кліматичних зон і робить непотрібним застосування термостата, а також гідростата.

Редуктори, що використовуються: силові, керуючі й редуктори індикації. Силові редуктори мають пасову передачу. Керуючий редуктор – це пристрій покрокового перемикачів з кулачковими вимикачами. Шафа моторного привода має кріпитися до бака трансформатора без перекосу. Моторний привод має розташовуватися вертикально, і його вал має перебувати на одній осі (лінії) з

вертикальним валом кутового редуктора. В іншому випадку це може призвести до пошкодження моторного привода, пристрою РПН і в цілому трансформатора. У разі сильної вібрації рекомендується використовувати віброгасники. В процесі монтажу і експлуатації потрібне правильне з'єднання моторного привода з пристроєм РПН таким чином, щоб контактор переключався до зупинки моторного привода і забезпечувалася однаковість положень привода і РПН на кожному ступені. При простій протягом восьми тижнів або при перерві в роботі більше двох тижнів необхідно включати обігрів.

Безумовними перевагами моторного привода фірми MR є:

- безшумний силовий редуктор з необслуговуваною пасовою передачею;
- використання антиконденсату обігрівача поверхневого типу;
- досить висока надійність і технологічність моторного приладу.

До недоліків такого привода можна віднести:

- наявність громіздкого електричного привода (АД + редуктор);
- режим вибігу АД;
- жорсткі вимоги до монтажу моторного привода, невисока технологічність у разі сильної вібрації;
- можливість порушення працездатності внаслідок потрапляння на пас мастильних матеріалів [7].

В основу досліджень поставлено завдання підвищити надійність, ефективність і технологічність роботи моторного привода і в цілому пристрою РПН і трансформатора. Це можна досягти шляхом заміни класичної електромеханічної системи швидкохідного АД + система редукторів на високомоментний низькообертовий електродвигун (двигун із ротором, що котиться). Механічний редуктор, як відомо, служить для зниження обертів і підвищення крутного моменту. Одночасно з цим редуктор є вагомим елементом ненадійності і зниження

точності процесу регулювання. Принцип дії цих двигунів побудований на вільній обкатці ротора по поверхні статора. Ця обкатка виникає за рахунок створення нерівномірного або пульсуючого магнітного поля в електродвигуні, що створює силу одностороннього магнітного тяжіння, в результаті чого ротор притягується до статора [10]. Результуючий вектор магнітного поля рівномірно переміщується уздовж поверхні статора, захоплюючи за собою ротор, який при цьому обкатується по статору. При цьому виникає складне обертання слідування, у якому частота обертання вала прямо пропорційна різниці діаметрів статора і ротора. Завдяки такій електромагнітній редукції на валу двигуна досягаються підвищені обертальні моменти. Ексцентричне щодо осі статора обертання ротора компенсується гнучкими передачами або стандартними механічними перетворювачами типу Кардана, Сешерона, Альстома. У загальному випадку для забезпечення роботи двигуна необхідне почергове протікання струму в його обмотках, з'єднаних у зірку. При живленні двигуна з шістьма обмотками від трифазної мережі змінного струму включення кожної обмотки в мережу здійснюється через напівпровідниковий діод.

Високомоментний низькообертовий електродвигун має високу швидкодію (0.01 - 0.05 с), значний номінальний момент (1 - 100 Нм) при низькій частоті обертання і невеликі кратності пускового струму і струму короткого замикання (1.1 - 1.3  $I_n$ ). Напруга живлення (однофазного, трифазного) – 12, 220, 380 В. Номінальний струм дорівнює 0.1-5 А. Такий двигун може працювати у кроковому режимі без додаткових перетворювачів, має високу швидкодію і безінерційність. Собівартість такого двигуна – нарівні собівартості асинхронного двигуна аналогічної потужності. Конструктивна схема моторного привода на базі двигуна з ротором, що котиться, зображена на рис. 1 [11].

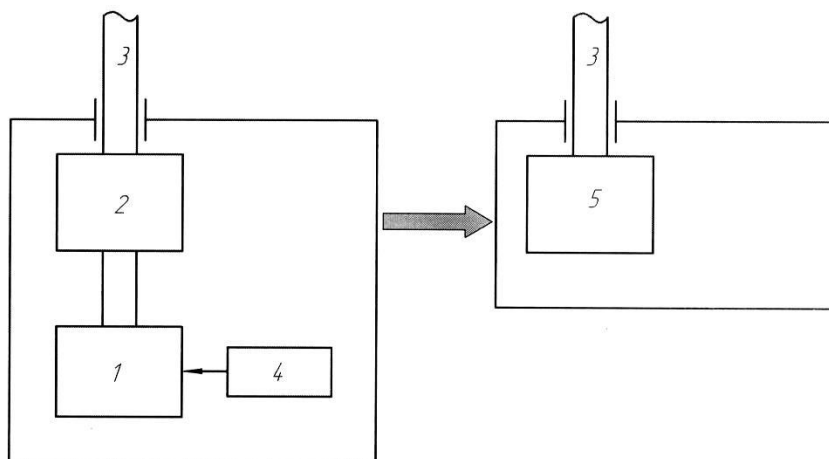


Рис. 1. Нове технічне рішення:

1 – асинхронний двигун; 2 – механічний силовий редуктор; 3 – головний вал;  
4 – схема гальмування; 5 – високомоментний низькообертовий двигун (ДРК)

Розглянемо питання підвищення надійності пристроїв РПН на базі ДРК.

**Аналіз експлуатаційної надійності групи трансформаторів за статистичними даними про пошкодження в пристроях РПН.** Математичне моделювання експлуатаційних процесів силового обладнання в поєднанні з його властивостями надійності є одним з основних етапів при вирішенні задач надійності електроенергетичних систем.

Трансформатор, у тому числі і автотрансформатор, з точки зору теорії надійності, є відновлюваним об'єктом, який може перебувати в працездатному стані, відмовляти і переходити в неробочий аварійний стан, відновлюватися і знову переходити у працездатний стан. Крім цього, він оперативно відключається для профілактичних ремонтів або виведення в резерв. Під відмовою тут розуміється будь-яке пошкодження у трансформаторі, що призводить до необхідності його відключення. Таким чином, трансформатор може моделюватися елементом, що має три стани: працездатний, непрацездатний і планового ремонту [12]. Основними параметрами такого елемента є:

- частота відмов  $\omega$ , відмов/р.;

- середня тривалість аварійного ремонту  $t_v$ , р./відмов;
- середня тривалість планового ремонту  $t_p$ , р./вим.;
- частота планових відключень  $\omega_p$ , вим./р.

У ряді випадків можлива деталізація планових ремонтів на капітальні та поточні. Як правило, цей мінімум показників достатній для визначення інших показників і вирішення всіх практичних завдань.

Можна зазначити, що для всіх трифазних трансформаторів відмови призводять до повного відключення об'єкта. Для трансформаторів, що складаються з групи однофазних, якщо допустимий неповнофазний режим, відмова може бути частковою [12].

На підставі вищесказаного можна проаналізувати надійність силових трансформаторів з урахуванням розподілення їх пошкоджень по вузлах і класах напруги за період січень 1997 р. – листопад 2000 р. [13].

Для силових трансформаторів напругою 110 кВ число пошкоджень у пристроях РПН за розглянутий період склало 61 пошкодження, або 18 % від усіх пошкоджень. Загальна кількість пошкод-

жень силових трансформаторів напругою 110 кВ за 4 роки склала 338 пошкоджень.

Як відомо, пристрій РПН складається з трьох основних елементів: привод, вибирач і контактор. Число відмов трансформатора через ненадійність РПН розподіляється між елементами пристрою в такому співвідношенні: привод – 50 %, вибирач – 25 %, контактор – 25 %.

Нижче розглядається експлуатація трансформаторного обладнання, починаючи з моменту після закінчення періоду припрацювання, на якому ймовірність технологічних відмов має підвищені значення. Період припрацювання в рамках даної роботи не розглядається, він вимагає специфічного підходу у зв'язку з гарантійними зобов'язаннями заводу-виготівника.

Якщо обмежитися розглядом роботи об'єкта до граничного стану, то допустимо вважати інтенсивність відмов  $\lambda = const$ , а відповідно частота відмов:

$$\omega(t_1, t_2) = \tilde{\omega}(t) = \lambda, \quad (7)$$

Визначимо показники надійності для кожного елемента пристрою РПН.

Частота відмов привода пристрою РПН  $\omega^*(t)$ , статистично може бути знайдена як:

$$\omega^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (8)$$

де  $N(t)$  і  $N(t + \Delta t)$  – кількість об'єктів, що залишилися в роботі на відповідні моменти часу;  $\Delta t$  – малий інтервал часу.

Визначимо частоту відмов трансформаторного обладнання 110 кВ через пошкодження привода РПН за даними на період з 1997 по 2000 р.

Всього відмов – 31, чисельність трансформаторів класу 110 кВ складає приблизно 1000 штук, тривалість спостереження – чотири роки:

$$\omega^*(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} = \frac{1000 - 969}{1000 \cdot 4} = 0,00775 \quad \text{відмов/р.}$$

Імовірність того, що час роботи привода пристрою РПН до відмови  $t_0$  буде не менше заданого часу  $t$ , або ймовірність безвідмовної роботи за час  $t$  знайдемо із співвідношення між  $P_0(t)$  та  $\lambda(t)$ :

$$P_0(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (9)$$

Часто для освоєного і працюючого обладнання інтенсивність відмов  $\lambda$  можна вважати постійною  $\lambda = const$ .

Потік відмов одного відновлюваного об'єкта завжди є ординарним, тому що друга відмова може відбутися тільки після відновлення. Крім того, для енергетичних об'єктів характерна стаціонарність потоку і відсутність наслідків. Для таких найпростіших потоків  $\omega \sim (t) = \lambda$ , а ймовірність безвідмовної роботи

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}. \quad (10)$$

Величина  $Q(t)$ , яка доповнює  $P_0(t)$  до одиниці, являє собою ймовірність того, що за час  $t$  об'єкт відмовить:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (11)$$

Імовірність безвідмовної роботи привода пристрою РПН за час  $t = 1$  рік:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,00775 \cdot 1} = 0,99228.$$

Імовірність того, що за час  $t$  привод пристрою РПН відмовить:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,00775 t} = 0,00772.$$

Визначимо показники надійності інших елементів пристрою РПН аналогічно до ймовірнісних характеристик привода. Отримані показники зведені у табл. 1.

Для розрахунку надійності трансформатора через пошкодження пристрою РПН як складної системи, можна виділити два етапи. На першому вирішимо завдання відображення функціонально-

структурних зв'язків елементів з метою виявлення безлічі можливих станів системи. На другому – вирішимо завдання визначення імовірнісних показників станів системи.

Таблиця 1

Показники надійності елементів пристрою РПН

Елемент пристрою РПН	Частота відмов $\omega(t)$ , відмов/р.	Імовірність безвідмовної роботи за час $t = 1$ р. $P_0(t)$	Імовірність відмови за час $t = 1$ р. $Q(t)$
Привод	0,00775	0,99228	0,00772
Вибирач	0,00375	0,996257	0,003743
Контактор	0,00375	0,996257	0,003743

З позиції надійності функціонально-структурні зв'язки елементів РПН можна зобразити в нижченаведеному вигляді.

Оскільки при відмові будь-якого з елементів пристрою відбувається відмова РПН, то з точки зору надійності можна вважати з'єднання зазначених елементів послідовним (рис. 2).

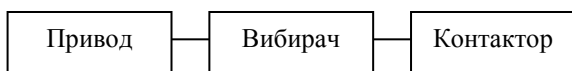


Рис. 2. Функціонально-структурні зв'язки елементів РПН

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи пристрою РПН як системи, що складається з послідовно з'єднаних елементів. Події відмов окремих елементів розглядаються як незалежні:

$$P_{0РПН}(t) = P_{0ПР}(t) \cdot P_{0ВИБ}(t) \cdot P_{0К}(t),$$

$$P_{0РПН}(t) = 0,99228 \cdot 0,996257 \cdot 0,996257 = 0,984866.$$

Частоту відмов пристрою РПН знайдемо із співвідношення (7) і (10):

$$\omega_{РПН}(t) = 0,01525 \text{ відмов/рік.}$$

Для ілюстрації цього показника знайдемо число відмов трансформаторів через пошкодження в пристрої РПН для початкових умов завдання, тобто при загальній кількості трансформаторів, рівній 1000, і часі їх роботи чотири роки. Для заданих умов число відмов трансформаторів напругою 110 кВ через РПН складатиме 61 відмову за чотири роки.

Розглянемо вплив підвищення надійності одного з елементів пристрою РПН на показники надійності трансформаторного обладнання в цілому. При підвищенні надійності роботи привода пристрою РПН у два рази, тобто при зниженні частоти відмов трансформатора через пошкодження у приводі на 50 %, частота відмов привода складатиме  $\omega_{ПР}(t) = 0,03875$  відмов/р. На підставі виразів (10) і (11) (табл. 2) визначимо показники надійності привода і інших елементів пристрою РПН.

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи пристрою РПН як системи, що складається з послідовно з'єднаних елементів, з урахуванням підвищення надійності роботи привода:

$$P_{0РПН}(t) = P_{0ПР}(t) \cdot P_{0ВИБ}(t) \cdot P_{0К}(t),$$

$$P_{0РПН}(t) = 0,996132 \cdot 0,996257 \cdot 0,996257 = 0,988689$$

Таблиця 2

Показники надійності елементів пристрою РПН з урахуванням підвищення надійності роботи привода

Елемент пристрою РПН	Частота відмов $\omega(t)$ , відмов/р.	Імовірність безвідмовної роботи за час $t = 1$ р. $P_0(t)$	Імовірність відмови за час $t = 1$ р. $Q(t)$
Привод	0,003875	0,996132	0,003868
Вибирач	0,00375	0,996257	0,003743
Контактор	0,00375	0,996257	0,003743

Частоту відмов пристрою РПН знайдемо із співвідношень (7) і (10):

$$\omega_{\text{РПН}}(t) = 0,011375 \text{ відмов/р.}$$

Для повного уявлення про підвищення надійності роботи трансформатора за рахунок удосконалення привода РПН

знайдемо число відмов трансформаторів через пошкодження в пристрої РПН при загальній кількості трансформаторів 1000 од. і часі їх роботи чотири роки. Для заданих умов число відмов трансформаторів напругою 110 кВ через РПН складе 45,5 відмови за чотири роки (табл. 3).

Таблиця 3

Вплив підвищення надійності одного з елементів пристрою РПН на показники надійності трансформаторного обладнання

Показники надійності	без урахування підвищення надійності роботи привода	з урахуванням підвищення надійності роботи привода
Частота відмов $\omega(t)$ , відмов/р.	0,01525	0,0113
Імовірність безвідмовної роботи за час $t = 1$ р. $P_0(t)$	0,9849	0,9887
Число відмов через РПН за 4 роки	61	45,5

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Аналіз теоретичних і практичних досліджень може бути використаний для розроблення загальної концепції побудови РПН нового типу на базі ДРК. Ця концепція складається з декількох етапів і виражається в

наближенні цих технічних рішень, у поєднанні їх технологічних характеристик і можливостей. Позитивні ефекти, що виражаються в підвищенні надійності, простоти і технологічності пристроїв РПН, отримуються за рахунок використання технологічних властивостей ДРК.

### Список використаних джерел

1. European Smart Grids Technology Platform // European Commission. Directorate-General for Research Sustainable Energy System, EUR 22040. – 2006. – 44 p.
2. Chakraborty A. Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids / Aranya Chakraborty, Maria D. Ilic – Springer, N.Y., 2012 – 363 p.

3. ГКД 34.46.401-96 Трансформатори силові, пристрої перемикання відгалужень обмоток трансформаторів РПН під навантаженням типів PS, SDV, SCV, SAV [Текст]: методичні вказівки з налагодження / Міністерство енергетики України. – К.: ДонОРГРЕС, 2003. – 50 с.
4. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций [Текст]: учебн. для техникумов / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
5. Баркан, Я. Д. Эксплуатация электрических систем [Текст] / Я. Д. Баркан. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.
6. Bengtsson T., Kois H., Foata M., Leonard F. Monitoring tap-changer operations. Report CIGRE 12-209, 1998.
7. Kramer A. On-Load Tap-Changers for Transformers/ Operations Principels, Applications and Selection. MR-Publication, Regensburg, 1 Ausgable, 2000. – P. 172-230.
8. M. Franke, H. Mrech, "Analysis on a RRSRM with his Nonlinear Magnetic Properties", 54. IWK, Ilmenau, Germany, Sept 2009.
9. Franke M., Punk O., Mrech H., Schmucker U. Electrical actuation of a rolling rotor switched reluctance motor. – 34th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2011. – P. 451-456.
10. Наний, В. В. Развитие теории и создание эффективных конструктивных исполнений электродвигателей с катящимся ротором [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01 / Наний Виталий Викторович. – Харьков: Харьковский политехнический институт, 2014. – 335 с.
11. Моторний привод пристрою регулювання під навантаженням силового трансформатора [Текст]: патент України № 45761; МПК H02P 13/00, H01F19/00/ - Власник Національний техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут»; Хоменко І.В., Наний В.В. – заяв. 2009, № 05848, Бюл. № 22. – 4 с.
12. Китушин, В. Г. Надежность энергетических систем. Ч. 1. Теоретические основы [Текст]: учебн. пособие / В. Г. Китушин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 256 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
13. О повреждении силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации [Текст] / Б. В. Ванин, Ю. Н. Львов, М. Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53-58.

---

Хоменко Ігор Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри «Передача електричної енергії» НТУ «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +380 (057)707-66-43. E-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Федосєєнко Олена Миколаївна, старший викладач кафедри «Передача електричної енергії» НТУ «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +380 (050)702-33-39. E-mail: e.n.fedoseienko@gmail.com.

Стасюк Іван Володимирович, аспірант, кафедра «Передача електричної енергії» НТУ «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +380 (096) 302-54-90. E-mail: brokeyourbike@gmail.com.

Khomenko Igor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department "Electricity transmission", NTU "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +380 (057) 707-66-43. E-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Fedoseenko Elena, Senior Lecturer, Department of "Transmission of electrical energy", NTU "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +380 (050) 702-33-39. E-mail: e.n.fedoseienko@gmail.com.

Stasiuk Ivan, graduate student, Department of "Electricity transmission", NTU "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +380 (096) 302-54-90. E-mail: brokeyourbike@gmail.com.

Стаття прийнята 19.06.2017 р.

УДК 624.04

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПЛИТИ СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЇ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОНСТРУКЦІЇ**

Канд. техн. наук Г. М. Гасій (ПолтНТУ)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛИТЫ СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЙ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Канд. техн. наук Г. М. Гасій (ПолтНТУ)

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS OF STRESS-STRAIN STATE OF THE SLAB OF THE STEEL AND CONCRETE COMPOSITE CABLE SPACE FRAME**

Cand. of techn. sciences G. M. Gasii

*У статті наведено методику та результати експериментальних досліджень, а також скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану залізобетонної плити, яка є складовою частиною структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції. Установлено, що розподіл напружень у плиті, отриманий числовим методом, цілком відповідає експериментальним даним. Виконано порівняльний аналіз, який показав добру збіжність експериментальних та числових даних. Середня розбіжність отриманих результатів не перевищила 7%.*

**Ключові слова:** сталезалізобетон, структура, ванта, деформація, напруження.

*В статье приведена методика и результаты экспериментальных исследований, а также конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной плиты, которая является составной частью структурно-вантовой сталежелезобетонной конструкции. Установлено, что распределение напряжений в плите, полученное численным методом, полностью соответствует экспериментальным данным. Выполнен сравнительный анализ, который показал хорошую сходимость экспериментальных и численных данных. Среднее расхождение полученных результатов не превысило 7%.*

**Ключевые слова:** сталежелезобетон, структура, ванта, деформация, напряжение.

*The article presents both a methodology and results of experimental studies, also finite element analysis of the stress-strain state of reinforced concrete slab, which is part of the steel and concrete composite cable space frame. As a result of the tests, the magnitude of the destructive load was set, for each individual sample it was different and was in the range 45-47 kN. The nature of destruction of experimental samples is established. For simulation of physical and mechanical properties and boundary conditions, the results of experimental studies were applied. Creation of finite-element models of reinforced concrete slabs was carried out on the basis of a preliminary study, the purpose of which was to determine the optimal size of the finite element. As a result of the analysis, it was found that the distribution of stresses in the plate completely corresponds to the experimental data. A comparison of the experimental and numerical data was performed. The average difference of the results did not exceed 7%.*

**Keywords:** composite steel and concrete, space structure, cable, stress, strain.



**Вступ.** До ефективних рішень належать просторові структурно-вантові сталезалізобетонні конструкції, сутність яких полягає у раціональному використанні матеріалів [1]. Структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція є збірною та складається з просторових модулів. Модулі складаються зі стрижнів та плити. Сумісна робота складових елементів досягається за рахунок інтеграції стрижневих елементів у плиту під час її бетонування. За рахунок такого підходу отримується цілісний елемент. Плити для таких конструкцій можуть мати різне армування, яке є характерним як для армоцементних, так і для залізобетонних конструкцій.

**Огляд останніх джерел і публікацій** показав, що застосування у просторових конструкціях покриття сталезалізобетонних модульних елементів є доцільним [2], а поєднання сталевих стрижнів і залізобетонних плит в одній конструкції є ефективним рішенням [3, 4]. До таких конструкцій належать структурно-вантові сталезалізобетонні покриття, актуальність

розроблення яких обґрунтована [5, 6]. На цей час на моделях уже досліджено деформативність таких конструкцій, проведено експериментальні випробування та досліджено напружено-деформований стан вузлових з'єднань [7].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** На цей час питання щодо дослідження напружено-деформованого стану елементів верхнього пояса є невирішеним.

**Постановка завдання.** Провести випробування експериментальних зразків елементів верхнього пояса (залізобетонних плит) та встановити особливості їх напружено-деформованого стану. Виконати скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану залізобетонних плит структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції покриття з урахуванням особливостей реальної роботи.

**Основний матеріал і результати.** Для вирішення поставленого завдання було розроблено дослідні зразки залізобетонної плити, яка є складовою частиною просторових модулів (рис. 1).

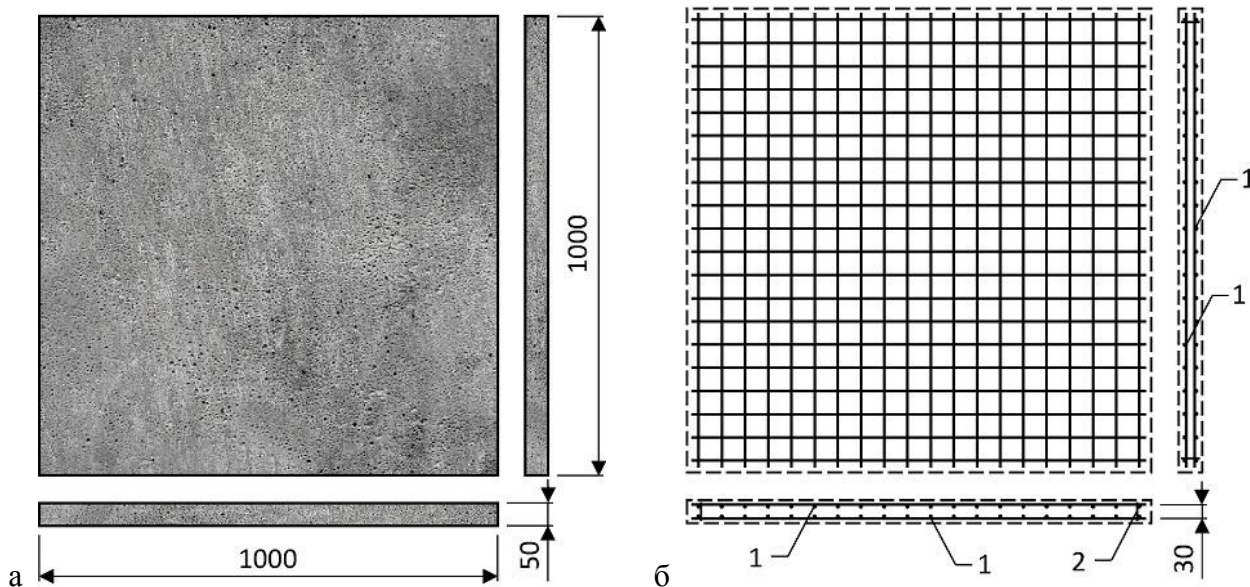


Рис. 1. Експериментальний зразок:

а – геометричні розміри; б – схема армування;

1 – сітка з дротяної арматури діаметром  $\text{Ø}3$  мм; 2 – відрізок арматури, який призначено для фіксування сіток у просторі до бетонування

Для армування плит було використано сітки з розміром чарунки  $50 \times 50$  мм, що виготовлені з дротяної арматури діаметром 3 мм. Армування здійснювалося двома сітками.

Для виготовлення дослідних зразків було використано бетонну суміш відповідно до ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Склад використаної суміші підбирався за ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Прийнятий склад бетону відповідав класу за міцністю С25/30 (пісок –  $1225 \text{ кг/м}^3$ ; цемент –  $700 \text{ кг/м}^3$ ; В/Ц 0,4). Як в'язуче для її виготовлення було використано портландцемент М500 згідно з ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Як заповнювач було використано дрібнозернистий кварцовий пісок з фракцією від 0,2 до 0,3 мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-32-95.

Деформації дослідних зразків вимірювали за допомогою дротяних тензорезисторів, а показання знимали багатоканальною вимірювальною

тензометричною системою для статичних випробувань ВНП-8М. Для заміру деформацій було використано тензорезистори 2ПКБ-50-325В з базою 50 мм. Перед використанням тензорезистори було протестовано на придатність згідно з положеннями ГОСТ 21615-76. Кріплення тензорезисторів до поверхні конструкції здійснювалося за допомогою клею БФ-2. Місця розміщення тензорезисторів та робочу поверхню самих тензорезисторів було попередньо очищено та покрито тонким шаром клею БФ-2. Після наклеювання тензорезистори прокачували гумовим валиком. Деформації вимірювалися у двох взаємно перпендикулярних напрямках (рис. 2). Для випробування експериментальних зразків було сконструйовано та виготовлено спеціальну дослідну установку, що кріпилася до силової підлоги та складалася з гідродомкрата, штанг та силової траверси (рис. 3).

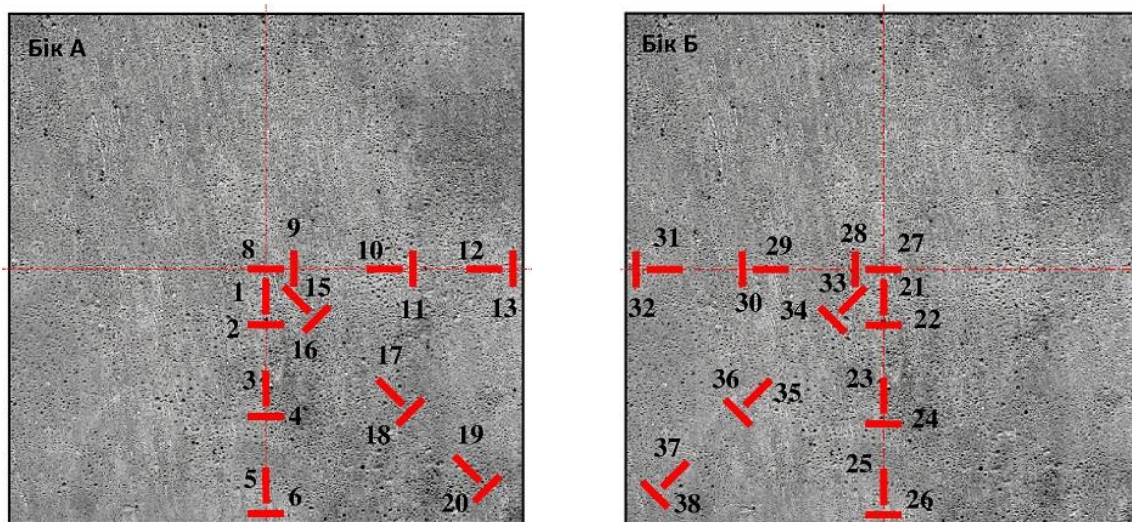


Рис. 2. Схема розміщення тензорезисторів

Дослідні конструкції випробовувалися на дію тимчасового навантаження при шарнірному обпиранні на чотири точки. Рівень прикладеного навантаження встановлювався за манометром силового обладнання. Навантаження прикладалися ступенями з 10-хвилинною витримкою,

впродовж якої виконувалося опитування тензорезисторів та проводився візуальний огляд.

Упродовж усього випробування дослідні зразки працювали як одне ціле, тобто спостерігалася сумісна робота сталевих та бетонних елементів. На

початкових стадіях завантаження спостерігалася пружна робота, а при поступовому збільшенні навантаження спостерігався розвиток тріщин у плиті (рис. 4). З досягненням критичного рівня завантаження відбувалося руйнування

залізобетонної плити. Руйнування зразків відбулося при навантаженні 45-47 кН внаслідок досягнення текучості арматури, надмірного розкриття тріщин та руйнування опорної ділянки.

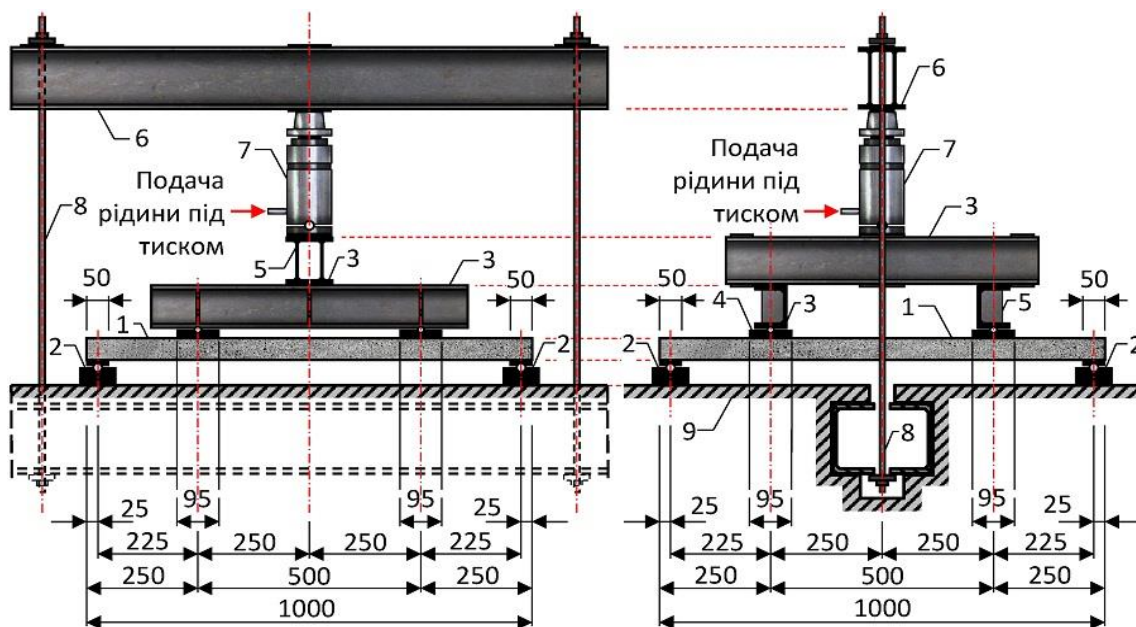


Рис. 3. Схема дослідження зразків:

1 – дослідний зразок; 2 – шарнірні опори; 3 – розподільча траверса; 4 – сталевий диск Ø95 мм; 5 – шарнір; 6 – силова траверса; 7 – гідродомкрат; 8 – штанга; 9 – силова підлога

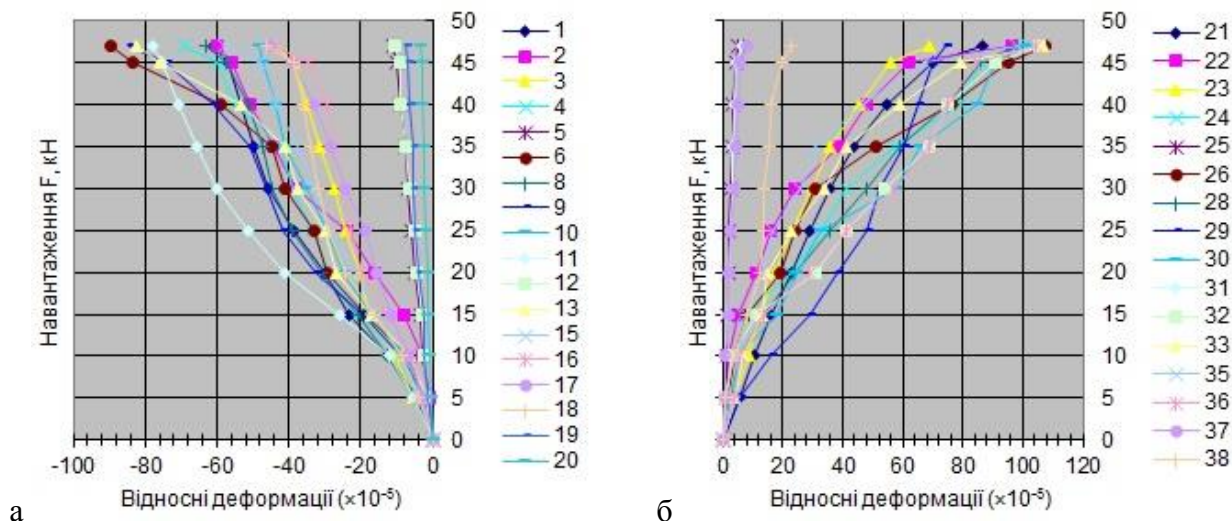


Рис. 4. Відносні деформації плити:

а – бік А; б – бік Б



Аналогічні дослідження було проведено за допомогою числового методу. Особливості роботи та напружено-

деформований стан плит досліджувалися на плоских і об'ємних моделях (рис. 5).

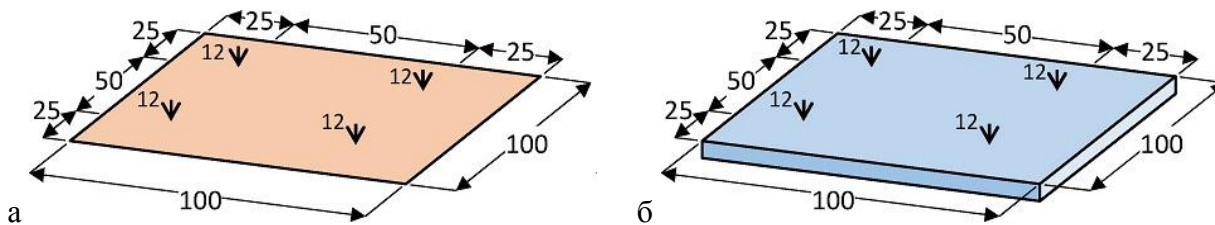


Рис. 5. Розрахункова схема залізобетонної плити:  
а – плоска модель; б – об'ємна модель

При виконанні числового розрахунку кожної зі схем розглядалося по декілька моделей з різним ступенем подрібнення. Було виконано аналіз отриманих даних для встановлення їх збіжності та визначення точності результатів.

На підставі детального аналізу ізополів напружень, отриманих у результаті пошуку рішення, виявлено вразливі ділянки конструкції – місця обпирання та прикладення зосередженої сили, а також

бічні ділянки плити. Визначений шляхом моделювання напружено-деформований стан залізобетонної плити кореспондується з результатами експериментальних досліджень, а ділянки з найбільшими напруженнями відповідають характеру руйнування експериментальних зразків.

Числові дані було порівняно із результатами експериментальних досліджень (рис. 6, 7).

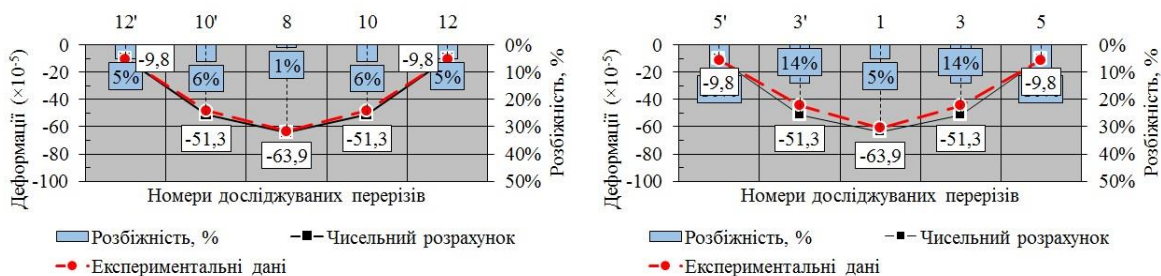


Рис. 6. Порівняння поздовжніх деформацій, отриманих числовим розрахунком, з результатами експериментальних досліджень

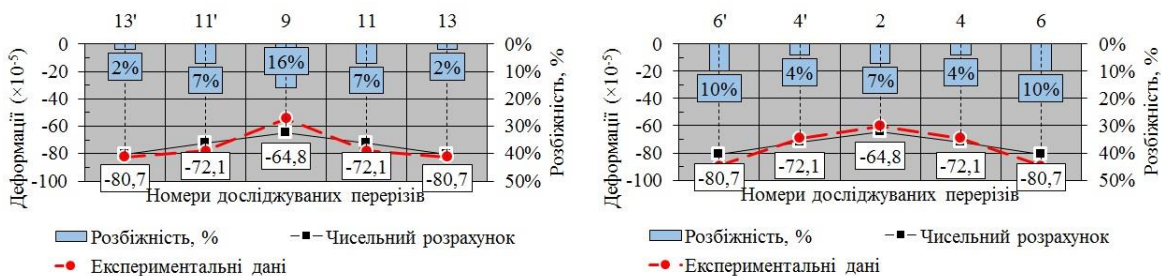


Рис. 7. Порівняння поперечних деформацій, отриманих числовим розрахунком з результатами експериментальних досліджень

Із наведених графіків видно, що отримані результати мають добру збіжність з експериментальними. У середньому розбіжність результатів перебуває в межах 7 %, що дає змогу об'єктивно оцінити напружено-деформований стан плити, оскільки більшою мірою ця розбіжність спричинена не стільки точністю розрахунку, скільки невідповідністю реальної роботи конструкції розрахунковій схемі та складністю це врахувати при моделюванні. Причинами цього можуть бути: невідповідність геометрії конструкції проектним розмірам; неточності у виготовленні, накладанні в'язей, прикладанні навантаження; неоднорідність матеріалу; нелінійна залежність деформування бетону тощо. Усе це в сукупності може сформувати зазначену розбіжність.

**Висновки.** Відповідно до поставленої мети було розроблено методику експериментальних досліджень залізобетонних плит, що є елементами верхнього пояса структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції. Прийнята схема дослідження враховувала особливості реальної роботи конструкції. Згідно з розробленою методикою було

випробувано дослідні зразки. У результаті випробувань установлено величину руйнівного навантаження, для кожного окремого зразка вона була іншою та перебувала в діапазоні 45–47 кН. Установлено характер руйнування дослідних зразків. Також було виконано скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану моделей залізобетонних плит. При моделюванні фізико-механічних властивостей та граничних умов було застосовано результати експериментальних досліджень. Створення скінченно-елементних моделей залізобетонних плит здійснювалося на підставі попередньо проведеного дослідження, метою якого було визначення оптимального розміру скінченного елемента. У результаті аналізу встановлено, що розподіл напружень у тілі плити цілком відповідає експериментальним даним. Було порівняно отримані експериментальні та числові дані. Порівняння показало добру збіжність результатів. В окремих випадках максимальна розбіжність досягала 16 %. Середня розбіжність отриманих результатів не перевищила 7 %, що є цілком задовільним результатом.

### *Список використаних джерел*

1. Стороженко, Л. І. Просторові сталезалізобетонні структурно-вантові покриття [Текст]: монографія / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій, С. А. Гапченко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. – 218 с.
2. Wong H.T. Behaviour and modelling of steel-concrete composite shell roofs: PhD Thesis / Hon-Ting Wong. – Hong Kong: PolyU, 2005. – 420 p.
3. Вибранець, Ю. Ю. Міцність і деформативність комбінованих металевих систем, об'єднаних у сумісну роботу зі залізобетонною плитою [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Юрій Юрійович Вибранець. – Львів, 2016. – 158 с.
4. Краснов, С. М. Удосконалення систем прогонних будов пішохідних мостів при динамічному впливі [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Сергій Миколайович Краснов. – Харків, 2015. – 268 с.
5. Gasii G.M. Comparative characteristics of the spatial grid-cable steel-concrete composite slab / G.M. Gasii // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С. 260–265.
6. Gasii G.M. Types of steel and concrete composite cable space frames / G.M. Gasii // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – №6 (66). – P. 158 – 165.

7. Storozhenko L.I. Analysis of stress-strain state of the steel-concrete composite ribbed slab as a part of the spatial grid-cable suspended structure / L.I. Storozhenko, G.M. Gasii // Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2016. – №2. – P. 81–86.

8. Gasii G.M. The flat double-layer grid-cable steel-concrete composite / G.M. Gasii // Proceedings of the METNET Seminar 2016 in Castellon. – Hämeenlinna: HAMK University of Applied Sciences. – 2016. – P. 56–62.

9. Гасій, Г. М. Основи формотворення і проектування просторових покриттів із структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій [Текст] / Г. М. Гасій // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – 2016. – №87. – С. 48–53.

10. Стороженко, Л. І. Дослідження напруженого стану елементів вузлових з'єднань структурно-вантових сталезалізобетонних покриттів на основі результатів моделювання умов їх роботи [Текст] / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Містобудування та територіальне планування. – 2016. – № 61. – С. 343–347.

---

Гасій Григорій Михайлович, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.  
E-mail: grigorii\_g\_m@ukr.net.

Gasii Grygorii Mykhailovych, cand. of techn. sciences, associate professor, doctoral student of the department of structures from a metal, wood and plastics, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.  
E-mail: grigorii\_g\_m@ukr.net.

Стаття прийнята 21.06.2017 р.

УДК 656.21

## **ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ У СИСТЕМІ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

Доктори техн. наук Є. С. Альошинський, О. М. Огар, асист. О. С. Пестременко-Скрипка

## **ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА УКРАИНЫ В СИСТЕМЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПЕРЕВОЗОК**

Доктора техн. наук Е. С. Алёшинский, А. Н. Огарь, ассист. О. С. Пестременко-Скрипка

## **COMPETITIVENESS RAILWAY UKRAINE INTERNATIONAL TRANSPORT SYSTEM**

Dr. sc. sciences E.S. Aleshinskiy, A.N. Ogar, assistant O.S. Pestremenko-Skripka

*З реформуванням залізничного транспорту необхідно переглянути концепцію положень перевізного процесу й відповідно виробити чіткі орієнтири на підвищення якості послуг. Необхідність забезпечення конкурентоспроможності залізниць, підвищення ефективності роботи, зниження простою на прикордонних передавальних станціях – ці та інші завдання можуть бути вирішені за допомогою впровадження в роботу залізничного транспорту системи аналізу та управління ризиками.*

*Ключові слова:* прикордонна передавальна станція, система управління ризиками, кореляційний та регресійний аналіз.

*С реформированием железнодорожного транспорта необходимо пересмотреть концепцию положений перевозочного процесса и соответственно выработать четкие ориентиры на повышение качества услуг. Необходимость обеспечения конкурентоспособности железных дорог, повышение эффективности работы, снижение простоя на пограничных передаточных станциях – эти и другие задачи могут быть решены с помощью внедрения в работу железнодорожного транспорта системы анализа и управления рисками.*

**Ключевые слова:** пограничная передаточная станция, система управления рисками, корреляционный и регрессионный анализ.

*The European orientation of Ukraine includes not only the implementation of international law, but adaptation in many areas activity and life of the state and society. For rail transport primary objective may be to develop new approaches in international transport technology and training.*

*From the railway reform is necessary to review the concept of the provisions transportation process and therefore develop clear guidelines on improving the quality of services. For the Ukrainian railway transport is extremely useful experience European neighbors.*

*The introduction of the rail transport system analysis and risk management is one of the promising directions development of the industry. This reduces material and labor costs, improve the efficiency of the measures of control and speed up the passage of goods, customs procedures. The risk management system is based on the principle of selective inspection processing operations in international traffic, based on risk analysis of the possibility illegal movement goods across the customs border of Ukraine.*

**Keywords:** border transfer station, risk management, correlation and regression analysis.

**Вступ.** У забезпеченні нормальних взаємовідносин із закордонними країнами в умовах транспортного ринку найбільш перспективним напрямком розвитку є використання вигідного географічного положення України для переробки міжнародних експортно-імпортних та транзитних вантажопотоків. В умовах підвищення конкурентоспроможності на транспортному ринку особлива увага приділяється підвищенню швидкості, якості, надійності та економічності перевезень шляхом упровадження нових технологій. У зв'язку з цим одним із найголовніших напрямків розвитку залізничної галузі на сьогодні стає необхідність розгляду задачі удосконалення процедур обробки міжнародних вантажопотоків.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Удосконалення перевезень у міжнародному сполученні можливе при злагодженій роботі всіх учасників

перевізнього процесу та при взаємодії вітчизняних і закордонних залізниць. Важливим етапом у розвитку міжнародних перевезень стала розроблена у 1991 році та затверджена у 1994 році система міжнародних транспортних коридорів (МТК) [1]. В Україні багато наукових досліджень з'явилося після введення в дію Постанови Кабінету Міністрів України № 821 від 04.08.97 р. про затвердження Концепції створення і функціонування національної мережі транспортних коридорів в Україні [2]. Основна наукова та практична заслуга вирішення проблеми розвитку системи міжнародних транспортних коридорів в Україні належить Г. М. Кірпи [3]. Дослідження проблем роботи залізниць у системі міжнародних транспортних коридорів були актуальними як для вітчизняних дослідників, так і закордонних [4-6]. Слід відзначити, що в більшості наукових робіт, з точки зору привабливості міжнародних вантажних перевезень,

приділялась увага питанням зменшення термінів перевезень вантажів та часу обігу вагонів. На сьогодні кардинально постала задача удосконалення процедур проходження різного роду операцій на прикордонних передавальних станціях. Техніко-експлуатаційні характеристики інфраструктури залізничного транспорту при здійсненні міжнародних перевезень аналізуються у роботах Альошинського Є.С., Бутько Т.В., Данька М.І., Дьоміна Ю.В., Козака В.В., Ломотька Д.В., Мироненка К.П., Мироненка В.К., Нагорного Є.В., Тітова М.Ф., Шиша В. О. [7-10] та ін.

**Визначення мети та задачі дослідження.** У сучасних умовах жорсткої конкуренції швидкість доставки вантажів набуває великого значення, тому зменшення затримок на кордоні зміцнить позиції залізничного транспорту на ринку транспортних послуг, у тому числі в міждержавному сполученні. Метою цієї статті є удосконалення системи міжнародних вантажних перевезень за рахунок зниження часу простою та кількості затриманих вагонів на прикордонних передавальних станціях за рахунок упровадження системи управління ризиками (СУР).

**Основна частина дослідження.** У червні 2005 р. Всесвітня митна організація (далі – ВМО) – єдина міжурядова організація, яка спеціалізується на митній справі – прийняла Рамкові стандарти безпеки та спрощення світової торгівлі (SAFE). Нині членами ВМО є 174 країни світу з 6 регіонів. А Рамкові стандарти – міжнародний інструмент, що містить 17 стандартів, у яких регламентується безпека, спрощення торгівлі, боротьба з корупцією та збирання податків. Виходячи з того, що роль митниці у XXI ст. потребує оновленого професійного підходу до управління та функціонування митних адміністрацій у всьому світі, Всесвітня митна організація започаткувала дві програми: COLUMBUS (WCO Columbus Programme) та PICARD (Partnership in

Customs Research and Academic Development).

З прийняттям 23.06.2005 р. введених ВМО Рамкових стандартів безпеки і спрощення світової торгівлі та приєднанням до протоколу про внесення змін до Міжнародної конвенції про спрощення та гармонізацію митних процедур наша держава підтримала курс на уніфікацію міжнародних стандартів безпеки, модернізацію митних служб, зміцнення кадрового потенціалу.

Важливо, що до пріоритетів ВМО, крім нарощування потенціалу митних служб, належать питання безпеки й сприяння розвитку торгівлі, насамперед безпеки ланцюгів постачання та боротьби з контрабандою, з фальсифікацією продукції та піратством. У червні 2004 р. на засіданні в Женеві ВМО закликала особливу увагу приділити питанням спрощення митних процедур і прийняття сучасних методів контролю, які базуються на оціюванні ризиків. Тим самим ВМО наголосила, що питання, окреслені в Рамкових стандартах безпеки, потребують широкомасштабних змін. Була прийнята програма G8, яка стала одним з інструментів імплементації стандартів безпеки.

Упровадження в роботу залізничного транспорту України СУР є одним з перспективних напрямків розвитку цієї галузі. Це дає змогу зменшити матеріальні й трудові витрати, підвищити ефективність здійснюваних заходів контролю та пришвидшити проходження товарами процедури митного оформлення. Митні органи держав-членів ЄС є одними з найбільш прогресивних у всьому світі. Вони активно використовують при побудові своєї системи управління ризиками документи, розроблені міжнародними організаціями в зазначеній сфері.

СУР використовує різноманітні рейтингові системи: здебільшого систему «високий, середній та низький ступінь ризику» або три види «коридорів»: зелений,



жовтий і червоний. Використання даних про ризик, його оцінювання, повинні застосовуватись, урахувавши основні фактори впливу при здійсненні експортно-імпортних операцій. У статті адаптовано для України та проаналізовано понад 20 факторів, з яких відокремлено основні фактори, які впливають на пропуск поїздів на прикордонних передавальних станціях: географічний критерій маршруту прямування, номенклатура, фактурна вартість вантажу, тип рухомого складу та його вага нетто. Для оцінки ризику та визначення величини його впливу у статті запропоновано використовувати метод кореляційного та регресійного аналізу.

Як вихідні дані взято основні показники роботи прикордонної передавальної станції Вадул-Сірет РФ «Львівська залізниця» за період 2013-2015 рр. та прикордонних передавальних станцій РФ «Південна залізниця» за період 2010-2015 рр. з експортних, імпортних, транзитних перевезень за основними факторами, які впливають на пропуск поїздів. Розрахунки велися з

використанням вбудованих функцій у програмному продукті Microsoft Excel.

На рис. 1 розглянуто приклад кореляційної залежності між експортом вантажів за номенклатурою X (вироби з каменю, гіпсу, цементу, кераміки, скла) та кількістю затриманих вагонів Y на прикордонних передавальних станціях РФ «Південна залізниця» за 2010-2015 рр. [11].

Згідно з рис. 1 коефіцієнт кореляції становить  $r=0,94$ . У цьому випадку зв'язок між експортом виробів з каменю, гіпсу та інших матеріалів з кількістю затриманих вагонів з експорту дуже високий і прямий. Використано експоненціальну регресію, за якою коефіцієнт детермінації  $R^2=0,911$ , тобто у 91,1% випадків зміни розміру експорту виробів з каменю, гіпсу й інших матеріалів призводить до зміни кількості затриманих вагонів на прикордонних передавальних станціях. Для оцінювання значущості коефіцієнта кореляції було розраховано t-критерій Стьюдента. Перевірка значущості моделі регресії проводиться з використанням F-критерію Фішера.

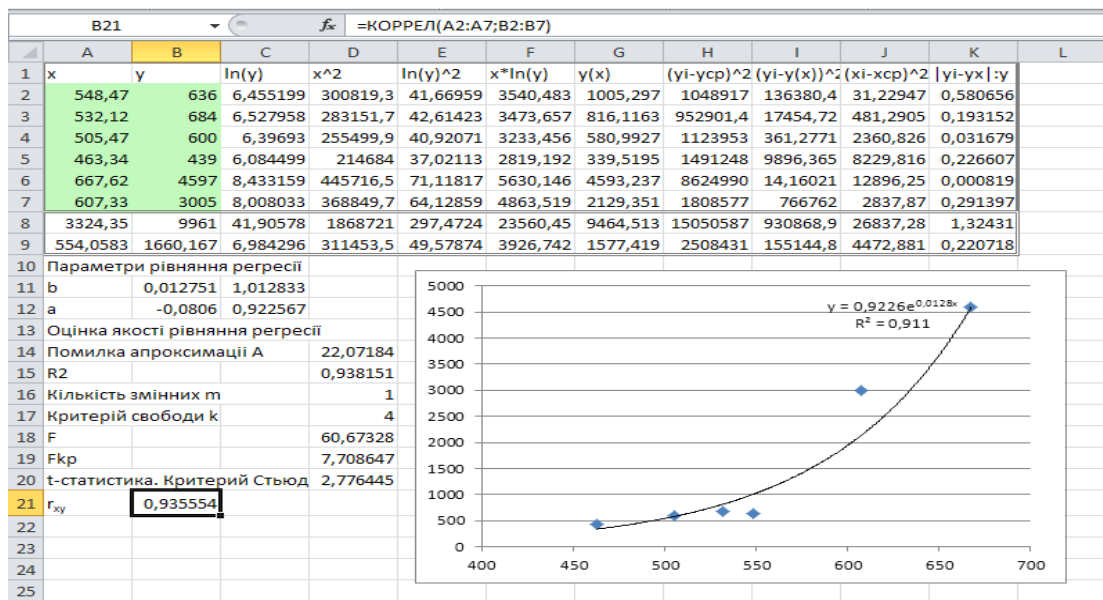


Рис. 1. Експоненціальна регресія залежності обсягів експорту виробів з каменю, гіпсу й інших матеріалів та кількості затриманих вагонів на прикордонних передавальних станціях РФ «Південна залізниця»

Індексний параметр ризику розраховується так:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} r_{H_j} + \sum_{i=1}^3 \sum_{\beta=1}^3 r_{K_{i\beta}} + \sum_{\mu=1}^5 r_{G_{\mu}} + \sum_{s=1}^4 r_{F_s} + \sum_{t=1}^3 r_{M_t}}{D}, \quad (1)$$

де  $i$  – порядковий номер видів сполучення,  $i \in [1;3]$ ;

$j$  – порядковий номер номенклатурної категорії вантажу,  $j \in [1;15]$ ;

$\beta$  – порядковий номер географічного критерію маршруту прямування,  $\beta \in [1;3]$ ;

$\mu$  – порядковий номер типу рухомого складу,  $\mu \in [1;5]$ ;

$s$  – порядковий номер фактурної вартості вантажу,  $s \in [1;4]$ ;

$t$  – порядковий номер ваги нетто,  $t \in [1;3]$ ;

$D$  – кількість факторів впливу на параметри ризику.

Побудована залежність дає можливість розглянути 24300 варіантів параметра ризику. У залежності від результуючого значення індексу ризику, необхідним є розділення його значень на діапазони довіри в залежності від тісноти кореляційного зв'язку між відповідними факторами впливу, а саме:

діапазон [0,10-0,30] – зелена зона – ризику не виявлено, вантаж не потребує перевірки;

діапазон [0,31-0,50] – жовта зона – виявлено низький рівень ризику, усі форми контролю передбачають здійснення документальної перевірки та інших заходів, що не потребують огляду вантажу чи транспортних засобів;

діапазон [0,51-0,70] – помаранчева зона – виявлено середній рівень ризику, необхідно здійснити документальну перевірку та огляд деякої частини вантажу чи транспортних засобів;

діапазон [0,71-1,00] – червона зона – виявлено високий рівень ризику та сформовано перелік форм контролю, які передбачають здійснення заходів, що

потребують детального огляду вантажу чи транспортних засобів.

Виходячи з проведеного аналізу до червоної зони потрапляє всього 21,3 % розглянутих за 6-річний період вантажів, у помаранчеву – 13 %, у жовту – 19,4 %. У зелену можна віднести до 46,3 %. Таким чином, теоретично на прикордонних передавальних станціях України можливо зменшити відповідно кількість затриманих вагонів, які не потрапили до червоної зони.

За допомогою програмного продукту, виконаного в середовищі Delphi, було розроблено модель аналізу ризиків на прикордонних передавальних станціях. Віконний інтерфейс програмного середовища функціонування системи підтримки прийняття рішень наведено на рис. 2.

У випадку, наведеному на рис. 2, а, вантаж потрапляє в червону зону ризику, отже, необхідно провести детальний огляд вантажу чи транспортного засобу; на рис. 2, б – у зелену зону ризику, отже, вантаж не потребує перевірки.

Сукупності показників використання СУР надають чіткий алгоритм подальших заходів щодо переробки кожного окремого міжнародного відправлення, що за прогнозними оцінками приведе до зниження простоїв на прикордонних передавальних станціях України приблизно в 3,5 разу. Проведені подальші дослідження та розрахунки довели, що тривалість обробки транзитного поїзда з повним циклом прикордонних операцій можливо знизити від нинішніх 170 до 45 хв, час переробки транзитного поїзда можливо зменшити зі 120 до 35 хв, а тривалість обробки поїзда свого формування – зі 180 до 75 хв [12].

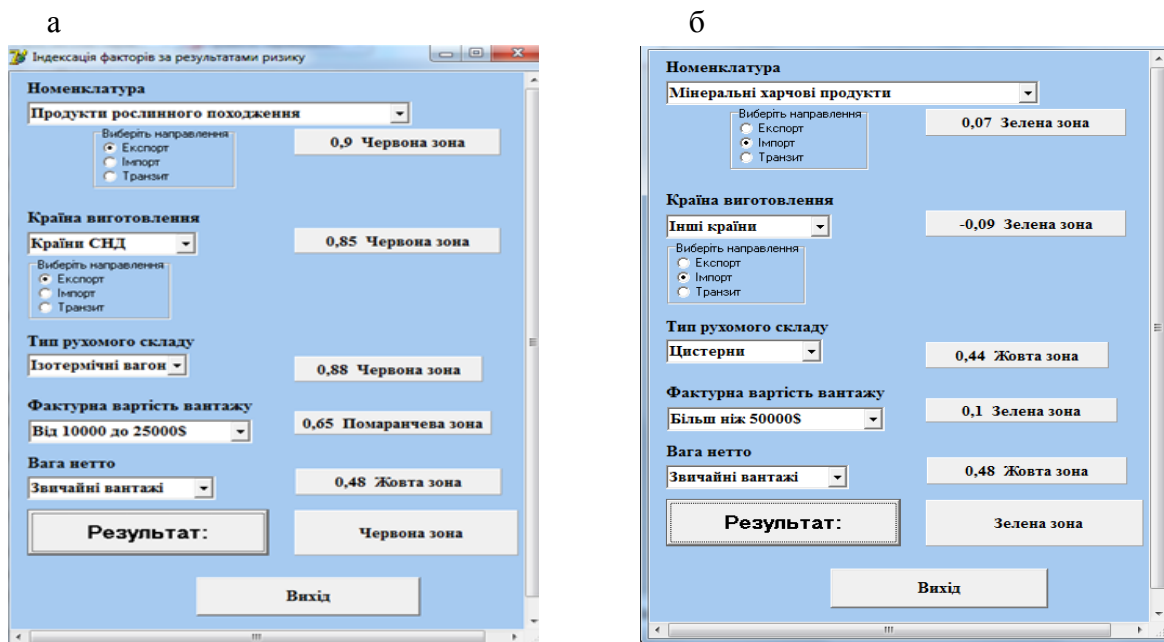


Рис. 2. Програмний інтерфейс моделі визначення рівня ризиків на прикордонних передавальних станціях: а – червона зона рівня ризику; б – зелена зона рівня ризику

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Аналіз теоретичних досліджень показав, що в більшості робіт не приділено уваги задачі оптимізації прикордонно-митних операцій для зменшення простоїв на прикордонних передавальних станціях України за рахунок оптимізації функціонування додаткових контролюючих служб при раціоналізації роботи інформаційних підсистем. Для оптимізації системи передачі вантажного вагонопотоку на прикордонних передавальних станціях запропоновано впровадження СУР, сформовано комплексний критерій системи оцінювання ризиків затримки вагонопотоків, який урахує основні фактори впливу на пропуск поїздів, впроваджено метод

кореляційно-регресійного аналізу як елемента системи підтримки прийняття рішень в СУР та розроблено модель аналізу ризиків на прикордонних передавальних станціях, у якій при розрахунку рівня ризику надається перелік конкретних заходів щодо переробки кожного окремого міжнародного відправлення.

Отже, запровадження системи аналізу й управління ризиками дасть змогу прикордонним передавальним станціям України створити сприятливі умови для суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності, підвищити конкурентоспроможність залізничного транспорту, знизити простої вагонів на прикордонних передавальних станціях, що сприятиме подальшому впровадженню євроінтеграційних процесів в Україні.

### Список використаних джерел

1. EUROPEAN Agreement on Important International Combined Transport Lines and Related Installations (AGTC) // United Nations Economic Commissions for Europe Inland Transport Committee. – Done in Geneva on 1 February 1991. – 33 p.
2. Концепція та програма реструктуризації на залізничному транспорті України [Текст]. – К.: Міністерство транспорту, 1998. – 232 с.

3. Кірпа, Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему [Текст]: монографія / Г. М. Кірпа. – 2-ге вид., переробл. і допов. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2004. – 248 с.
4. Woroniuk, C. Time series analysis of rail freight by the private sector in Europe [Text] / C. Woroniuk, M. Marinov, T. Zunder, P. Mortimer // *Transport Policy*. – 2013. – Vol. 25. – P. 81-93.
5. Qi, J. Integrated multi-track station layout design and train scheduling models on railway corridors [Text] / J. Qi, L. Yang, Yu. Tao, Sh. Li, Z. Gao // *Transportation research Part C*. – 2016. – Vol. 69. – P. 91-119.
6. Li, H. Research on travel mode share and operation strategy in Baoji-Lanzhou transportation corridor [Text] / H. Li, Ch. Zhu, Yu. Zhang // *Journal of Information & Computation Science*. – 2015. – Vol. 12. № 4. – P. 1469-1478.
7. Данько, М. І. Розробка методики розрахунку прогнозованої оцінки по затримкам вагонів на прикордонних передавальних залізничних станціях [Текст] / М. І. Данько, Є. С. Альшинський, Ю. В. Кіхтева // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – Харьков, 2007. – № 5/2 (29). – С. 61-65.
8. Козак, В. В. Розробка моделі розвитку інтегрованості міжнародних залізничних транспортних коридорів на стратегічному рівні планування перевезень [Текст] / В. В. Козак, Т. В. Бутько, А. В. Прохорченко // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2011. – №7. – С. 36-41.
9. Нагорный, Е. В. Проблемы технологии работы пограничных передаточных станций [Текст] / Е. В. Нагорный, В. А. Шиш, Н. В. Титов // *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. – 1997. – №4. – С. 38-40.
10. Ломотько, Д. В. Формування нечіткої системи підтримки прийняття рішення щодо придатності у комерційному відношенні рухомого складу при його розподілі [Текст] / Д. В. Ломотько, А. О. Ковальов, О. В. Ковальова // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – № 6/3 (78). – С. 11-17.
11. Інтеграція інформаційного простору системи міжнародних вантажних перевезень [Текст] / Є. С. Альшинський, О. С. Пестременко-Скрипка, А. Рудакова, С. Багіров // *Українська залізниця*. – Харків, 2016. – № 6(36). – С. 53-55.
12. Альшинський, Є. С. Розробка математичної моделі процесу раціоналізації роботи прикордонних передавальних станцій при застосуванні системи управління ризиками [Текст] / Є. С. Альшинський, О. С. Пестременко-Скрипка, К. В. Таратушка // *Залізничний транспорт України: наук.-практ. журнал*. – Харків, 2015. – №5(114). – С. 13-18.

---

Альшинський Євгеній Семенович, д-р техн. наук, професор кафедри транспортних систем та логістики Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-55.

E-mail: aesevgeny@gmail.com.

Огар Олександр Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: Ogar.07.12@gmail.com.

Пестременко-Скрипка Оксана Сергіївна, асистент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: ksj2910@i.ua.

Alyoshinsky Evgeny Dr. sc. sciences department of transport systems and logistics of the Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (057) 730-10-42. E-mail: aesevgeny@gmail.com.

Ogar Alexander, Dr. sc. sciences department of railway stations and units of the Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (057) 730-10-42. E-mail: Ogar.07.12@gmail.com.

Pestremenko-Skripka Oksana asistent department of railway stations and units of the Ukrainian State University of Railway Transport. Ph.: (057) 730-10-42. E-mail: ksj2910@i.ua.

Стаття прийнята 21.06.2017 р.

УДК 532.5:519.6

## ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ СИЛОСНИХ СПОРУД ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

Доктори техн. наук О. І. Лапенко (НАУ), А. В. Махінько (ТОВ «Етуаль»),  
канд. техн. наук Н. О. Махінько (НАУ)

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИЛОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Доктора техн. наук А. И. Лапенко (НАУ), А. В. Махинько (ООО «Этуаль»),  
канд. техн. наук Н. А. Махинько (НАУ)

## TO THE QUESTION OF STRUCTURAL ANALYSIS OF SILO STRUCTURES MADE OF HIGH-STRENGTH STEELS

Doct. of techn. sciences A. Lapenko, A. Makhinko, Ph.D. in Engineering N. Makhinko

*У статті подано результати розрахунку конструкцій силоса діаметром 22 м, виконаних зі сталі підвищеної міцності S550 GD з наступним детальним аналізом несучої здатності основних елементів. Обґрунтовано рішення щодо недоцільності застосування конструкційних сталей з умовною границею текучості з точки зору забезпечення надійності й безпеки конструкцій силосних ємностей, а також фактори, які це обумовлюють.*

**Ключові слова:** силос, несуча здатність, напружено-деформований стан, тиск зерна, сталь S550GD.

*В статье приведены результаты расчета конструкций силоса диаметром 22 м, выполненных из стали повышенной прочности S550GD с последующим детальным анализом несущей способности основных элементов. Обосновано решение о нецелесообразности применения конструкционных сталей с условной границей текучести с точки зрения обеспечения надежности и безопасности конструкций силосных емкостей, а также факторы, которые это обуславливают.*

**Ключевые слова:** силос, несущая способность, напряженно-деформированное состояние, давление зерна, сталь S550GD.

*Silos are the tall containers used to store bulk solids. The article presents results of structural analysis of silo with diameter of 22 m, constructed from high-strength steel S550GD. The research results are of both sci-entific and practical interest. In this study, the mathematical model of the silo was used in the SCAD 21.1 software complex. The silos section was modeled with flat shell finite elements. Vertical stiffeners and roof was modeled with finite bar. An analysis of results of calculations showed that silos element will have strengths reserve. The sheets thicknesses and vertical stiffeners can be reduced. Shown the inappropriateness of applying high strength steel in this field construction. This is evidenced in the case below. The value of safety factor value is follow to one. The structure reliability from such high-strength steels is low. The structure failure takes place quickly, and plastic deformations do not develop. The stress-strain state of structures depends on stress concentration hole.*

**Keywords:** Silo, bearing capacity, stress-strain state, pressure of grain, steel S550GD.

**Вступ.** Наша країна є частиною глобального зернового ринку із позитивною тенденцією щорічного зростання. Сезонний характер виробництва зерна і постійна висока споживча необхідність викликають потребу його зберігання протягом тривалого терміну. Лише правильне складування сировини у сховищах дає можливість поставляти якісне зерно, відповідно до суворих правил країн-імпортерів. Для забезпечення цих вимог найбільш масово та широко аграріями використовуються сталеві оцинковані силоси. Ці споруди дають змогу здійснювати високотехнологічне переміщення зерна, його кондиціонування та переробку з мінімальним втручанням персоналу. Проте для збільшення рентабельності та зниження вартості конструкції даного виду науковці постійно перебувають у творчому пошуку оптимальної залежності між висотою та радіусом конструкції, з одного боку, і товщиною ребер жорсткості та стінових панелей – з іншого.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками розрахунки силосних конструкцій мають значний попит серед заводів-виробників. Щоправда, лише малий відсоток цих результатів залишає слід у загальному науковому доробку. Це пов'язано з великою ринковою конкуренцією, адже одного разу вдало реалізований проект може бути розтиражований на значній території. Серед наукових праць, присвячених проблемі розрахунку сталевих круглих силосів, слід відмітити [1, 2, 3].

**Визначення мети та задачі дослідження.** Одним із інноваційних та перспективних шляхів при проектуванні металевих конструкцій є застосування сучасних сталей підвищеної міцності. Це є логічним кроком реалізації актуальної тенденції впровадження ресурсозберігаючих технологій. Щоправда, лише наукове обґрунтування може бути підставою для вирішення, наскільки виваженим та стратегічно доцільним є такий крок.

Стосовно окреслених передумов була поставлена практична задача оцінки несучої здатності сталевих елементів силоса за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) при виконанні конструкції зі сталі підвищеної міцності S550GD.

**Основна частина дослідження.** Для розрахунків було обрано сталевий силос типу діаметром 22 м, що являє собою сталеву ємність циліндричної форми, яка влаштовується на плоску бетонну основу. Конструктивно силос виконано у вигляді циліндричної оболонки, підкріпленої зовнішніми ребрами жорсткості. Оболонка складається з профільованих хвилястих оцинкованих панелей номінальною висотою 1152 мм. Товщина сталевих листів, з яких виготовлені панелі, має чотири основні розміри – 1.5, 2.0, 2.5 та 3.0 мм. Товщина стінки силоса, залежно від висоти розташування панелей та величини горизонтального тиску сипкого матеріалу (зерна), набирається з однієї чи декількох панелей і з висотою зменшується від 4,5 мм до 3,5 мм. Окремі панелі з'єднуються між собою за допомогою болтів з ущільнювальними елементами. Для забезпечення вертикальної стійкості панелі підкріплені вертикальними ребрами жорсткості з гнutoго профілю трапецеїдальної форми розмірами 280×120 мм. Опори ребер жорсткості закріплюються до залізобетонного кільцевого фундаменту за допомогою анкерних болтів. Товщина поперечного перерізу ребер зменшується з висотою в межах від 2.0 до 6.0 мм.

Покрівля силоса являє собою складну просторову конструкцію, складену із тонкостінних гнутих елементів (прогонів та кільцевих ребер жорсткості) і трапецеїподібних секторів на болтах із ущільнювальними прокладками. Сектори виготовлені з оцинкованої сталі і мають кутовий крок 15°. Прогони та кільцеві ребра жорсткості з одного боку кріпляться до краю циліндричного корпусу силосної ємності за допомогою спеціального ущільнювального бандажа, з іншого – до

центрального кільця. Покрівля має ухил  $30^\circ$ . Над покрівлею силоса розташовується надсилосна галерея, що складається із горизонтального моста і двох стійок, які кріпляться безпосередньо до корпусу силоса.

Виготовлення вертикальних ребер жорсткості та листів корпусу силоса передбачається виконувати зі сталі підвищеної міцності S550GD (номер сталі 1.0531). Відповідно до ДСТУ EN 10346 [8] сталь S550GD має такі механічні властивості: умовна границя текучості  $R_{yn,0.2} = 550$  МПа, тимчасовий опір  $R_{um} = 560$  МПа. Відповідно до положень п. 8.1.1 та п. 10.1.3 [5] розрахунок листів корпусу та вертикальних ребер жорсткості силосних ємностей необхідно виконувати на міцність при додатковому коефіцієнті надійності за матеріалом  $\gamma_u = 1.3$  із використанням розрахункового опору  $R_u$ , що визначається за тимчасовим опором при розтязі  $R_{um}$  (п. 5.4.1 [5]). Окрім цього, відповідно до п. 7.1 [5], при визначенні розрахункового опору  $R_u$  необхідно враховувати коефіцієнт надійності за матеріалом  $\gamma_m = 1.05$  із табл. 7.2 [5].

Збір розрахункових навантажень на силос виконано відповідно до державних стандартів, чинних на території України:

- характеристики сипкого матеріалу (зерна) відповідно до ДБН В.2.2-8-98 (додаток А, табл. А.1) [7];

- характеристики атмосферних навантажень у місці можливого будівництва відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 (розділи 8, 9 із урахуванням зміни № 1) [6];

- характеристики міцності матеріалу силоса (сталь) відповідно до ДСТУ EN 10346 [11] та з урахуванням вимог ДБН В.2.6-198:2014 [5].

Математичну (комп'ютерну) модель силоса типу МСВУ 220.15.В12 (див. рисунок) створено у кінцево-елементному програмному комплексі SCAD 21.1. Корпус силоса змодельований плоскими оболонковими кінцевими елементами типу 44

«чотирикутний елемент оболонки». Вертикальні ребра жорсткості та елементи покрівлі змодельовані стержневим кінцевим елементом типу 10 – «універсальний просторовий стержневий скінченний елемент».

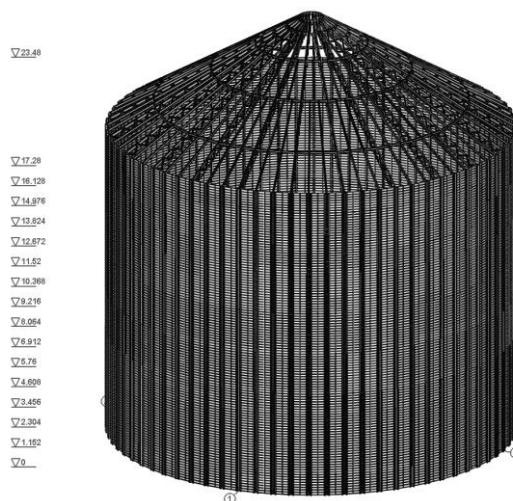


Рис. Загальний ізометричний вигляд комп'ютерної моделі силоса марки МСВУ 220.15.В12

Коректність складання розрахункової моделі силоса й відповідність результатів розрахунку дійсній роботі конструкцій на кожному кроці контролювалось за допомогою таких перевірок:

- розмірності вхідних та вихідних величин;
- характеру залежності результату від зміни деяких вхідних даних, включаючи перевірку таких властивостей, як очікування симетрії (асиметрії) або нечутливість до деяких параметрів;
- поведінки системи при екстремальних значеннях параметрів;
- дотримання висновків, які впливають із теорем взаємності.

За умов симетричного прикладання навантаження стіни сталевих силосів, підкріплених вертикальними ребрами жорсткості, працюють на розтяг і перевіряються на міцність відповідно до п. 14.1.1 – 14.1.3 [5] з коефіцієнтом умов роботи конструкцій  $\gamma_c = 1.0$ . Також

вважається, що стіни силоса не сприймають згинальні моменти і напруження вздовж твірної циліндричної частини силосної ємності. Остання обставина пояснюється наявністю щільно поставлених вертикальних ребер жорсткості, які й сприймають зусилля від сил тертя між продуктом зберігання та листами корпусу. Величина розрахункового кільцевого поздовжнього зусилля розтягу на одиницю висоти від горизонтальних тисків сипких матеріалів у стінах круглих сталевих силосів з урахуванням додаткових зусиль від температурних перепадів може бути визначена за формулою [7]:

$$N_{kp} = \frac{D_S}{2 \cdot \gamma_c} [p_{h,\Sigma}(z) + p_t(z)], \quad (1)$$

де  $D_S$  – діаметр силосної ємності,  $D_S = 22000$ , мм;  $p_{h,\Sigma}(z)$  – сумарний горизонтальний тиск на стінки силоса;  $p_t(z)$  – граничне розрахункове значення горизонтального тиску на стінки силоса від перепаду температури.

Критичний фактор сталевого листа корпусу силоса визначається як:

$$K_R = \frac{N_{kp}}{R_u \cdot t_w} \cdot \gamma_u \cdot \gamma_{neto} \leq 1, \quad (2)$$

де  $R_u$  – розрахунковий опір сталі за тимчасовим опором,  $R_u = R_{un} / \gamma_m \approx 533$  кН/см<sup>2</sup>;

$t_w$  – товщина листа корпусу силоса на заданому рівні;  $\gamma_{neto}$  – коефіцієнт ослаблення поперечного перерізу отворами болтових з'єднань,  $\gamma_{neto} = 1.25$ .

Напруження стиску у сталевих листах циліндричної частини силоса від вертикального тиску  $p_f(z)$  сипкого матеріалу не перевищують 2 кН/см<sup>2</sup>. Це пояснюється тим, що вертикальний тиск  $p_f(z)$  повністю сприймається вертикальними ребрами жорсткості силосної ємності. Дана обставина робить зайвою перевірку стійкості та міцності на стиск листів корпусу силосів.

Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Критичні фактори листів корпусу силоса

Ярус	$t_w$	$K_R$	Ярус	$t_w$	$K_R$
Початкові товщини листів корпусу			Скореговані товщини листів корпусу		
1	3.5	0.10	1	3.0	0.12
2	1.5	0.40	2	1.0	0.60
3	1.5	0.54	3	1.0	0.81
4	2.0	0.50	4	1.5	0.67
5	2.0	0.59	5	1.5	0.79
6	2.0	0.67	6	2.0	0.67
7	2.5	0.60	7	2.0	0.75
8	2.5	0.66	8	2.0	0.83
9	3.0	0.60	9	2.5	0.72
10	3.0	0.65	10	2.5	0.78
11	3.5	0.59	11	3.0	0.69
12	4.0	0.55	12	3.0	0.73
13	4.0	0.58	13	3.0	0.77
14	4.0	0.61	14	3.0	0.81
15	4.5	0.56	15	3.5	0.72



Аналіз даних дає підстави стверджувати, що листи корпусу силосних ємностей у разі застосування сталі підвищеної міцності S550GD [11] матимуть певні резерви міцності, а їх товщини можуть бути скореговані у менший бік. Проте слід пам'ятати, що загальна жорсткість корпусу силоса зменшиться, а прийняті з умов міцності товщини потребують додаткової перевірки за критерієм змінання металу з'єднаних елементів. Також заостримо увагу на тому, що, по-перше, результати розрахунків проведено щодо листів ідеальної геометричної форми, виконаних без дефектів й пошкоджень, по-друге, швидкість прямування критичного фактора до одиниці надзвичайно чутлива до зменшення товщини. Так, наприклад, зміна товщини листів 4 ярусу із 1.5 мм ( $K_R = 0.67$ ) до 1.0 мм ( $K_R = 1.0$ ) призводить до зменшення міцності листа на 33 %, а зменшення товщини листів 6 ярусу із 2.0 мм ( $K_R = 0.67$ ) до 1.5 мм ( $K_R = 0.9$ ) – до зменшення міцності на 26 %. Тобто критичний фактор прямує до одиниці швидше для листів малої товщини.

Болти, які з'єднують листи корпусу циліндричної частини силоса між собою, передбачені діаметром  $d_b = 10$  мм при діаметрі отвору  $d = 12$  мм [12], тобто болти класу точності В, С. Проте у нормах п. 16.2.3 [5] задекларовано, що «болти класів точності В і С у багатоболтових з'єднаннях слід застосовувати для конструкцій зі сталі з границею текучості до 390 МПа». Для конструкцій зі сталі з границею текучості понад 390 МПа передбачається застосування болтів підвищеної точності класу А. У зв'язку з цим було розглянуто два випадки:

- 1) болт М10  $d_b = d = 10$  мм;
- 2) болт М12  $d_b = d = 12$  мм.

Листи корпусу силосної ємності з'єднуються між собою в кільцевому напрямі декількома рядами болтів: листи першого ярусу – двома рядами; листи 2-

15 ярусів – трьома рядами, листи 16 ярусу – чотирима рядами. Кожний ряд на 1 пог. м містить 17 болтів. Розрахункові зусилля  $N_p$ , які сприймають болтові з'єднання різних ярусів, наведено у табл. 2. Сумарна кількість болтів, що припадає на 1 м. п. стику листів при дво-, три- та чотирирядному розташуванні останніх, відповідно становить:  $n_p = 34$ ,  $n_p = 51$  та  $n_p = 68$ . Перевірку несучої здатності болтових з'єднань виконано відповідно до вимог п. 16.2.10 [7] за формулою:

$$k_p = \frac{N_p}{\min\{N_{bs}, N_{bp}\}} \leq n_p, \quad (3)$$

де  $\min\{N_{bs}, N_{bp}\}$  – мінімальне значення несучої здатності болтового з'єднання на зріз або змінання.

Розрахунки для двох діаметрів болтів показали, що для листів корпусу силосної ємності майже всіх ярусів не виконується умова міцності болтового з'єднання на змінання. У зв'язку з цим трирядне розташування болтів має бути замінено на чотирирядне, навіть для тих ярусів, для яких перевірка несучої здатності формально виконується. Величині діаметра болта при цьому належить опосередкована роль, а тому як основний болт можна використовувати будь-який М10 або М12. Проте нами рекомендується використання болтів М12, якщо це не тягне за собою великих економічних витрат. Альтернативний крок – це збільшення товщини листів корпусу силосної ємності, але тоді зовсім втрачається сенс застосування сталі підвищеної міцності S550GD.

Вертикальні ребра жорсткості працюють на стиск із згином у двох площинах. Проте в кільцевому напрямі моменти, по-перше, невеликі за абсолютною величиною і, як правило, виникають при несиметричному завантаженні силосної ємності (вітрове навантаження, навантаження від

термопідвісок, нерівномірний розподіл снігового навантаження по покрівлі, позацентрове спірання стійок надсилосної галереї). По-друге, втраті стійкості ребра перешкоджають листи корпусу силосної ємності. Таким чином, вертикальне ребро жорсткості можна розглядати як позацентрово стиснутий стержень, підкріплений у площині втрати стійкості пружною основою кінцевої жорсткості. Роль пружної основи у даному випадку відіграє стінка силосної ємності (у поєднанні із сипким матеріалом), яка водночас і вигинає вертикальне ребро із своєї площини, і перешкоджає (за рахунок сумісності деформацій у місцях кріплення листів корпусу) занадто великим горизонтальним переміщенням внаслідок великої поздовжньої жорсткості. На підставі цього можна висунути допущення, що в класичному розумінні вертикальне ребро не може втратити стійкість відносно

осі  $V$ , оскільки цьому буде передувати вичерпання несучої здатності листів корпусу силосної ємності або вузлів кріплення листів корпусу до ребер.

Навантаження, яке діє на кожне вертикальне ребро, визначається на основі кінцево-елементного розрахунку силосної ємності.

Перевірку міцності вертикальних ребер жорсткості виконуємо згідно з настановами п. 10.1.1 [5] за формулою:

$$\frac{N_i}{A_n \cdot R_u \cdot \gamma_c} + \frac{M_i}{W_n \cdot R_u \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (4)$$

де  $N_i$  і  $M_i$  – зусилля у вертикальних ребрах жорсткості силоса.

Результати розрахунку у вигляді коефіцієнта використання несучої здатності (критичного фактора  $K_R$ ) подано у табл. 2.

Таблиця 2

Критичні фактори вертикальних ребер жорсткості

Ярус	$t_w$	$K_R$	Ярус	$t_w$	$K_R$
Початкові товщини ребер жорсткості			Скореговані товщини ребер жорсткості		
1	2.0	0.39	1	2.0	0.39
2	2.0	0.43	2	2.0	0.43
3	3.0	0.33	3	2.0	0.49
4	3.0	0.39	4	2.0	0.58
5	4.0	0.36	5	3.0	0.47
6	4.0	0.43	6	3.0	0.55
7	4.0	0.50	7	3.0	0.66
8	4.0	0.59	8	3.0	0.77
9	5.0	0.55	9	4.0	0.69
10	5.0	0.63	10	4.0	0.79
11	6.0	0.61	11	5.0	0.72
12	6.0	0.69	12	5.0	0.82
13	6.0	0.77	13	6.0	0.77
14	6.0	0.86	14	6.0	0.86
15	6.0	0.96	15	6.0+3.0	0.96

Із таблиці можна бачити, що критичний фактор вертикальних ребер не

набуває великих значень, за винятком ребер нижнього ярусу в зоні крайового

ефекту, для яких значення критичного фактора близькі до одиниці. Проте ребра нижнього ярусу додатково підсилюються накладкою товщиною 3 мм. Таким чином, сумарна товщина ребер становить 9 мм, що повністю задовольняє вимоги несучої здатності. Товщину ребер жорсткості інших ярусів можна зменшити до величин, вказаних у табл. 2. Поруч наведений критичний фактор, який буде відповідати скорегованим товщинам. Зменшувати товщини ребер на більшу величину (особливо середніх і верхніх ярусів, де спостерігаються помітні резерви несучої здатності) недоречно та небезпечно, оскільки це веде до суттєвого зменшення жорсткості силосної ємності у цілому.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** В результаті проведеного дослідження та виконання перевірних розрахунків силоса, виконаного зі сталі підвищеної міцності, можна зробити певні висновки.

Сталь S550GD належить не до маловуглецевих, а до конструкційних сталей з умовною границею текучості. Використання у будівництві маловуглецевих сталей із фізично наявною, а не умовною, ділянкою текучості, відповідає тому тезису, що вичерпання несучої здатності конструкції відбувається при появі пластичності і що пластичним деформаціям належить провідна роль у роботі конструкції, – несуча здатність конструкції в процесі експлуатації обмежена не міцністю її матеріалу, а деформаціями, які роблять можливим експлуатацію конструкції.

Для високоміцних сталей коефіцієнт використання матеріалу  $k_{yu} = R_y / R_u$ , який характеризується відношенням границі текучості  $R_y$  до тимчасового опору  $R_u$  (границі міцності), майже дорівнює одиниці  $k_{yu} \approx 0.98$ . Надійність конструкцій, виконаних із високоміцних сталей із таким значенням коефіцієнта  $k_{yu}$ , доволі низька. Це пояснюється тим, що, по-перше, руйнування конструкцій відбувається крихко (швидко, можна сказати, миттєво), по-друге, напружено-деформований стан конструкцій надзвичайно сильно залежить від наявності концентраторів напружень у вигляді отворів, викривлень форми елементів (у тому числі за рахунок гнуття), дефектів виготовлення, тобто будь-яких факторів, що надають конструкції форму, несприятливу для протікання силових потоків.

Товщини листів корпусу та вертикальних ребер жорсткості можна зменшити до величин, вказаних відповідно у табл. 1 та 2. Міцність цих конструкцій буде забезпеченою. Проте слід пам'ятати, що, по-перше, несуча здатність листів корпусу надзвичайно чутлива до зміни товщини навіть на 0.5 мм, по-друге – зменшення товщин вертикальних ребер жорсткості менше величин, вказаних у табл. 2 (навіть при порівняно високих показниках критичного фактора), призводить до суттєвого погіршення жорсткісних характеристик силоса.

На підставі наведеного можна сформулювати резюме: нами не рекомендується застосування сталі підвищеної міцності S550GD для несучих конструкцій силосних ємностей.

### *Список використаних джерел*

1. Банніков, Д. О. Вертикальні жорсткі сталеві ємності: сучасні концепції формоутворення [Текст] / Д. О. Банніков. – Дніпропетровськ: Моноліт, 2009. – 186 с.
2. Ding S. Prediction of flow patterns during silo discharges using a finite element approach and its preliminary experimental verification / S. Ding, H. Li, Y. Ooi, J.M. Rotter. – Particuology. - 2015. – Vol. 18. – P. 42-49.

3. Rotter J.M. Flow and pressures in silo structural integrity assessments / J.M. Rotter. – Proceedings of the International Symposium: Reliable Flow of Particulate Solids III, Porsgrunn, Norway. – 1999. – P. 281–292.

4. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]: ДБН В.1.2-14:2009. – [Чинний від 2009-12-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).

5. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст]: ДБН В.2.6-198:2014. – [Чинний від 2015-01-01]. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).

6. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]: ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К. : Мінрегіон України, 2006. – 78 с. – (Державні будівельні норми України).

7. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна [Текст]: ДБН В.2.2-8-98. – [Чинний від 1998-07-01]. – К. : Держбуд України, 1998. – 41 с. – (Державні будівельні норми України).

8. Конструкції сталеві будівельні. Вимоги до виготовлення [Текст]: ДСТУ Б В.2.6-199:2014. – [Чинний від 2015-07-01]. – К. : Мінрегіон України, 2015. – 59 с. – (Національний стандарт України).

9. Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу [Текст]: ДСТУ Б В.2.6-200:2014. – [Чинний від 2015-07-01]. – К. : Мінрегіон України, 2015. – 46 с. – (Національний стандарт України).

10. Сталі. Визначення й класифікація [Текст]: ДСТУ EN 10020:2000. – [Чинний від 2009-04-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – 10 с. – (Національний стандарт України).

11. Вироби плоскі сталеві з покриттям, нанесеним методом безперервного гарячого занурювання [Текст]: ДСТУ EN 10346:2014. – [Чинний від 2015-04-01]. – К.: Мінекономрозвитку України, 2015. – 24 с. – (Національний стандарт України).

12. Металоконструкції силосу діаметром 22.0 м типу МСВУ 220.15.В12 із галереєю ГН 220, що спирається на силос [Текст]: технічна документація. – Лубни, 2017. – 207 с.

---

Лапенко Олександр Іванович, д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету. Тел.: (066) 200-67-27. E-mail: my-partner@ukr.net.

Махінко Антон Володимирович, д-р техн. наук, будівельна компанія «Етуаль». Тел.: (050)327-27-85. E-mail: pasargada1981@gmail.com.

Махінко Наталія Олександрівна, канд. техн. наук, кафедра комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету. Тел.: (050)304-50-72. E-mail: pasargada1985@gmail.com.

Lapenko Alexandr, Doct. of techn. sciences, Department of Computer Technology Building, National Aviation University. Tel.: (066)200-67-27. E-mail: my-partner@ukr.net.

Makhinko Anton, Doct. of techn. sciences, Construction Company "Etual". Tel.: (050)327-27-85. E-mail: pasargada1981@gmail.com.

Makhinko Natalia, Ph.D. in Engineering, Department of Computer Technology Building, National Aviation University. Tel.: (050)304-50-72. E-mail: pasargada1985@gmail.com.

Стаття прийнята 21.06.2017 р.

УДК 625.033.373

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ ШЛИФОВАНИЕМ**

Асп. Н. Р. Огульчанская

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК  
ШЛІФУВАННЯМ**

Асп. Н. Р. Огульчанська

**IMPROVING THE QUALITY OF MECHANICAL PROCESSING OF RAIL RAILS BY  
GRIND PROCESS**

Postgraduate N. R. Ogul'chanskaya

*В статье рассмотрен процесс восстановления геометрии железнодорожного рельсового полотна посредством шлифования. Отмечено, что периодическая корректировка профиля головки рельса шлифованием позволяет обеспечить наилучший контакт колеса с рельсом и тем самым продлить его эксплуатационный ресурс до 20 %. Определено, что на эксплуатационные свойства головки рельса влияет комплекс факторов процесса шлифования. Предложено в качестве шлифовального использовать керамический инновационный материал с высокими физико-механическими свойствами.*

**Ключевые слова:** железнодорожные рельсы, шлифование, эксплуатационные свойства, керамический материал, физико-механические свойства.

*У статті розглянуто процес відновлення геометрії залізничного рейкового полотна за допомогою шліфування. Відзначено, що періодичне коригування профілю головки рейки шліфуванням дозволяє забезпечити найкращий контакт колеса з рейкою і тим самим продовжити його експлуатаційний ресурс до 20 %. Визначено, що на експлуатаційні властивості головки рейки впливає комплекс чинників процесу шліфування. Запропоновано як шліфувальний використовувати керамічний інноваційний матеріал з високими фізико-механічними властивостями.*

**Ключові слова:** залізничні рейки, шліфування, експлуатаційні властивості, керамічний матеріал, фізико-механічні властивості.

*The article deals with the process of restoring the geometry of a rail track by grind process. It is noted that the periodic correction of the profile of the rail head by grind process makes it possible to ensure the best contact of the wheel with the rail and thereby prolong its service life by up to 20%. In addition, the costs for the maintenance and repair of rolling stock are reduced and the service life is extended by reducing the fatigue of parts and machine component.*

*It is determined that the operational properties of the rail head are influenced by a complex of factors of the grind process. It is proposed to use as grind process the ceramic innovative material with high physical and mechanical properties. The application of this material as a grind process will improve the quality of the processing of the rail head, reduce the surface roughness, and provide increased heat removal from the «circle – rail» contact zone.*

**Keywords:** railway rails, grind process, operational properties, ceramic material, physical and mechanical properties.

**Введение.** Наиболее дорогостоящим и ответственным элементом железнодорожного пути, состояние которого в первую очередь определяет бесперебойное и надежное движение поездов, являются рельсы. Для поддержания рельсового хозяйства в исправном состоянии ежегодно требуется тысячи тонн новых рельсов. В современных условиях эксплуатации железных дорог с ростом скоростей движения и грузонапряженности потребность в новых рельсах с каждым годом только возрастает, поэтому задача продления жизненного цикла рельсов имеет огромное значение для путевого хозяйства в частности и для железнодорожной отрасли в целом [1-2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В процессе эксплуатации железнодорожного рельсового пути на поверхности катания головки рельсов образуются различные дефекты. Особое внимание необходимо обратить на появление неравномерного (волнообразного) износа рельсов. С увеличением глубины волнообразного износа и с уменьшением длины волны (при постоянной глубине износа) прямо пропорционально растёт нагрузка от колеса на рельс. Возникает необходимость предупреждения и уменьшения такого износа [2-4]. Проблеме, связанной с образованием волнообразного износа на поверхности катания рельсов и поиском методов его устранения, посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых: Альбрехта В. Г., Гойхмана Л. В., Зоткина Г. В., Кулагина М. И., Шестопалова В. И., Алиа И., Вернера К., Грасси С., Джонсона К. Л., Каэсса Г., Кноте К., Креттек О., Наяк П. Р. и многих других.

Для предупреждения развития обозначенного дефекта в первую очередь повышают качество изготовления рельсов и качество ремонта рельсового полотна. Перспективным направлением ремонта рельсов, в частности для устранения волнообразного износа, механических

повреждений, смятия и отслоения металла, является технология шлифования рельсов с применением новых шлифовальных материалов рельсошлифовальных поездов, позволяющая производить механическую обработку головки рельсов без их демонтажа в условиях железнодорожного пути.

**Определение цели и задачи статьи.** Целью статьи является обоснование применения инновационного керамического шлифовального материала с высокими физико-механическими свойствами для повышения качества механической обработки железнодорожных рельсов в процессе ремонта.

**Основная часть исследований.** Известно, что одной из главных целей шлифования рельсового полотна является формирование поперечного профиля рельсов. Периодическая корректировка профиля шлифованием позволяет обеспечить наилучший контакт колеса с рельсом, равномерно распределить внутренние напряжения по поверхности рельса и тем самым продлить его эксплуатационный ресурс до 20 %.

В результате удаления поверхностных дефектов снижаются вертикальные динамические силы, шум и вибрации, увеличивается срок службы рельсов, рельсовых скреплений и шпал, происходит существенное удлинение цикла выправки пути в плане и профиле. Кроме этого, уменьшаются расходы на содержание и ремонты подвижного состава и увеличиваются сроки его службы благодаря уменьшению усталости деталей и узлов [5].

Профильное шлифование рельсов при ремонте и эксплуатации железнодорожного пути решает следующие задачи [2]:

– шлифование новых рельсов предполагает удаление окалины, обезуглероженного слоя металла и заводских геометрических неровностей до соответствующего уровня, определяющего требования в соответствии с определенными

условиями эксплуатации рельсов на данном участке пути;

– профильное шлифование рельсов с эксплуатационной наработкой до 150 млн т брутто. Данный вид шлифования осуществляется для формирования ремонтного геометрического профиля головки рельса, ликвидации продольных неровностей и волнообразного износа либо их уменьшения до норм, устанавливаемых для определенных участков пути;

– профильное шлифование рельсов с эксплуатационной наработкой свыше 150 млн т брутто. Осуществляется для формирования формы рабочей выкружки головки рельса, предотвращения появления в рельсах дефектов контактно-усталостного характера.

На сегодняшний день на отечественной железной дороге эксплуатируются рельсошлифовальные поезда различных типов: РШП-48, РШП-48К, «Speno» (URR-48, URR-112) и др. Принципиальное отличие всех марок поездов, независимо от производителя, состоит в количестве шлифовальных головок, которое указывается в маркировке поезда.

В процессе обработки рельсов шлифовальные головки рельсошлифовальных поездов устанавливаются на различные углы в плоскости, перпендикулярной оси рельса (см. рисунок). Т.е. каждый шлифовальный круг, обрабатывая поверхность головки рельса, формирует дорожку шлифования, создавая при этом поперечный профиль головки рельса.

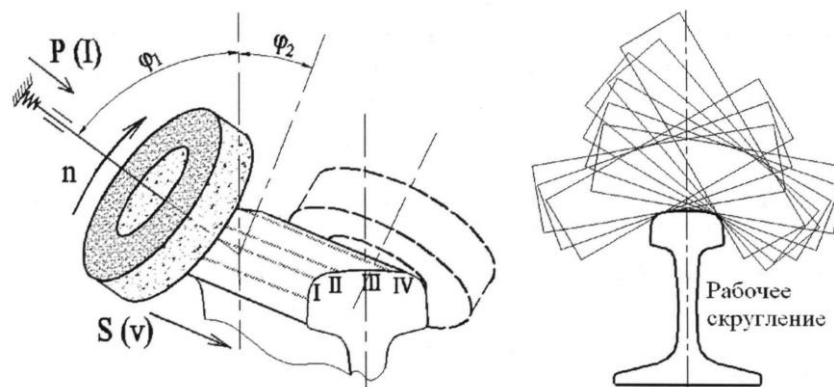


Рис. Схема наклона шлифовальных кругов при формообразовании поперечного профиля рельса

В качестве абразивного инструмента для шлифования рельсов на рельсошлифовальных поездах применяют шлифовальные круги формы ПП с размерами 250x150x75 мм. Учитывая жесткие режимы работы, а также высокую вероятность удара в зоне контакта шлифовального круга с рельсовым стыком, для предотвращения разрушения абразивного инструмента и вылета осколков, все круги, поставляемые на рельсошлифовальные поезда, укрепляются специальным приспособлением – ровингом из стеклонити.

Система взаимодействия «круг – рельс» применительно к пути с позиций металлообработки представляет собой обдирочное шлифование с высокими скоростями и усилиями. Исходя из конструкции рельсошлифовального блока, можно сделать вывод, что на рельсошлифовальных поездах, работающих по методу «Speno», реализована схема плоского шлифования торцом круга, которая применяется при шлифовании на станках в стационарных условиях. При этом основное отличие составляет упругая

подвеска привода шлифовальной головки через пневмоцилиндр.

Применение данной схемы преследует цель обработки рельса плоской поверхностью абразивного инструмента для обеспечения наибольшего числа контактов зерен с обрабатываемой поверхностью, тем самым повышая производительность операции и одновременно качества обработки.

Многие исследователи, при изучении процесса торцевого шлифования, отмечают принципиальные отличия этого процесса от других видов шлифования: большая площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью; большая глубина шлифования; длительный непрерывный контакт обрабатываемой поверхности со шлифовальным кругом; непостоянство скорости резания, которая изменяется от центра шлифовального круга к периферии; неблагоприятные взаимодействия, ухудшающие условия теплоотвода в зоне контакта обрабатываемой поверхности с кругом.

Из вышеизложенного следует, что высокая интенсивность и теплонапряженность процесса шлифования плоскостей торцом круга являются основными отличительными признаками торцевого шлифования.

Наряду со схожестью схем шлифования рельсов в пути и шлифования чашечными кругами в стационарных условиях на станках существуют принципиальные отличия, вносящие существенные изменения в процесс обработки рельсов и влияющие на качество выполняемых работ: в зависимости от угла наклона шлифовальной головки значительно различаются условия резания каждого отдельно работающего круга; существенные различия в работу абразивного инструмента вносят значительные изменения физико-механических свойств рельсов (в процессе эксплуатации в пути значительно изменяются свойства по сечению головки рельса).

Таким образом, указанные отличия приводят не только к различной производительности и неодинаковому износу шлифовальных кругов, но и разному качеству обработанной поверхности, которое в дальнейшем будет характеризовать различные эксплуатационные свойства определенных участков головки рельса.

Одним из способов повышения эффективности процесса шлифования рельс является применение инновационного керамического материала для шлифовальных кругов [6-8]. Такой материал обладает высокими физико-механическими свойствами, среди которых: предел прочности на изгиб – 500-800 МПа, трещиностойкость – 5-6 МПа·м<sup>1/2</sup>; твердость – 91-93 HRA; коэффициент теплопроводности – 25-30 Вт/м·К; граничная температура – 1800 °С.

Применение данного материала в качестве шлифовального позволит повысить качество обработки головки рельса, снизить шероховатость поверхности, обеспечить повышенный теплоотвод из зоны контакта «круг – рельс», все это в комплексе позволит получать более стабильные физико-механические характеристики и качественную микрогеометрию обрабатываемой поверхности. Также новый шлифовальный материал обладает высокой износостойкостью, что повышает его экономическую эффективность в сравнении с быстроизнашиваемыми материалами, применяемыми в настоящее время [7].

**Выводы из исследований и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** Точность создания рабочего профиля железнодорожного рельса шлифованием определяет контакт колеса с рельсом, равномерность распределения внутренних напряжений по поверхности рельса и тем самым определяет его эксплуатационный ресурс. Эффективность процесса шлифования определяется получением требуемой точности обрабатываемой поверхности и



качества поверхностного слоя при максимальной производительности труда и минимальном расходе абразивного инструмента.

Как известно, геометрические параметры качества поверхности в основном определяются шероховатостью обработанной поверхности. В свою очередь шероховатость оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства обработанной поверхности рельса.

Повышение качества микрогеометрии поверхности головки рельса путем снижения ее шероховатости возможно посредством применения инновационного керамического материала для шлифовальных кругов. Такой материал обладает высокими физико-механическими свойствами, что позволит повысить эффективность процесса шлифования рельс и увеличить их эксплуатационный ресурс.

### *Список использованных источников*

1. Тимофеева, Л. А. Причины возникновения волнообразного износа поверхности катания рельс железнодорожного пути и методы его устранения [Текст] / Л. А. Тимофеева, Н. Р. Огульчанская // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: наук.-техн. журнал. – 2015. – № 3. – С. 56-58.
2. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. — М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
3. Крысанов, Л. Г. Эффективность профильной обработки рельсов [Текст] / Л. Г. Крысанов // Путь и путевое хозяйство. – 1996. – № 12. – С. 2-6.
4. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України [Текст]: ЦП-0269. – К. : Укрзалізниця, 2012. – 456 с.
5. Опыт применения рельсошлифовальных поездов с активными рабочими органами на отечественных железных дорогах [Текст] // В. Г. Альбрехт, А. П. Галунин, Л. Г. Крысанов [и др.] // Железнодорожный транспорт. Сер. Путь и путевое хозяйство: ЭИ ЦНИИТЭИ МПС. – 1995. – Вып. 3. – С. 12–18.
6. Тимофеева, Л. А. Перспективи створення композиційних матеріалів на основі нанопорошків оксиду алюмінію та цирконію [Текст] / Л. А. Тимофеева, Е. С. Геворкян, О. М. Мельник // Инженерия поверхности и реновация изделий: 12-я Междунар. науч.-техн. конф., 04-08 июня 2012 г.: текст докл. – Ялта, 2012. – К.: АТМ України, 2012. – С. 292-294.
7. Semchenko, G. Consolidated nanocomposite materials with the defined properties [Text] / G. Semchenko, E. Gevorkyan // Advances in Science and Technology. – 2014. – Vol. 91. – P. 24–31.
8. Mondal, B. Zirconia toughened alumina for wear resistant engineering and machinability of steel application [Text] / B. Mondal // Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional and Bioceramics. – 2005. – Vol. 104. – Issue 5. – P. 256–260.

---

Огульчанська Надія Романівна, аспірант кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-49. E-mail: mtv@kart.edu.ua.

Ogul'chanskaya Nadezhda, postgraduate dep. «Quality, standardization, certification and production technology of materials», Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-49. E-mail: mtv@kart.edu.ua.

Стаття прийнята 23.06.2017 р.

УДК 624.012.35:624.072.221

**ИНЖЕНЕРНИ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧНИХ СТЕРЖНЕВИХ СИСТЕМ**

Канд. техн. наук Д. В. Кочкаръов (НУВГП)

**ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ**

Канд. техн. наук Д. В. Кочкарёв (НУВХП)

**ENGINEERING METHODS FOR CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STATICALLY UNDEFINED ROD SYSTEMS**

Phd. tehn. D. V. Kochkarev

*Запропоновано методи розрахунку статично невизначних стержневих систем з урахуванням нелінійної роботи матеріалів та тріщин. Метод дискретного врахування жорсткості дозволяє розраховувати складні статично невизначні системи за деформованою схемою з урахуванням нелінійних діаграм деформування матеріалів. Ще дві методики базуються на методі розрахункових опорів залізобетону. Вони дають можливість проводити інженерні розрахунки статично невизначних систем за допомогою попередньо розроблених таблиць.*

**Ключові слова:** жорсткість, прогини, кривизна, стержнева система, балка, рама.

*Предложены методы расчета статически неопределимых стержневых систем с учетом нелинейной работы материалов и трещин. Метод дискретного учета жесткости позволяет рассчитывать сложные статически неопределимые системы по деформированной схеме с учетом нелинейных диаграмм деформирования материалов. Еще две методики базируются на методе расчетных сопротивлений железобетона. Они дают возможность проводить инженерные расчеты статически неопределимых систем с помощью предварительно разработанных таблиц.*

**Ключевые слова:** жесткость, прогибы, кривизна, стержневая система, балка, рама.

*Methods are proposed for calculating statically indeterminate rod systems, taking into account the nonlinear work of materials and taking into account cracks. The method of discrete registration of the stiffness of sections of reinforced concrete elements makes it possible to calculate complex statically indeterminate systems using a deformed scheme, taking into account the nonlinear diagrams of material deformation. The use of this method involves obtaining a "bending moment-curvature" relationship. On the basis of the obtained dependence, the stiffness of the sections of the elements of the rod systems is determined. This method allows us to calculate nonlinear rod systems, using software complexes designed for the calculation of elastic systems. Two more methods are based on the method of design resistances of reinforced concrete. They make it possible to carry out engineering calculations of statically indeterminate systems using predefined tables. The rigidity refinement method allows determining the curvature of the cross sections using the previously calculated table parameters of the stress-strain state. The method of linearization of stiffness parameters allows determining the deflections of reinforced concrete elements, for various statically determinate circuits. A statically indeterminate system can be*

*partitioned into simple statically determinate circuits, having previously determined the cross sections along the length of elements with zero bending moments. Thus, the calculation will be reduced to determining the parameters of the stress-strain state of several simple schemes.*

**Key words:** rigidity, deflections, curvature, rod system, beam, frame.

**Вступ.** Проектування залізобетонних будівель та споруд передбачає розрахунок їх каркасів. Сучасні методи розрахунку залізобетонних каркасів повинні враховувати особливості нелінійного деформування залізобетону, наявності та розкриття тріщин, а також можливий перерозподіл зусиль в їх елементах. Нелінійне деформування матеріалів та тріщини, які утворюються при експлуатаційних навантаженнях, можуть призводити до суттєвих змін у епюрах внутрішніх зусиль. Це позначається на прогинах основних елементів таких каркасів і може призводити до суттєвого погіршення їх експлуатаційних якостей. Тому встановлення дійсних силових та деформаційних параметрів статично невизначних стержневих систем є доволі актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню статично невизначних систем присвятили свої роботи чимало вчених [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 та ін.]. У багатьох роботах вказується на необхідність врахування нелінійності роботи матеріалів при визначенні зусиль в елементах стержневих систем. Вчені [4, 5] вказують на допустимість зменшення опорних моментів в межах 30 % і перерозподіл їх в проліт. При цьому необхідно обмежувати ширину розкриття тріщин на опорі. Переважна більшість запропонованих методик при описанні параметрів жорсткості нехтує розтягнутою зоною бетону між тріщинами. Це може призводити до значного завищення прогинів елементів. Це зумовлює необхідність удосконалення сучасних методів розрахунку статично невизначних елементів.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Основна мета полягає у розгляді методів розрахунку статично невизначних

стержневих систем з урахуванням нелінійного деформування матеріалів.

**Результати досліджень.** Пропонується розглянути такі методи розрахунку статично невизначних стержневих систем:

- дискретного врахування жорсткості;
- уточнення жорсткості;
- лінеаризації параметрів жорсткості.

Метод дискретного врахування жорсткості дозволяє виконувати розрахунки статично невизначних елементів за допомогою програмних комплексів, призначених для розрахунку пружних систем. Розрахунок даним методом виконується, використовуючи жорсткість за відповідного виду деформування. У більшості інженерних задач поздовжніми деформаціями залізобетонних елементів можна знехтувати, тому можна розглядати лише згинальну жорсткість, тобто жорсткість за дії згинального моменту.

Жорсткість при згині для залізобетонних елементів будемо визначати за виразом

$$D_i = \frac{M_i}{1/r_{mi}}, \quad (1)$$

де  $D_i$  – згинальна жорсткість;  $M_i$  – згинальний момент у відповідному перерізі по довжині залізобетонного елемента;  $1/r_{mi}$  – середня кривизна на певній ділянці до відповідного перерізу.

Даної жорсткості цілком достатньо для розрахунку більшості балочних статично невизначних систем. Але для елементів статично невизначних рамних, арочних та інших систем згин може бути утворений дією поздовжньої сили, прикладеної з певним ексцентриситетом.

Це призводить до необхідності введення згинальної жорсткості при позацентровому стиску.

Згинальну жорсткість за позацентрового стиску для залізобетонних елементів будемо визначати за формулою

$$D_i = \frac{N_i e_i}{1/r_{mi}}, \quad (2)$$

де  $N_i$  – поздовжня сила у відповідному перерізі,  $e_i$  – ексцентриситет прикладення поздовжньої сили до фізичної осі елемента. Ексцентриситет повинен прийматися з урахуванням прогину та випадкового ексцентриситету.

За необхідності врахування поздовжніх деформацій залізобетонних елементів відповідну жорсткість необхідно визначати за виразом

$$D_i = \frac{N_i}{\varepsilon_{mi}}, \quad (3)$$

$\varepsilon_{mi}$  – середні деформації стиснутої зони бетону на певній ділянці до відповідного перерізу.

Визначення жорсткості ділянок залізобетонних елементів здійснюють за усередненою кривизною, яка може бути визначена для середнього перерізу декількома способами. Перший полягає у визначенні цієї кривизни шляхом введення до деформацій бетону та арматури відповідних коефіцієнтів. Другий спосіб дозволяє встановлювати середню кривизну безпосередньо із рівнянь рівноваги, в яких опосередковано враховується робота розтягнутого бетону між тріщинами. Найбільш точний спосіб полягає у розгляді окремо перерізів із тріщинами та без них, що дає змогу отримати дійсну епюру кривизни перерізів залізобетонних елементів. Після цього виконується усереднення кривизни за довжиною елемента. Даний спосіб, натомість, є

найбільш трудомістким, він вимагає попереднього розрахунку за більш простими методиками.

Таким чином, використання методу дискретного врахування жорсткості передбачає отримання діаграм стану перерізів  $M-I/r$  або  $Ne-I/r$  перед початком ітераційного розрахунку. Такі діаграми повинні бути встановлені для кожного розрахункового перерізу, що дасть змогу визначити їх згинальну жорсткість за виразами (1), (2), яка і буде використовуватись у розрахунках статично невизначних залізобетонних систем.

Сформулюємо загальну схему розрахунку статично невизначних систем при визначенні їх несучої здатності за методом дискретного врахування жорсткості:

1. Складаємо розрахункову схему, встановлюємо місця та значення навантажень.

2. Розбиваємо елемент на певну кількість однакових ділянок. За розрахункові перерізи приймаємо початок, кінець та середину даних ділянок. Параметри міцності будемо встановлювати за кінцями ділянок, параметри жорсткості за середніми перерізами ділянок. На рис. 1 точками позначені перерізи, в яких буде встановлюватись жорсткість і прийматись постійною в межах даної ділянки.

3. Розраховуємо статично невизначну систему за певного навантаження одним із методів будівельної механіки, попередньо прийнявши жорсткість залізобетонних елементів, як для пружних систем. На даному етапі не варто враховувати вплив арматури у зв'язку з тим, що значення жорсткості буде на кожному кроці уточнюватись. А тому на даному етапі згинальну жорсткість можна визначити за формулою

$$EI = E_c \frac{bh^3}{12}. \quad (4)$$

4. Встановлюємо перерізи залізобетонних елементів із різним армуванням.

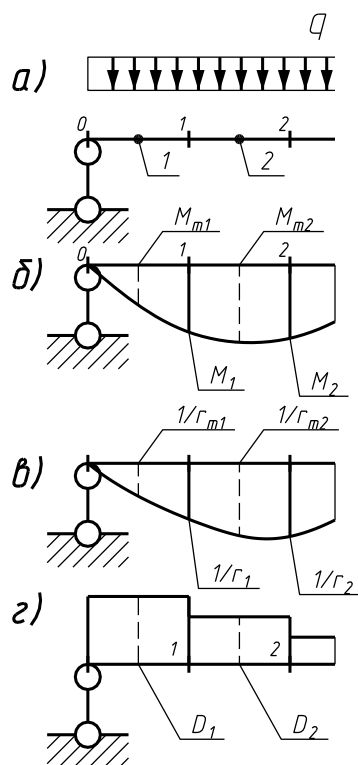


Рис. 1. До розрахунку методом дискретного врахування жорсткості:  
 а – розрахункова схема; б – епюра моментів; в – епюра кривизни; г – епюра жорсткості

5. Визначаємо для кожного встановленого перерізу діаграму стану  $M-l/r$  або  $Ne-l/r$  відповідно до діючих зусиль.

6. Для відповідного середнього перерізу за діаграмою стану при відомому згинальному моменті визначаємо кривизну.

7. Уточнюємо жорсткість на кожній розрахунковій ділянці шляхом використання формул (1), (2).

8. Виконуємо розрахунок пружної системи із уточненими значеннями жорсткості.

9. Визначаємо похибку в різниці згинальних моментів попередньої схеми із схемою з уточненою жорсткістю. Пункти 6, 7, 8 виконуємо до отримання необхідної точності розрахунку.

10. Для отримання несучої здатності статично невизначних систем необхідно знайти таке максимальне значення зовнішнього навантаження, за якого для всіх перерізів можна отримати розв'язок. Дану умову можна трактувати, як свого

роду екстремальний критерій для статично невизначних систем.

Наступні два методи ґрунтуються на методі розрахункових опорів залізобетону [3].

Кривизну перерізів пропонується визначати за виразом

$$1/r = \frac{\Sigma \varepsilon}{d}, \quad (5)$$

де  $\Sigma \varepsilon$  – сумарні відносні деформації стиснутої грані бетону та розтягнутої арматури;  $d$  – робоча висота перерізу.

Значення сумарних деформацій знаходиться у функціональній залежності з напругами у перерізі залізобетону  $\Sigma \varepsilon = f(\sigma_{zM})$ , які визначаються за формулою

$$\sigma_{zM} = \frac{M}{W_c}, \quad (6)$$

в якій  $M$  – згинальний момент у перерізі;  $W_c$  – пружний момент опору бетону робочого перерізу,  $W_c = bd^2/6$ .

Таким чином, визначивши зусилля в елементах стержневих систем, необхідно виконати їх уточнення за допомогою кривизни, визначеної за виразом (5).

З незначною похибкою, яку можна допустити в інженерних розрахунках, можна рекомендувати інший спосіб обчислення прогинів. Він оснований на лінеаризації параметрів, які у методі розрахункових опорів залізобетону описують кривизну перерізів елемента і виражають її у вигляді параметричної функції

$$\frac{l}{r} = \frac{M}{b_i W_c d} - \frac{a}{b_i d}, \quad (7)$$

де  $M$  – момент від відповідного навантаження;  $W_c$  – момент опору робочого перерізу бетону;  $a$ ,  $b_i$  – параметричні коефіцієнти лінеаризації, які залежать від класу бетону та процента армування перерізу, МПа;  $d$  – робоча висота перерізу.

Виконавши інтегрування за формулою (7), отримали формулу для визначення прогинів

$$f_k = f_{el,k} - A_M \frac{a}{b_i d}, \quad (8)$$

де  $f_{el,k}$  – прогин елемента за класичною формулою для елементів із пружних матеріалів із заміною жорсткості  $EI$  на  $b_i W_c d$ ;  $A_M$  – площа епюри моментів від одиничної сили, прикладеної у точці балки, для якої визначають прогин.

На основі виразу (8) складена таблиця формул для обчислення прогинів балок найбільш поширених розрахункових схем [3]. Якщо на балку діють декілька силових впливів  $F_1, F_2 \dots F_n$ , то повний прогин буде обчислюватись за формулою

$$f_k = \sum_{i=1}^n f_{el,i} - A_M \frac{a}{b_i d}, \quad (9)$$

де  $n$  – кількість силових впливів.

Слід відмітити, що описана методика визначення прогинів стосується елементів, у яких епюра моментів одного знаку. Коли ж в елементі епюра моментів різних знаків, для визначення прогину елемент слід розділити на частини з моментами одного знаку, обчислити прогини кожного із них і скласти прогин цілого елемента. Наприклад, розглянемо ригель рами, який сприймає рівномірно розподілене навантаження (рис. 2).

В ньому виникає епюра моментів двох знаків. По місцях нульових моментів розділимо ригель на три частини. Середню частину (елемент 1) розглянемо як балку на двох опорах, завантажену розподіленим навантаженням, та обчислимо її прогин  $f_1$ . Крайні частини (елементи 2 і 3) являють консольні балки, завантажені рівномірним навантаженням і зосередженою силою на кінці, що є реакцією елемента 1. Визначаємо прогин елементів 2 і 3 за формулою (9). Тоді повний прогин ригеля можна визначити за виразом

$$f = f_1 + \frac{f_2 + f_3}{2}. \quad (10)$$

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Запропоновані сучасні методи розрахунку статично невизначених стержневих систем з урахуванням нелінійного деформування матеріалів. Метод дискретного врахування жорсткості дозволяє проводити нелінійні розрахунки складних статично невизначених стержневих систем за деформованою схемою з врахуванням діаграм деформування матеріалів. Є можливість встановлення як міцності окремих перерізів, так і стійкості елементів стержневих систем в цілому. Ще два розглянуті методи –

уточнення жорсткості та лінеаризації параметрів жорсткості ґрунтуються на методі розрахункових опорів залізобетону та дають можливість виконувати інженерні розрахунки статично невизначних систем у

нелінійній постановці. У подальшому планується поширити запропоновані методи до розрахунку статично невизначних стержневих систем на режимні навантаження: тривалі та динамічні.

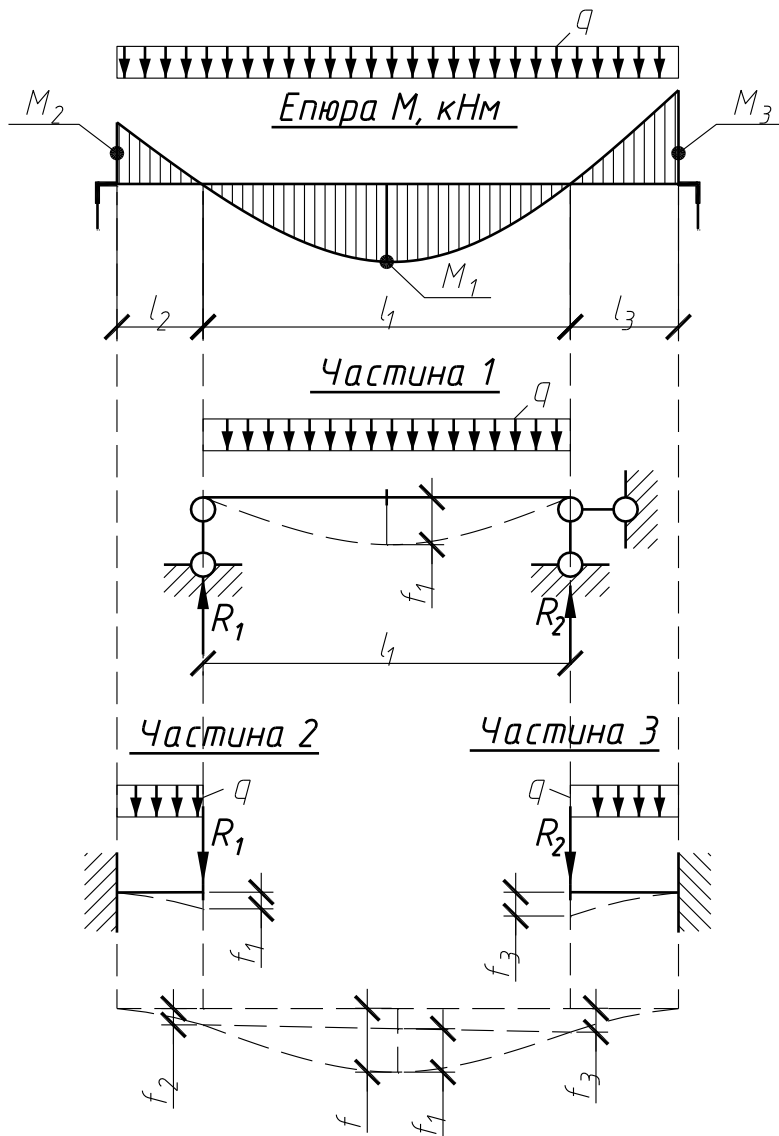


Рис. 2. До визначення прогину елемента з двозначною епюрою моментів

### Список використаних джерел

1. Бабич, Є. М. Робота і розрахунок рам при дії повторних навантажень [Текст]: монографія / Є. М. Бабич, С. В. Філіпчук, Н. І. Ільчук. – Рівне: НУВГП, 2012. – 176 с.
2. О необходимости и постановке системных исследований прочности, трещиностойкости и деформативности приопорных участков железобетонных элементов, испытывающих сложные деформации с целью уточнения и развития методов их расчета [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская [и др.] // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДБІК, 2005. – Вип. 62. – С.160-167.

3. Кочкар'юв, Д. В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам [Текст]: монографія / Д. В. Кочкар'юв. – Рівне: О. Зень, 2015. – 384 с.
4. Крылов, С. М. Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях [Текст] / С. М. Крылов. – М: Госстройиздат, 1964. – 121 с.
5. Маилян, Л. Р. Приближенный метод расчета неразрезных балок с учетом перераспределения усилий [Текст] / Л. Р. Маилян // Бетон и железобетон. – 1983. – №8. – С. 35-36.
6. Масюк, Г. Х. Експериментальні дослідження перерозподілу зусиль у двопролітних нерозрізних залізобетонних балках при повторних навантаженнях [Текст] / Г. Х. Масюк, В. Є. Бабич // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. – Рівне: УДУВГП, 2002. – Вип. 4(17). – С.165-173.
7. Шмуклер, В. С. Каркасные системы облегченного типа [Текст] / В. С. Шмуклер, Ю. А. Климов, Н. П. Буряк. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.
8. MacGregor, J.G. Reinforced Concrete : mechanics and design [Electronic resource] / James G. MacGregor, James K. Wight. – New Jersey : Upper Saddle River, 2005. – 1132 p.
9. McCormac James C. Design of Reinforced Concrete. / James C. McCormac, James K. Nelson. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. – 725 p.

---

Кочкар'юв Дмитро Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри міського будівництва та господарства Національного університету водного господарства та природокористування. Тел.: (066) 25-706-84. E-mail: dim7@ukr.net.

Kochkarev Dmitry, PhD. Sc. Associate Professor, Department Urban building and development, National University of Water and Environmental Engineering. Tel.: (066) 25-706-84. E-mail: dim7@ukr.net.

Стаття прийнята 23.06.2017 р.

**УДК 691.678.544**

**ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ МАЛИХ ДОМШОК ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ ТА КРЕМНІЙОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН НА ПРОЦЕСИ ТВЕРДІННЯ ЕПОКСИАМІННИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ**

**Инж. О. С. Барабаш, кандидати техн. наук Ю. В. Попов, Ю. М. Данченко (ХНУБА)**

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ДОБАВОК ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ И КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОЦЕССЫ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИАМИННЫХ СВЯЗУЮЩИХ**

**Инж. Е. С. Барабаш, кандидаты техн. наук Ю. В. Попов, Ю. М. Данченко (ХНУСА)**

**STUDY OF INFLUENCE OF SMALL ADDITIVES OF SURFACTANTS AND ORGANOSILICON COMPOUNDS ON CURING PROCESSES OF EPOXYAMINE BINDERS**

**O. S. Barabash, phd. tehn. Yu. V. Popov, Yu. M. Danchenko**

*Проведено комп'ютерне моделювання взаємодії модифікуючих добавок з твердником, результати якого дають зрозуміти, яким чином хімічна природа поверхнево-активних речовин і кремнійорганічних сполук впливає на процес твердіння епоксидного олігомеру. Установлено, що в залежності від кислотно-основних властивостей ПАР вони здатні прискорювати чи уповільнювати процес перебігу реакції твердіння.*



**Ключові слова:** епоксидні зв'язуючі, поверхнево-активні речовини, кремнійорганічні сполуки, міжмолекулярні взаємодії, твердіння.

*Проведено компьютерное моделирование взаимодействия модифицирующих добавок с отвердителем, результаты которого дают понять, каким образом химическая природа поверхностно-активных веществ и кремнийорганических соединений влияет на процесс отверждения эпоксидного олигомера. Установлено, что в зависимости от кислотно-основных свойств ПАВ они способны ускорять или замедлять процесс течения реакции отверждения.*

**Ключевые слова:** эпоксидные связующие, поверхностно-активные вещества, кремнийорганические соединения, межмолекулярные связи, отверждение.

*Specificity of processing of epoxy oligomers is a combination of curing and manufacturing processes. Therefore, it is extremely important to know the kinetics of the oligomer-polymer transition to create optimal technological curing regimes and to produce polymer epoxy with the specific properties. For this purpose a computer simulation of the interaction of modifying additives with a hardener has been conducted. The obtained data indicate that the speed of the process of structuring epoxy compositions at the initial stage depends on the chemical structure, the level of their intermolecular interaction with ED-20 and amine hardeners. It has been found that, depending on the acid-base properties of the surfactant, they are capable of accelerating or slowing down the flow of the curing reaction.*

**Keywords:** epoxy binders, surfactants, organosilicon compounds, intermolecular interaction, curing.

**Вступ.** При використанні в будівництві епоксидних полімерних композиційних матеріалів у вигляді захисних покриттів, клеїв, заливних і просочувальних компаундів, волокнисто-армованих пластиків та інших функціональних матеріалів значну роль відіграє можливість управляти технологічними властивостями епоксидних полімерних матриць і композитів. Специфіка переробки епоксидних олігомерів (зокрема при отриманні захисних покриттів) полягає в поєднанні процесів затвердіння і виготовлення виробів. Тому при їх переробці надзвичайно важливо знати кінетику переходу олігомер-полімер, так як без цього неможливе раціональне управління процесом нанесення покриттів на субстрат, створення оптимальних технологічних режимів затвердіння й отримання покриттів із заданими властивостями [1].

**Аналіз останніх досліджень.** Відомо, що поліетиленполіамін взаємодіє з кінцевими епоксидними групами за

рахунок міграції рухомих атомів водню аміногруп [2]. В епоксиамінних композиціях відбуваються перетворення, які переводять епоксидні олігомери в полімери зі зшитою структурою за рахунок взаємодії між епоксидними й аміногрупами. Для пришвидшення реакції зшивання, для рівномірності її перебігу при низьких температурах використовують різноманітні добавки, а саме: поверхнево-активні речовини (ПАР) [3-5] і кремнійорганічні сполуки (КОС) [6-8], які не вбудовуються в структуру кінцевого полімеру і залишаються в матеріалі в низькомолекулярному вигляді [9,10]. Використання таких добавок може істотно впливати на значення ефективної енергії активації.

**Визначення мети та задач досліджень.** З огляду на недостатній обсяг інформації, метою роботи було дослідження впливу малих домішок поверхнево-активних і кремнійорганічних добавок на кінетику затвердіння епоксидного олігомеру.

**Основна частина досліджень.** Як об'єкти дослідження обрано епоксидіановий олігомер марки ЕД-20 та аліфатичний амінний твердник поліетиленполіамін (ПЕПА). Як ПАР обрані: катіоноактивні (КПАР) АМА (алкілтриметиламоній хлорид) і ЦТАХ (цетриамоній хлорид), аніоноактивні (АПАР) АБС (алкілбензо-сульфонат натрію) і ЛТС (лауретсульфат натрію); а також неіоногенний (НПАР) Амірол М (алкілоламід жирних кислот касторової олії) та фторований Tridol. Як кремнійорганічні сполуки використовували  $\alpha$ ,  $\omega$ -біс (триметилсилокси) – олігодиметилсилоксани ПМС-10 та ПМС-400 і  $\alpha$ ,  $\omega$ -біс (гідрокси) - олігодиметилсилоксан

СКТН з кінцевими гідроксильними групами.

Усі дослідження проводилися з додаванням 0,5 мас.ч. модифікуючих добавок. Процес затвердіння вивчали в інтервалі температур 303-323 К діелектричним методом, основаним на реєстрації зміни питомого об'ємного електроопору  $\rho_v$  реакційної маси й оцінки швидкості реакції зі зростання цієї величини [11]. За допомогою цього методу визначено умовну швидкість реакції затвердіння  $\Delta \lg \rho_v / \Delta t$  і енергію активації процесу на початковій стадії. Усі результати експериментальних випробовувань подано у табл. 1.

Таблиця 1

Умовні кінетичні характеристики початкової стадії процесу твердіння досліджуваних епоксидних систем

Добавка	Умовна швидкість процесу твердіння модифікованого епоксиолімеру на початковій стадії за температури, $^{\circ}\text{C} \cdot 10^{-2}$			Ефективна енергія активації, кДж/моль	Параметр кислотності рКа
	30	40	50		
ЕД-20 без добавок	1,13	1,89	3,16	44,3	
Tridol	0,95	1,645	3,68	57,6	7,2
ЦТАХ	1,32	1,76	2,15	22,4	5,0
АБС	0,73	1,59	2,67	55,2	10,0
ПМС-10	1,14	1,77	2,27	30,6	6,5
АМА	1,24	1,87	3,1	39,5	3,5
Амірол М	0,55	1,70	3,39	76,4	8,2
ПМС-400	1,33	2,15	2,61	29,9	6,5
СКТН	1,2	1,71	2,69	35,3	6,5

З наведених даних видно, що умовна енергія активації процесу затвердіння епоксиолімеру ЕД-20 аліфатичним аміном ПЕПА становить 44,3 кДж/моль і ця величина близька до значень інших авторів, де величина ефективної енергії для

епоксиамінних систем становить 46-60 кДж/моль [12].

Параметри твердіння модифікованих епоксиамінних композицій поліетиленполіамін на початкових стадіях показують, що ПАР і КОС дещо інгібують або каталізують швидкість перебігу реакції.

За температури випробування 30 °С аніоноактивний АБС (35) і неіоногенні Tridol (16) і Амірол М (51) уповільнюють перебіг реакції затвердіння епоксидного олігомеру твердником ПЕПА на 35, 16 і 51 % відповідно.

Аналіз результатів, поданих у табл. 1, також показав таку закономірність: поверхнево-активні речовини, які характеризуються менш кислотними властивостями, ніж АБС, Амірол М і Tridol з  $pK_a = 7,2-10$ , уповільнюють процес твердіння, катіоноактивні АМА і ЦТАХ із сильнокислими властивостями з  $pK_a = 3-5$  приводять до деякого пришвидшення процесу твердіння і знижують  $E_a$ .

Як відомо, ступінь каталітичного впливу залежить від природи і хімічної будови ПАР [13]. Отримані дані свідчать про те, що полярні групи тетраалкіламонію КПАР каталізують процес твердіння. Дослідження впливу четвертинних

амонієвих основ на процес розкриття епоксидної групи при наявності амінного твердника [14] так само підтверджують отримані результати.

Становило інтерес дослідити взаємодію модифікуючих добавок з амінным твердником.

За допомогою пакета для молекулярного моделювання хімічних систем Hyperchem проведено комп'ютерне моделювання взаємодії модифікуючих добавок із ЕД-20 та твердником і за результатами моделювання вихідних молекул і міжмолекулярних комплексів визначено такі параметри: міжмолекулярна відстань і дипольні моменти – одні з головних характеристик, які визначають природу (полярність) і міцність міжмолекулярних взаємодій, а також енергію їх взаємодії. Умовні позначення атомів у моделях молекул ЕД-20, ПАР, КОС та аміної групи подано на рис. 1.

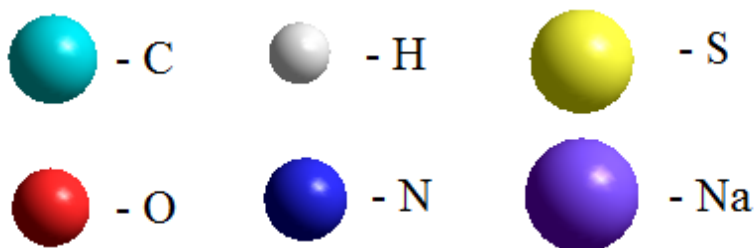


Рис. 1. Умовні позначення атомів

Через те, що на початковій стадії затвердіння відбувається подовження і розгалуження ланцюга, у якому беруть участь, в основному, первинні аміногрупи, як модельна молекула твердника була обрана молекула етиламіну. Результати комп'ютерного моделювання взаємодії модифікуючих добавок з етиламином, а саме енергія взаємодії, дипольний момент і міжмолекулярна відстань, подані в табл. 2.

У результаті комп'ютерного моделювання було визначено, що молекула

Амірол М орієнтується гідроксильною групою до ОН-групи ЕД-20 (рис. 2), тобто блокує гідроксогрупу епоксидолігомеру, яка зазвичай є каталізатором взаємодії «епоксид-амін», що швидше за все обумовлює такий сильний вплив Амірол М на кінетику процесу. Енергія взаємодії молекул Амірол М та твердника, що дорівнює 0,01 кДж/моль, говорить про досить слабкий, можливо дисперсійний зв'язок.

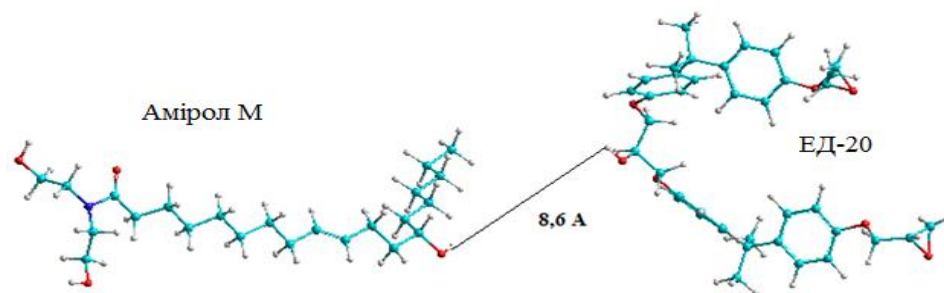


Рис. 2. Взаємодія молекул Амірол М з ЕД-20

Таблиця 2

Результати комп'ютерного моделювання взаємодії модифікуючих добавок з ЕД-20 та твердником

ДОБАВКА	$E_{\text{взаєм}} \text{ із ЕД-20,}$ кДж/моль	$E_{\text{взаєм}} \text{ із твердником,}$ кДж/моль	Дипольний момент, $\mu, \text{ D}$
ЕД-20	65,58		2,76
Твердник		-0,12	1,36
АМА	-11,83	0,13	9,16
ЦТАХ	-11,04	0,03	9,11
АБС	-5,06	1,06	6,52
ЛТС	-5,43	0,98	5,51
СКТН	1,38	-14,25	2,75
ПМС	-0,83	-4,64	0,23
Амірол М	0,04	-0,01	5,27

У випадку з таким АПАР, як АБС, спостерігається блокування епоксидної групи олігомеру сильно полярною електроннодонорною сульфатною групою, що міститься в його молекулі (рис. 3). Крім того, АБС має основну реакцію середовища із значенням  $pK_a = 9,5-10$ . Це так само може обумовлювати інгібування процесу твердіння епоксидолігомеру із введенням АПАР.

Комп'ютерне моделювання взаємодії КПАР з амінним твердником показало, що між цими молекулами існують дуже слабкі, дисперсійні взаємодії (табл. 2). Однак наявність сильних міжмолекулярних взаємодій КПАР з ЕД-20 відповідно знижують міжмолекулярні взаємодії між молекулами ЕД-20, і, крім того, було показано, що КПАР, на відміну від інших добавок найефективніше знижують в'язкість епоксидолігомеру [15], внаслідок

чого, імовірно, збільшується концентрація «вільних» молекул ЕД-20 і полегшується процес розкриття епоксидної групи, і реакція твердіння проходить швидше. При цьому величина ефективної енергії активації зменшується, що говорить про те, що перебіг процесу твердіння в таких умовах цілком імовірно буде сприяти формуванню полімерної матриці до гелеутворення в більш рівномірних умовах і, отже, утворенню більш однорідної структури з меншими залишковими напруженнями.

Твердіння епоксиамінних композицій при наявності кремнійорганічних добавок проходить за великих швидкостей у порівнянні з чистим олігомером ЕД-20. Комп'ютерне моделювання показало, що кремнійорганічні добавки мають дуже сильні внутрішньомолекулярні взаємодії і слабо реагують з молекулами ЕД-20.

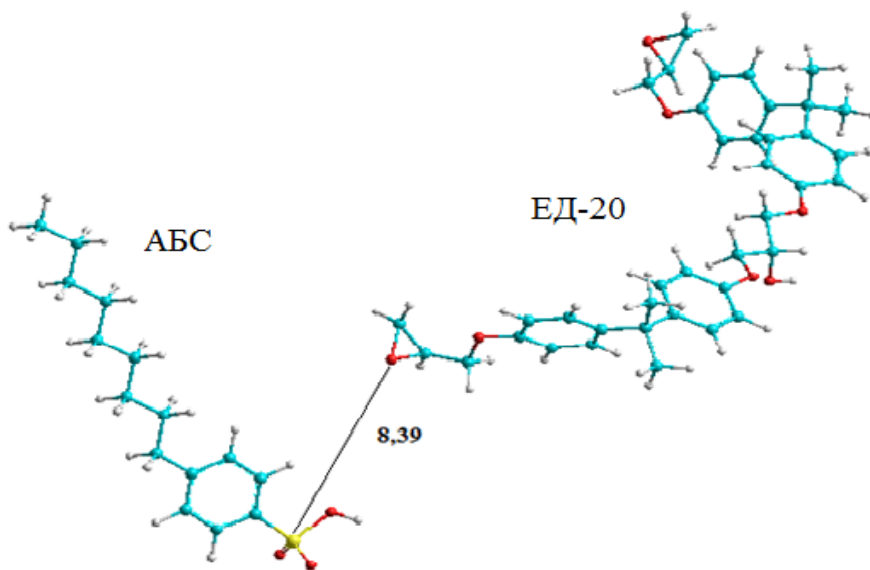


Рис. 3. Взаємодія молекул АБС з ЕД-20

У той же час КОС мають порівняно сильні міжмолекулярні взаємодії з етиламіном. При цьому, як видно з рис. 4, молекула етиламіну орієнтується неполярним вуглеводневим радикалом

щодо молекул ПМС і СКТН, що може призвести до посилення реакційної здатності аміногрупи з епоксидною групою олігомеру.

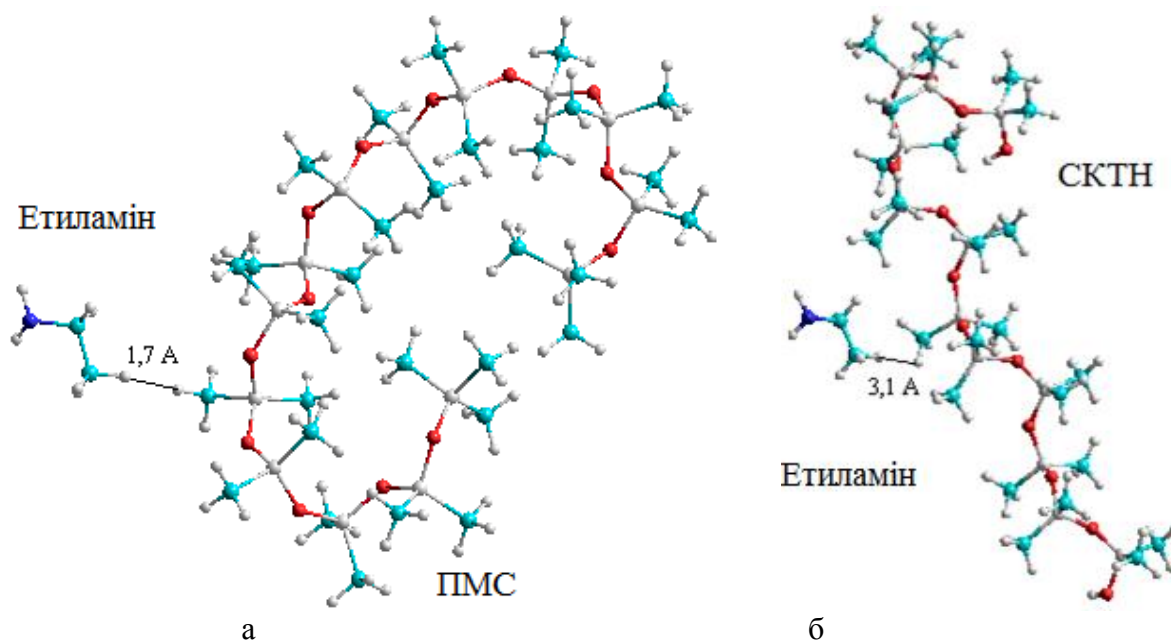


Рис. 4. Взаємодія аміноної групи твердника і молекул кремнійорганічних добавок: а – ПМС; б – СКТН

Як видно з табл. 2, КОС дещо пришвидшують процес твердіння (ПМС-400) або мало впливають на швидкість

твердіння, при цьому цей процес супроводжується зниженням величини умовної енергії активації.

**Висновки з проведених досліджень і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Проведені дослідження впливу хімічної будови ПАР та КОС на взаємодію із аміним твердником і на процес твердіння епоксидного олігомеру при наявності цих добавок. Отримані дані свідчать про те, що АПАР, які характеризуються підвищеною основністю ( $pK_a = 10$ ) та здатні блокувати епоксидну групу, а також НПАР (Амірол М), що екранує каталітично-активну гідроксильну групу у молекулі ЕД-20 у 1,5-2 рази уповільнює процес твердіння та підвищує

ефективну енергію активації реакції. У той же час при додаванні до епоксиамінного зв'язуючого КОС, що характеризуються слабкими кислотними властивостями, підвищеною енергією взаємодії з аміним твердником і слабким з ЕД-20, майже не змінюють швидкість твердіння і процес проходить при знижених значеннях енергії активації, що зазвичай сприяє утворенню однорідної і менш напруженої структури. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення утвореної структури та експлуатаційних властивостей отриманих матеріалів.

### Список використаних джерел

1. Берлин, А. А. Основы адгезии полимеров [Текст] / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – М.: Химия, 1974. – 392 с.
2. Козлов, П. В. Физико-химические основы пластификации полимеров [Текст] / П. В. Козлов, С. П. Папков. – М.: Химия, 1982. – 224 с.
3. Гапанович, Л. И. Регулирование физико-механических и технологических свойств полимерных пленкообразующих с помощью поверхностно-активных веществ [Текст] / Л. И. Гапанович // ЛКМ. – 1990. – №6. – С. 24-27.
4. Веселовский, Р. А. Регулирование свойств клеев с помощью поверхностно-активных веществ [Текст] / Р. А. Веселовский // Полимеры-80. – К.: Наук. думка, 1980. – С. 121-129.
5. Саратовцева, Н. Д. Влияние ПАВ на процессы структурообразования и физико-механические свойства полиэфирных композиций [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 – Строительные материалы и изделия / Н. Д. Саратовцева. – М., 1982. – 23 с.
6. Использование кремнийорганических соединений в качестве модификаторов эпоксидных композиций [Текст] / А. А. Ефремов, А. И. Загидуллин, М. В. Колпакова [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. – 2008. – № 4. – С. 12-17.
7. Полякова, Л. В. Влияние легирующих веществ на свойства эпоксидных полимеров [Текст] / Л. В. Полякова, В. П. Меньшутин, М. С. Акутин // Пластические массы. – 1981. – №2. – С. 25-26.
8. Эпоксиуретановые олигомеры, модифицированные функционализированными Si-содержащими соединениями [Текст] / Л. Н. Яценко, Т. Т. Тодосийчук, В. Н. Лемешко [и др.] // Олигомеры-2009: Междунар. конф. по химии и физикохимии олигомеров. – Волгоград, 2009. – С. 190.
9. Мошинский, Л. Я. Эпоксидные смолы и отвердители [Текст] / Л. Я. Мошинский. – Тель-Авив: Аркадия пресс Лтд, 1995. – 370 с.
10. Jackson W. J. Antiplasticization. II. Characteristics of antiplasticizers / W. J. Jackson, J.R. Caldwell // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1967. – Vol. 11. – №2. – P. 211-226.
11. Исследование кинетики отверждения эпоксидных смол ангидридами [Текст] / Г. Т. Коган, Л. Я. Мошинский, Л. Г. Несоленная [и др.] // Высокомолекулярные соединения. – 1968. – Т. 10А. – №1. – С.62-69.
12. Строганов, В. Ф. Химия и технология элементоорганических соединений и полимеров [Текст] / В. Ф. Строганов. – Казань: КХТИ, 1985. – С. 26-31.

13. Карат, Л. Д. Изучение направления раскрытия эпоксидного цикла в реакциях амидов карбоновых кислот с  $\alpha$ -оксидами [Текст] / Л. Д. Карат, В. И. Стрельцов, О. Н. Карпов // Пластические массы. – 1995. – № 4. – С. 17-18.

14. Ли, Г. Справочное руководство по эпоксидным смолам [Текст] / Г. Ли, М. Невилл. – М.: Энергия, 1973. – 416 с.

15. Барабаш, Е. С. Влияние ПАВ и кремнийорганических добавок на вязкостные свойства эпоксидного олигомера [Текст] / Е. С. Барабаш, Ю. В. Попов // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА ХОТВ АБУ. – 2014. – № 3 (77). – С. 103-106.

---

Барабаш Олена Сергіївна, інженер кафедри загальної хімії Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (093) 9219423. E-mail: elenol90@gmail.com.

Попов Юрій Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри загальної хімії Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (095) 7112931. E-mail: iupopov@gmail.com.

Данченко Юлія Михайлівна, канд. техн. наук, доцент кафедри загальної хімії Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (066) 3224745. E-mail: u\_danchenko@ukr.net.

Barabash Olena, Engineer, Department of General Chemistry, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (093) 9219423. E-mail: elenol90@gmail.com.

Popov Yuriy, PhD. Sc. Associate Professor, Department of General Chemistry, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (095) 7112931. E-mail: iupopov@gmail.com.

Danchenko Yuliya, PhD. Sc. Associate Professor, Department of General Chemistry, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (066) 3224745. E-mail: u\_danchenko@ukr.net.

Стаття прийнята 26.06.2017 р.

**УДК 629.4**

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**Асп. Д. Г. Воскобойников**

## **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШУВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ РУХОМОГО СКЛАДУ**

**Асп. Д. Г. Воскобойников**

## **DEVELOPMENT OF RECYCLING TECHNOLOGY FOR RELAXED SURFACES OF MOBILE COMPONENTS**

**Sciences, pg. D. G. Voskoboynikov**

*В процессе изучения способов восстановления изношенных поверхностей чугуновых деталей подвижного состава установлено, что известные методы восстановления не обеспечивают заданную работоспособность. Предложено решить эту проблему путем разработки новой технологии восстановления за счет формирования многокомпонентного покрытия, обеспечивающего износостойкость восстановленных деталей.*

***Ключевые слова:** износостойкость, многокомпонентное покрытие, чугуновые фрикционные клинья, наплавка, поверхностный слой.*

У процесі вивчення способів відновлення зношених поверхонь чавунних деталей рухомого складу встановлено, що відомі методи відновлення не забезпечують задану працездатність. Запропоновано вирішити цю проблему шляхом розробки нової технології відновлення за рахунок формування багатокомпонентного покриття, що забезпечує зносостійкість відновлених деталей.

**Ключові слова:** зносостійкість, багатошарове покриття, чавунні фрикційні клини, наплавка, поверхневий шар.

*In the process of studying the ways of restoring the worn surfaces of cast-iron parts of the rolling stock, it is established that the known methods of recovery do not provide the required workability. It is proposed to solve this problem by developing a new recovery technology through the formation of a multicomponent coating, which also ensures the wear resistance of the restored parts.*

**Keywords:** wear resistance, mnogokomponentnoe coating, cast iron friction wedges, welding, surface layer.

**Введение.** На восстановление и ремонт деталей подвижного состава железнодорожный транспорт Украины расходует ежегодно громадные суммы государственных средств, поэтому повышение их работоспособности и износостойкости является важной задачей.

Железнодорожный транспорт является одной из ведущих отраслей промышленности Украины, он играет важнейшую роль в грузовых и пассажирских перевозках. Общей тенденцией развития железнодорожного транспорта является повышение требований технического уровня, качества подвижного состава и его составляющих.

Одно из этих требований – безопасность пассажирских и грузовых перевозок, которые значительно зависят от надежности подвижного состава в условиях интенсивной эксплуатации.

Для грузового подвижного состава ответственными деталями являются чугунные фрикционные клинья тележки грузового вагона, так как при проведении плановых и неплановых ремонтах чугунные клинья с суммарным износом наклонной и вертикальной плоскостей более 3 мм подлежат выбраковке или замене, что повышает простой в ожидании ремонта из-за несвоевременной поставки запасных частей [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В процессе эксплуатации и ремонта выявляются дефекты, расположенные на поверхностях различного эксплуатационного назначения. При восстановлении чугунных деталей устранение дефектов производится, главным образом, наплавкой (заваркой), иногда пайкой-сваркой и замазкой. Свариваемость зависит не только от свойств чугуна (химический состав, структура и т.д.), но и от способа и режимов наплавки, состава наплавочных материалов и других параметров [2].

Чугун является трудносвариваемым материалом вследствие образования в шве хрупких и труднообрабатываемых структур отбела и закалки, обусловленных высоким содержанием углерода, серы и фосфора в основном металле; склонность чугуна к образованию неравновесных фаз при кристаллизации, а низкая пластичность основного металла и зоны оплавления приводят к образованию трещин и пор [8]. Трудности сварочных работ возрастают при изменениях структуры чугуна, вызванных длительным воздействием высоких температур, а также проникновением в него масел и продуктов сгорания горючего. Затруднения особенно возрастают при холодных способах наплавки. При горячей наплавке



(предварительный нагрев детали) и при низкотемпературных процессах (пайка, пайко-сварка) образование указанных дефектов менее вероятно.

Чугунные детали имеют высокую прочность на сжатие, отличаются надежной работой в условиях воздействия знакопеременных нагрузок, способны гасить вибрационные коробления [4].

Существует много способов восстановления чугунных деталей, которые включают в себя нанесение слоя покрытия, которое выполняется чугуном электродом. При этом каждый слой покрытия наносится толщиной при которой на чугуне не образуется науглераживаемый слой. Однако в данном способе отсутствуют подготовительные операции с удалением дефектов и следов износа, в результате чего наплавленный слой металла в процессе эксплуатации будет отслаиваться [3].

Известен способ восстановления чугунных деталей методом электрохимической обработки с подачей электролита через трубчатый электрод: инструмент проходит индукционное наплавление, шлифование наплавленной поверхности и оксидирование в азотной атмосфере при температуре  $450\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Основным недостатком данного способа

есть высокая технологичность и невозможность обеспечить заданной адгезии основного и наплавленного металла. Это не дает возможности качественного восстановления геометрических размеров изношенных деталей [5].

Поэтому разработка нового способа восстановления чугунных деталей является актуальной особенно это характерно для деталей подвижного состава железнодорожного транспорта.

Основная идея состоит в разработке способа восстановления чугунных фрикционных клиньев тележки грузового вагона, который обеспечит их работоспособность и износостойкость за счет покрытия, защищающего основной металл от образования обезуглероживающего слоя с дальнейшей наплавкой (напылением) при восстановлении геометрических размеров деталей за счет образования переходного слоя.

**Основная часть исследований.** Основным узлом грузового вагона, предназначенных для снижения колебаний кузова вагона и уровня динамических сил в вертикальной и горизонтальной плоскостях, является рессорное подвешивание с клиновыми фрикционными гасителями колебаний.



Рис. 1. Чугунные клинья с износами наклонной и вертикальной поверхности, подлежащие выбраковке при проведении планового ремонта

Низкая эксплуатационная стойкость фрикционных клиньев, фрикционных планок и пружин рессорного подвешивания

обусловлена прежде всего низким уровнем их физико-механических свойств и качества изготовления. На данный момент

не существует узаконенной каким-либо нормативным документом технологии восстановления чугунных клиньев тележек (рис. 1).

Поэтому при проведении плановых и неплановых ремонтов грузовых вагонов чугунные клинья с суммарным износом наклонной и вертикальной плоскостей клиньев более 3 мм, при условии, что этот износ будет не более 2 мм с одной из сторон, подлежат выбраковке и замене [6], а это, как правило, 100 % выбраковка чугунных клиньев при плановых видах ремонта.

С учетом того, что на одном вагоне установлено восемь фрикционных клиньев, а в год по УЗ проводится плановый ремонт около 30000 вагонов, то годовая потребность в исправных чугунных клинях составляет около 240 тыс. шт. (около 4080 т чугуна) или, с учетом стоимости нового клина, около 121 млн грн.

Проблема дефицита чугунных фрикционных клиньев при проведении плановых ремонтов вагонов на сегодняшний день решается в основном за

счет нарушения технологии их ремонта (приварка пластин металла к изношенным рабочим поверхностям клина или обычная дуговая наплавка изношенных поверхностей, зачастую с примитивной обработкой наплавленного слоя пневмошлифмашиной). При этом и то, и другое (приваренная пластина или слой наплавленного металла вскоре отпадает в процессе эксплуатации вагона) создает угрозу безопасности движения и вызывает повышенный износ смежных с клином поверхностей трения, а одна из них – это наклонная поверхность надрессорной балки, которую при следующем плановом ремонте однозначно придется восстанавливать, тратя на это дополнительные финансовые средства, хотя этого можно было бы избежать при отсутствии износа более 3 мм как минимум в одном-двух межремонтных периодах [6].

Исследования проводились на изношенных поверхностях фрикционных клиньев тележки грузового вагона модели 18-100, изготовленных из серого чугуна марки СЧ-35 (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид расположения фрикционных клиньев в тележке модели 18-100

В результате проведенных исследований предложен новый способ восстановления чугунных деталей, который заключается в формировании защитного слоя, обеспечивающего прочность сцепления покрытия основы за счет

переходного слоя между металлом – покрытием и наплавленным слоем.

Детали нагревают при температуре  $450\pm 5^\circ\text{C}$  и выдерживают в растворе солей меди, где образуется поверхностный слой со слоистой структурой; благодаря

наличию прочных связей между атомами слоя в горизонтальной плоскости и более слабых – в вертикальной будет обеспечивать легкое скольжение тонких слоев друг по другу [9]. Под действием механических сил будут протекать химические реакции между твердыми телами, участвующими в трении, либо реакции обмена одного или другого тела, участвующего в трении с компонентами окружающей их среды.

Материал поверхностного слоя будет своеобразным катализатором, вызывающим или ускоряющим процессы обмена между компонентами покрытия и окружающей среды. Наличие в слое меди обеспечивает необходимую износостойкость восстанов-

ленной поверхности. После чего геометрические размеры могут быть восстановлены любым методом наплавления.

**Выводы из исследований и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** Разработка технологии восстановления изнашиваемых поверхностей чугуновых клиньев, изготовленных из серого чугуна марки СЧ-35, даст возможность не только колоссальной экономии финансовых средств, затрачиваемых на приобретение новых клиньев взамен выбракованных, но и позволит значительно повысить ритмичность ремонта вагонов за счет снижения их простоя в ожидании ремонта из-за несвоевременной поставки запасных частей.

#### *Список использованных источников*

1. Ефимов, В. П. Модернизация тележки модели 18-100 – эффективный путь повышения безопасности движения поездов [Текст] / В. П. Ефимов, А. А. Пранов // Тяжелое машиностроение. – 2003. – №12. – С. 6-9.
2. Глушко, М. И. Работа пружинно-фрикционного комплекта тележки грузового вагона [Текст] / М. И. Глушко, А. Н. Антропов // Вестник ВНИИЖТ. – 2004. – №5. – С. 41-44.
3. Тененбаум, М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин [Текст] / М. М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1966. – 573 с.
4. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов [Текст] / Ю. М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1993. – 448 с.
5. Чугунные фрикционные клинья тележки грузового вагона [Текст] / А. В. Великанов, С. И. Пашарин, Т. П. Дудкина [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 1999. – № 1. – С. 25-31.
6. ЦВ-0015 Инструкция по ремонту тележек грузовых вагонов [Текст]. – Утв. 21.12.2007. – К., 2008.
7. Белый, А. Б. Структура и методы формирования износостойких слоёв [Текст] / А. Б. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
8. Orłowicz A. W., Tupaj M., Mróz M. Abrasive wear resistance of a quenched and sub-zero treated high-chromium white cast iron [Text] / Metallurgy, Vol.56 No.3-4, July 2017. – P. 358-362.
9. Kmita A., Zych J., Holtzer M. Ecological water-based protective coatings for moulds and cores of iron castings [Text] / Metallurgy, Vol.55. No.4, October 2016. – P. 589-592.

---

Воскобойников Дмитро Геннадійович, аспірант кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 095-591-47-44. E-mail: mntv@kart.edu.ua.

Voskoboynikov Dmitry Gennadyevich, post-graduate student of the department of quality, standardization, certification and materials production technologies of the Ukrainian state university of railway transport. Tel.: 095-591-47-44. E-mail: mntv@kart.edu.ua.

Стаття прийнята 26.06.2017 р.

УДК 658.5

## АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СТРУКТУР УПРАВЛІННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Асп. Д. Ю. Мельник

## АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Асп. Д. Ю. Мельник

## ANALYSIS OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES OF CONTROL OF METROLOGICAL ACTIVITIES

Sciences, pg. D. Melnik

*У процесі оптимізації організаційної структури залізничного транспорту багатократно зростає роль метрологічного забезпечення як одного з основних елементів системи управління залізницею, яка теж потребує кардинальних змін.*

**Ключові слова:** метрологічна служба, метрологічні лабораторії, єдність вимірювань, засоби вимірювань.

*В процессе оптимизации организационной структуры железнодорожного транспорта многократно возрастает роль метрологического обеспечения как одного из основных элементов системы управления железной дорогой, которая тоже требует кардинальных изменений.*

**Ключевые слова:** метрологическая служба, метрологические лаборатории, единство измерений, средства измерений.

*In the process of optimization of the organizational structure of the railway transport repeatedly increases the role of metrological support, as one of the main element of the system of management of the railway, which also require radical changes.*

**Keywords:** metrological service, metrological laboratory, the unity of measurements, measuring tools.

**Вступ.** Залізничний транспорт є специфічною галуззю з безперервним технологічним циклом робіт, величезними масштабами впровадження технічних засобів, динамічністю, складністю зв'язків між підприємствами-виробниками, організаціями-розробниками та підприємствами, що експлуатують технічні засоби, які працюють на єдиний перевізний процес. Тому ефективність роботи залізничного транспорту багато в чому залежить від рівня технічних засобів і їх метрологічного обслуговування, які працюють на єдиний

перевізний процес. Першочерговим завданням метрологічного обслуговування є забезпечення єдності вимірювань технічних засобів, технологічних процесів під час ремонту і обслуговування рухомого складу на залізниці.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Темпи розвитку науково-технічного прогресу потребують створення нових технологій та вдосконалення засобів технічного регулювання якості продукції на основі ефективного метрологічного забезпечення. Сучасне виробництво

потребує забезпечення інформацією щодо параметрів і характеристик об'єктів досліджень і вимірювань, встановлення і застосування наукових та організаційних основ, технічних засобів, правил і норм, потрібних для досягнення необхідної точності вимірювань та зменшення їх трудомісткості. У зв'язку з цим постійно зростають вимоги до точності вимірювань і контролю якості продукції на всіх етапах її виробництва. У таких умовах необхідний єдиний методичний підхід, що забезпечує в практичній діяльності високу якість вимірювань у сфері управління якістю продукції.

Сьогодні вимірювання і метрологія пронизують усі сфери людського життя. З вимірюваннями пов'язана діяльність людини на будь-якому підприємстві. Інженери промислових підприємств, які здійснюють метрологічне забезпечення виробництва, повинні мати повні відомості про можливості вимірювальної техніки для вирішення завдань взаємозамінюваності вузлів і деталей, регулювання виробництва продукції на всіх її життєвих циклах. Метрологія стала наукою, без знання якої не може обійтися жоден фахівець будь-якої галузі.

Під метрологічним забезпеченням (далі – МЗ) розуміється встановлення і застосування наукових і організаційних основ, технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності і необхідної точності вимірювань [3, 4]. Основною тенденцією в розвитку МЗ є перехід від тієї системи, що існувала раніше, яка вирішувала порівняно вузькі завдання забезпечення єдності вимірювань, до принципово нового завдання забезпечення якості вимірювань.

Метрологічне забезпечення має п'ять взаємопов'язаних галузей: законодавчу, наукову, організаційну, нормативну і технічну [4]. Взаємозв'язки між окремими галузями метрологічного забезпечення є складними, і в загальному випадку їх важко зобразити у вигляді формалізованої моделі.

Тому надзвичайно важливим для розвитку МЗ виробництва є створення тісного інформаційно-логістичного зв'язку між якістю технологічних процесів та якістю процесів вимірювань, який сприяв би врахуванню перспективних тенденцій розвитку цієї галузі.

**Визначення мети і задачі дослідження.** Основним завданням метрологічної служби є підвищення рівня метрологічного забезпечення з метою ліквідації економічних втрат від погрешностей вимірювань у процесі виробництва продукції. Успішне вирішення цієї задачі потребує нових підходів до оцінки ефективності і рівня метрологічного забезпечення. За обмеженості коштів потребує розвитку робота з обґрунтування економічної ефективності робіт з метрологічного забезпечення нових засобів вимірювання. На сьогодні залізницею використовується значна кількість засобів вимірювання. Разом з тим існує необхідність у розвитку метрологічного забезпечення залізниці, що вимагає збільшення і раціонального використання капітальних вкладень на розроблення і впровадження нових засобів вимірювання, збільшення їх номенклатури.

**Основна частина.** Для забезпечення єдності вимірювань на ПАТ «Укрзалізниця» існує метрологічна служба (далі – МС), схему якої подано на рис. 1.

Метрологічна служба залізниці – це організаційна структура, що складається з мережі метрологічних підрозділів, які здійснюють комплекс заходів щодо забезпечення єдності вимірювань, стандартизації, технічного регулювання, і на яку покладена відповідальність щодо забезпечення єдності вимірювань та якості продукції і послуг у регіоні залізниці. Діяльність МС залізниці спрямована на забезпечення єдності вимірювань у технологічних процесах залізничного транспорту з метою забезпечення безпеки руху поїздів, підвищення ефективності організації перевезень, якості ремонту і

обслуговування рухомого складу, інших технічних засобів інфраструктури залізниці, безпечних і гігієнічних умов роботи, охорони навколишнього

середовища, забезпечення якості продукції і послуг, обліку енергетичних і матеріально-технічних ресурсів, прискорення науково-технічного прогресу.

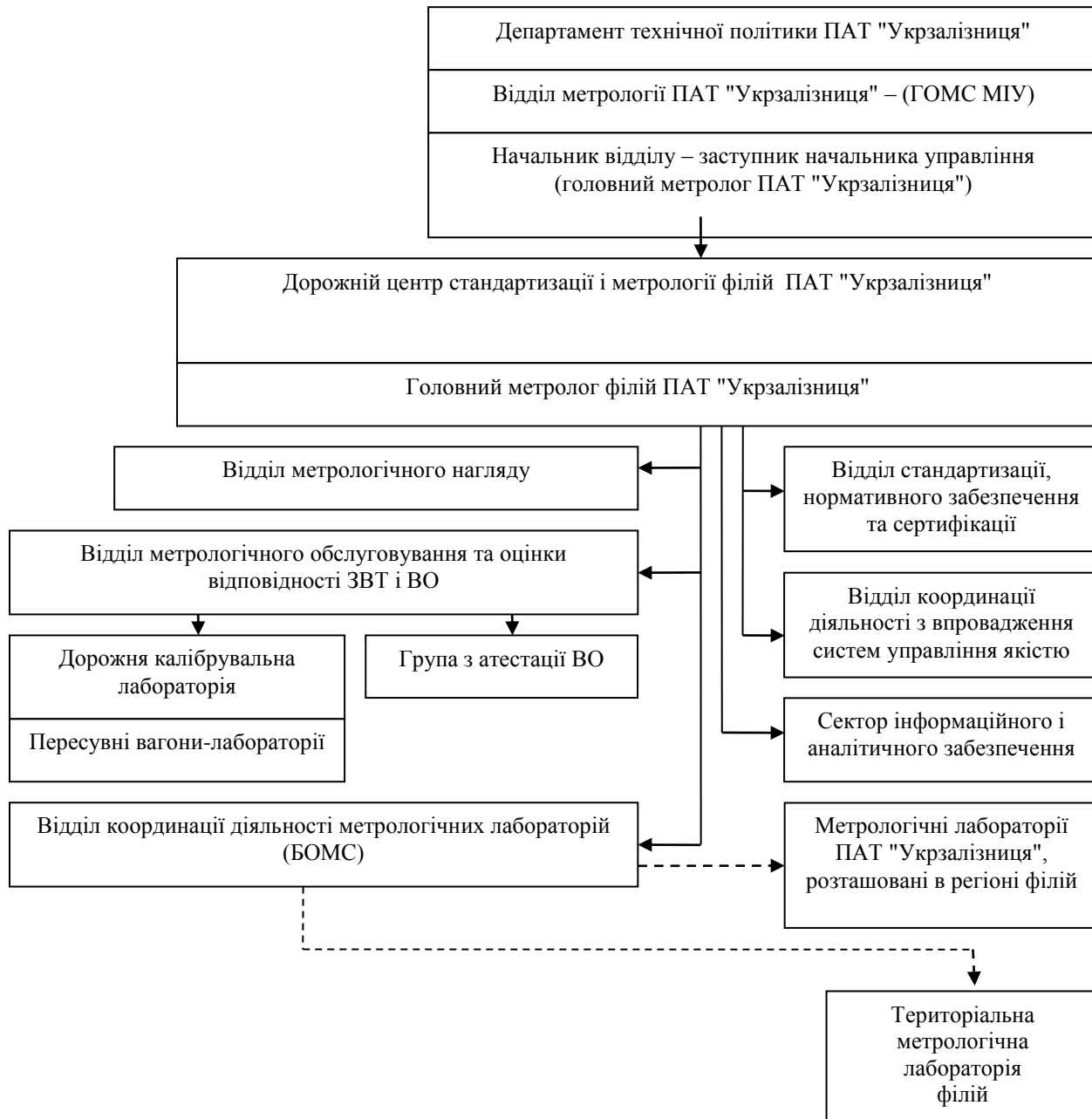


Рис. 1. Структурна схема метрологічної служби залізниці

Основними завданнями та функціями МС залізниці є:

- координація робіт щодо забезпечення єдності і необхідної точності вимірювань, підвищення рівня та

вдосконалення техніки вимірювань, якості продукції і послуг;

- визначення основних напрямків розвитку і планування робіт з метрологічного

забезпечення експлуатаційної діяльності залізниці;

- впровадження сучасних методів вимірювань і засобів вимірювальної техніки, випробувань і контролю;

- здійснення метрологічного нагляду і контролю за забезпеченням єдності вимірювань та якості продукції і послуг у структурних підрозділах залізниці.

Вплив рівня метрологічного забезпечення на якість продукції простежується на всіх стадіях виробництва. Для успішного вирішення задач у сфері метрологічного забезпечення необхідно розробити оптимальні методи отримання, зберігання, обробки й використання великого обсягу інформації про стан виробів на всіх стадіях формування їх якості.

Важливою умовою підвищення якості продукції є діяльність метрологічної служби залізниці, яка включає висококваліфікований персонал і сучасне технічне

обладнання для забезпечення високої якості вимірювання.

Основу МС залізниці складають метрологічні лабораторії (далі – МЛ): повірочні, калібрувальні і вимірювальні (далі – ПЛ, КЛ, ВЛ.). МЛ здійснюють комплекс заходів щодо метрологічного забезпечення робіт, які виконуються в структурному підрозділі, і можуть виконувати роботи для інших підрозділів залізниці, державних центрів, промислових підприємств, що розміщені в певному регіоні залізниці або залізничному вузлі. МЛ атестуються в установленому порядку і виконують калібрування, повірку, ремонт ЗВТ, проводять вимірювання і виконують інші метрологічні роботи для власних потреб структурних підрозділів залізниці. Проаналізувавши стан лабораторій за період з 2010 по 2016 рік і відобразивши його рис. 2, 3 і 4, ми бачимо зростання кількості лабораторій, фахівців і обсягів робіт, що виконують лабораторії.

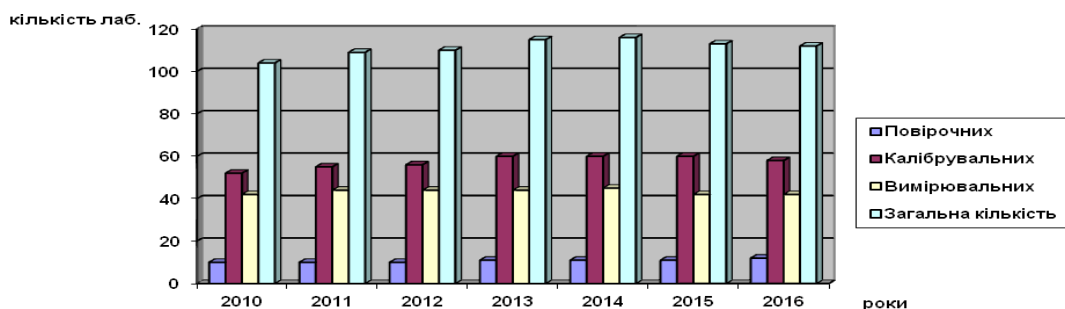


Рис. 2. Кількість лабораторій

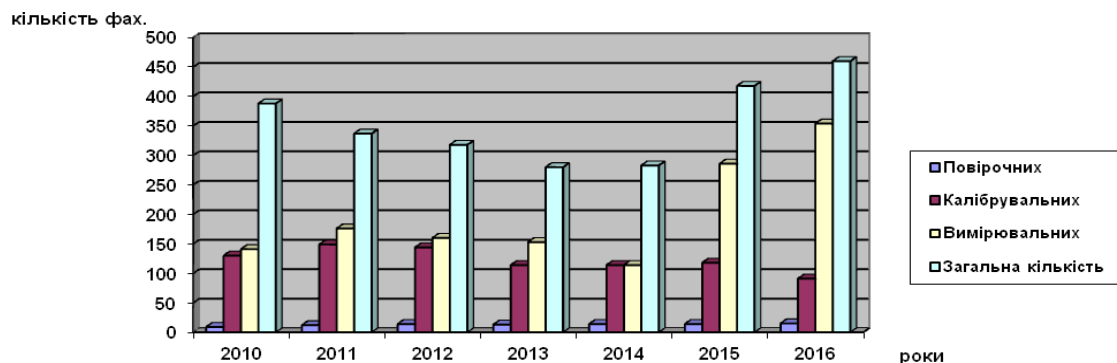


Рис. 3. Кількість фахівців



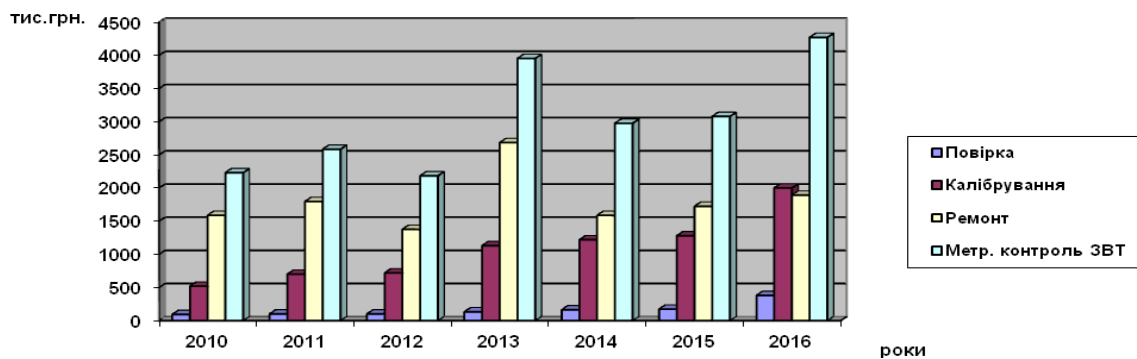


Рис. 4. Обсяг робіт

**Висновки з проведених досліджень і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Виходячи з аналізу та враховуючи Програму реформування залізничного транспорту на 2010-2015 роки, якою передбачається утворення державного концерну, до складу якого увійдуть залізниці, підприємства, установи та організації залізничного транспорту, що забезпечують його діяльність як єдиного територіально-розподіленого виробничо-технологічного комплексу, пропонується оптимізувати і МС залізниці таким шляхом:

1. Створити в транспортних вузлах залізниці опорні дорожні метрологічні лабораторії (РМЛ), адаптовані до вирішення метрологічних завдань структури транспортного вузла.

РМЛ – спеціалізований регіональний підрозділ МС залізниці з ремонту, повірки

та калібрування ЗВТ на закріпленому та територіальному рівні.

Мета етапу – підвищення ефективності і суттєве зниження експлуатаційних витрат на метрологічні роботи, створення передумов для повної відмови від послуг територіальних органів Держспоживстандарту.

2. Реорганізувати структуру метрологічної служби залізниці.

Мета етапу – забезпечення єдності вимірювань, необхідного рівня безпеки руху поїздів, ресурсозбереження, якості ремонту і технічного обслуговування рухомого складу з пріоритетом централізації метрологічної діяльності. Структурна схема метрологічної служби відображена на рис. 1.

### Список використаних джерел

1. Збірник нормативно-методичних документів з метрології залізничного транспорту України [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2008. – 170 с.
2. Тарасюк, Г. М. Планування діяльності підприємства [Текст]: навч. посібник / Г. М. Тарасюк, Шваб Л. І. – К.: Каравела, 2003.
3. Хан, Д. Экономика предприятия [Текст]: пер. с нем. / Д. Хан. – М.: ИНФА-М, 1999.
4. Рейх, Н. Н. Метрологическое обеспечение производства [Текст]: учеб. пособие / Н. Н. Рейх, А. А. Тупиченков, В. Г. Цейтлин; под ред. к.т.н. Л. К. Исаева. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 248 с.
5. Перельштейн, Е. Л. Метрологическая служба промышленного предприятия [Текст] / Е. Л. Перельштейн. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 192 с.



6. Метрологическое обеспечение производства [Текст]: конспект лекций / под ред. А. А. Тупиченкова. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 248 с.
7. Goff S.A. Exploring Project Management Competence [Electronic resource] / Stacy A.Goff // Project management Wisdom: personal site by R.Ma[ Wideman;Guest Article. – 2007.
8. Шаповал, М. І. Менеджмент якості [Текст]: навч. посібник / М. І. Шаповал. – К., 2007. – 471 с.
9. ДСТУ ISO 9001-2009 Системи управління якістю. Вимоги [Текст]. – К., 2009. – 150 с.
10. Лифиц, И. М. Основы стандартизации, метрологии, сертификации. [Текст] / И. М. Лифиц. – М.: Юрайт, 2001. – 613 с.

---

Мельник Дмитро Юрійович, аспірант кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 095-746-09-32.  
E-mail:mtv@kart.edu.ua.

Melnik Dmitro Yurievich, post-graduate student of the Department of Quality, Standardization, Certification and Materials Production Technologies of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 095-591-47-44.  
E-mail:mtv@kart.edu.ua.

Стаття прийнята 26.06.2017 р.

**УДК 006.015.5**

## **АНАЛІЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ МЕТРОЛОГІЧНИХ РОБІТ**

**Асп. Д. А. Титар**

## **АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ**

**Асп. Д. А. Титар**

## **ANALYSIS OF QUALITY MANAGEMENT METROLOGICAL WORKS**

**Sciences, pg. D. A. Titar**

*Стабільне та ефективне функціонування залізничного транспорту України, інтеграція країни у загальносвітову економічну систему потребують вирішення питань розроблення та впровадження системи управління якістю метрологічних робіт як важливої ланки в постійному поліпшенні якості та підвищенні задоволення споживачів, дієвість якої можливо дослідити за допомогою процесної моделі.*

**Ключові слова:** метрологічні роботи, система управління якістю, моделювання, модель, процесний підхід.

*Стабильное и эффективное функционирование железнодорожного транспорта Украины, интеграция страны во всемирную экономическую систему требуют решения вопросов разработки и внедрения системы управления качеством метрологических работ как важного звена в постоянном улучшении качества и удовлетворения потребителей, действенность которой можно исследовать с помощью процессной модели.*

**Ключевые слова:** метрологические работы, система управления качеством, моделирование, модель, процессный подход.

*A stable and efficient operation of railway transport of Ukraine, the country's integration into the global economic system need to be addressed in the development and implementation of quality management system of metrological work as an important link in the continuous improvement of quality and increase customer satisfaction, the effectiveness of which can explore using the process model.*

**Keywords:** metrology work, quality management system, modeling, the model, process approach.

**Вступ.** Залізничний транспорт – одна з найбільш важливих галузей народного господарства України. Без транспорту неможлива інтеграція України у загальносвітову економічну систему. Розбудова економіки нашої країни та намагання її піднесення до світового рівня висуває перед суб'єктами господарювання ряд важливих завдань, що потребують вирішення. Одне з найважливіших – підвищення конкурентоспроможності українських виробників товарів і послуг, їх вихід на європейський та світовий ринки.

У ринковій економіці проблема якості є найважливішим чинником підвищення рівня життя, економічної, соціальної й екологічної безпеки. Це передбачає реалізацію цілого комплексу заходів структурно-організаційного, техніко-інноваційного та правового характеру. Серед них і адаптація національної системи стандартизації, метрології та сертифікації (технічних стандартів, процедур та органів з оцінки відповідності тощо) до системи технічного регулювання Європейського Союзу, що вимагає поглибленого дослідження останньої [1].

Метрологічна діяльність зазнала серйозних змін [1, 8], так як змінилися основи виробництва: засоби вимірювань інтегруються з технологією виробництва, випробуваннями (автоматизація випробувань на основі застосування сучасних інформаційно-вимірювальних систем), підвищується точність засобів вимірювань, автоматизуються процеси калібрування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У багатьох роботах ефективність організаційної структури управління (ОСУП) визначається на основі

розрахунку ряду окремих коефіцієнтів: забезпеченості кваліфікованим управлінським персоналом [8]; оперативності праці апарату управління [9]; рівня прогресивності структури [2]; керованості [5]; якості виконання управлінських функцій [4, 7]; раціональності управлінської документації [7]; пріоритетів комунікаційного процесу [4, 8]; ефективності фінансово-економічних результатів підприємства [1] та ін. Але жоден з них не дає змоги повною мірою оцінити ефективність організаційної структури управління в цілому.

Отже, вищенаведені аргументи дають змогу стверджувати, що сучасні методичні розробки з аналізу й оцінювання організаційної структури управління далеко не повною мірою задовольняють потреби аналітиків. Оцінювання ефективності проводиться на основі показників, що характеризують лише окремі підсистеми управління або тільки його результати. Воно є одностороннім і не може служити основою для розроблення заходів щодо вдосконалення управління. Крім цього, практично всі сучасні методики або не пропонують механізму проведення такого оцінювання, або їх практичне використання вкрай скрутне. Основною метою є дослідження ефективності функціонування організаційної системи управління, що безпосередньо впливає на загальний результат діяльності підприємства і його розвиток.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Щоб бути конкурентоспроможними і вести успішну економічну діяльність, підприємствам необхідно застосовувати високоефективні і результативні системи управління якістю метрологічних робіт

(далі – СУЯМР) [4, 6, 9, 10]. Використання таких систем повинно проводити до постійного поліпшення якості та підвищення задоволеності споживачів. СУЯМР може бути ефективною тільки за умови, коли вона функціонує одночасно і в тісній взаємодії з усіма підрозділами підприємства, які впливають на якість продукції.

**Основна частина.** Найважливішою ланкою забезпечення якості метрологічних робіт на підприємстві є метрологічна служба. Управління якістю продукції неможливе без метрологічного забезпечення вимірювань [3, 5, 8], яке визначається унікальними можливостями отримання кількісної інформації про матеріальні та енергетичні ресурси, якість матеріалів і сировини, про стан навколишнього середовища, про безпеку та охорону здоров'я людей і відповідно про якість процесів і продукції.

У СУЯМР на метрологічну службу покладено відповідальність за управління засобами моніторингу та вимірювань [5]. Щоб діяльність метрологічної служби підприємства повністю задовольняла вимоги державних і міжнародних стандартів до процедур управління контрольним, вимірювальним та випробувальним обладнанням, необхідно всередині системи управління якістю підприємства розробити і підтримувати в робочому стані СУЯМР, яка б документально регламентувала основні процедури виконання окремих видів діяльності з метрологічного забезпечення вимірювань.

Якість метрологічних робіт визначається дією багатьох випадкових, місцевих і суб'єктивних факторів. Для запобігання впливу цих факторів на рівень якості необхідна система управління якістю метрологічних робіт. При цьому потрібні не окремі розрізнені й епізодичні зусилля, а сукупність заходів постійного впливу на процес створення продукту з метою підтримки відповідного рівня якості.

Моделювання реальної СУЯМР ґрунтується на застосуванні системного підходу, тобто шляхом розгляду підприємства як системи ієрархічних і взаємопов'язаних процесів на всіх рівнях підприємства, та системного аналізу. У багатьох аспектах системний аналіз є найбільш важкою частиною дослідження. Це не тільки технічні труднощі аналізу, політичні труднощі, а й проблеми, пов'язані з необхідністю спілкування в умовах, коли люди, що мають різний рівень освіти, різні погляди на світ і різний словниковий запас, повинні працювати спільно.

Основним завданням побудови моделей при дослідженні систем управління є створення ефективних графічних методів, що забезпечують отримання ясного та загального представлення системи. Графічні представлення систем дають змогу усвідомити, як поєднуються між собою компоненти системи і як задовольняються потреби користувачів. Без такого інструментарію для структурного системного аналізу немає можливості показати логічні функції і потреби системи, які лежать в основі.

Користуючись моделлю, можна провести експеримент, вивчити можливу поведінку об'єкта при змінах факторів і параметрів зовнішнього і внутрішнього середовища, настанні тих чи інших подій, здійсненні об'єктом або суб'єктом управління певних дій. Усі процеси управління і виробничий цикл підприємства подані як структура взаємопов'язаних процесів (функцій) [2, 11].

Модель системи якості, що ґрунтується на процесах та ілюструє розглянуті в цьому розділі питання та зв'язки між ними, подана на рис. 1 у вигляді чотирьох блоків взаємопов'язаних між собою процесів:

- відповідальність керівництва;
- управління ресурсами;
- створення продукту;
- вимірювання, аналіз і поліпшення.

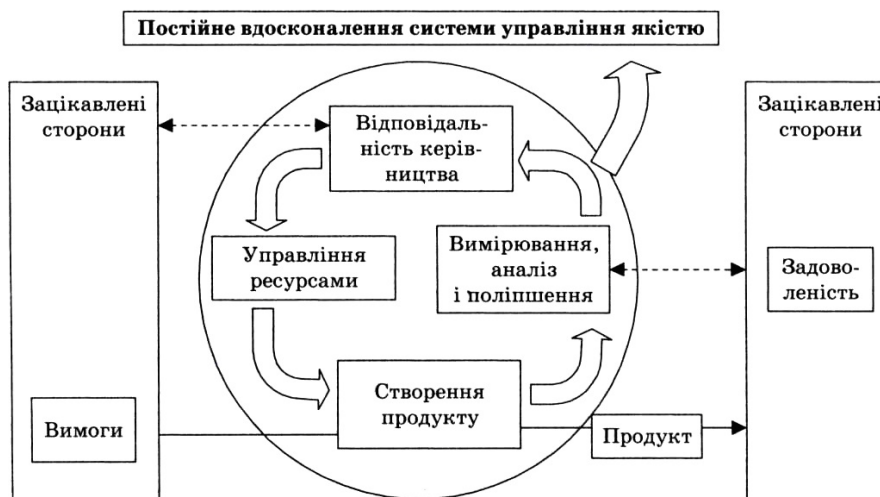


Рис. 1. Модель системи якості, в основу якої покладено процеси

Рис. 1 показує, що зацікавленим сторонам відведено важливу роль у визначенні вимог як до входів, так і виходів. Для відображення ступеня задоволеності споживача потрібно оцінювати інформацію, пов'язану з його думкою щодо того, чи виконала організація його вимоги.

Перевагою процесного підходу є забезпечуваний ним неперервний контроль зв'язків окремих процесів у межах системи процесів, а також їх сполучень та взаємодій. Застосування процесного підходу в межах СУЯМР підкреслює важливість: розуміння виконання вимог; необхідність розглядати процеси з погляду створення додаткових цінностей; отримання результатів функціонування процесу та його ефективності; постійного поліпшення процесу об'єктивних вимірювань.

Застосування процесного підходу [3] вимагає розгляду насамперед сукупності виконуваних на підприємстві вимірювань як локально упорядкованого процесу, моделлю якого, в першому наближенні, можна вважати випадковий потік. Потік вимірювань має складну структуру: він повинен бути впорядкований у просторі

(вимірювання здійснюються в певних підрозділах) і в часі (вимірювання є складовою частиною планованих етапів життєвого циклу продукції), однак прив'язка вимірювань до точок простору і моментів часу не абсолютна, а схильна до природних коливань у зв'язку з мінливістю конкретних умов. Для метрологічної служби, що розглядає вимірювання інтегрально в рамках усього підприємства, потік вимірювань виявляється нерегулярним, тому управління вимірами являє собою не просту функцію. Основними інструментами управління служать розроблення та реалізація відповідних стандартів підприємства, а також проведення процедур метрологічного обслуговування технічних засобів (методик виконання вимірювань і ЗВ). На першому (верхньому) рівні організації процесів метрологічної діяльності на підприємстві визначається процес МЗ. У ньому виділяють підпроцеси, у ролі яких природно встановити процеси виконання функцій МЗ. Таким чином, визначається структура, подана на рис. 2, де КД – конструкторська документація, ТД – технологічна, ЗКн – засоби контролю, ЗВип – засоби випробувань.

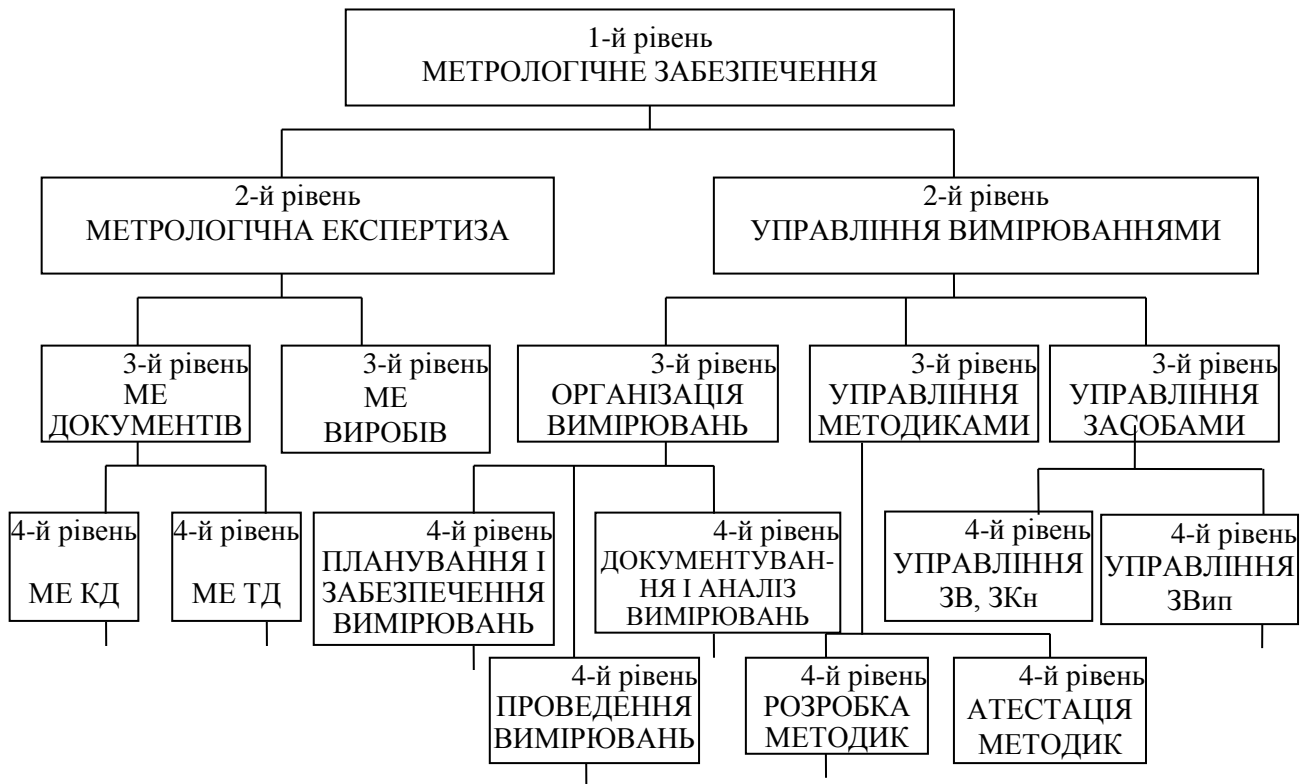


Рис. 2. Структура процесу метрологічного забезпечення

Зазначена структура не є єдиноможливою. Замість змішаного функціонально-об'єктного принципу виділення процесів можна послідовно використовувати тільки функціональний принцип. У цьому випадку підпроцесами 3-го рівня для МЗ були б, наприклад, «Організація МЗ», «Аналіз документів», «Документування та реалізація результатів МЗ». Аналогічно для процесу «Управління засобами» як підпроцеси виступали б «Визначення потреби і оснащення засобами», «Процедури підтвердження відповідності», «Обслуговування та облік коштів», «Списання та утилізація засобів». Іншими словами, були б об'єднані універсальними функціями всі категорії засобів, а відмінності цих категорій враховані особливостями конкретних процедур виконання зазначених функцій. Глибина структурування (кількість рівнів, або підпроцесів) може бути різною залежно від розмірів підприємства і доступних ресурсів.

Весь комплекс заходів щодо створення та впровадження системи управління якістю завершується процесом сертифікації системи підприємства на відповідність вимогам стандарту ІСО 9000.

**Висновки з проведених досліджень і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Застосовуючи моделювання, можна досягти необхідних результатів у господарській діяльності підприємства. При цьому:

1. Побудова моделі належить до числа системних завдань, при вирішенні яких синтезують рішення на базі величезної кількості вихідних даних, на основі пропозицій великих колективів фахівців.

2. Використання системного підходу в цих умовах дає змогу не тільки побудувати модель реального об'єкта, але й на базі цієї моделі вибрати необхідну кількість керуючої інформації в реальній системі, оцінити показники її функціонування і тим самим на базі моделювання знайти найбільш ефективний варіант побудови і

вигідний режим функціонування реальної системи.

3. При моделюванні необхідно забезпечити максимальну ефективність моделі системи, яка визначається як деяка

різниця між якимись показниками результатів, отриманих у результаті експлуатації моделі, і тими витратами, які були вкладені в її розроблення і створення.

### *Список використаних джерел*

1. Біла книга. Про політику адаптації вітчизняного законодавства у галузі норм і стандартів до європейських вимог [Текст]. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 65 с.
2. Теория управления [Текст]: учебник / под общ. ред. д.э.н., проф. А. Л. Гапоненко, д. э. н., профессора А. П. Панкрухина. – М.: Издательство РАГС, 2003. – 558 с.
3. Грановский, В. А. Метрологическое обеспечение на промышленном предприятии: проблемы и решения [Текст] / В. А. Грановский // Измерения. Контроль. Автоматизация: состояние, проблемы, перспективы. – 2009. – № 8. – С. 94-108.
4. Данилец, Е. В. Имитационное моделирование систем управления качеством в экономике [Текст] / Е. В. Данилец // Экономика научно-технического прогресса. – 2008. – № 2(22). – С. 197-208.
5. ДСТУ ISO 9001-2009 Системи управління якістю. Вимоги [Текст]. – К., 2009. – 150 с.
6. Менеджмент систем качества [Текст]: учеб. пособие / М. Г. Круглов, С. К. Сергеев, В. А. Такташов [и др.]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 368 с.
8. Лифиц, И. М. Основы стандартизации, метрологии, сертификации [Текст] / И. М. Лифиц. – М.: Юрайт, 2001. – 613 с.
9. Ребрин, Ю. И. Управление качеством [Текст]: учебн. пособие / Ю. И. Ребрин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 174 с.
10. Шаповал, М. І. Менеджмент якості [Текст]: навч. посібник / М. І. Шаповал. – К., 2007. – 471 с.
11. Goff S.A. Exploring Project Management Competence [Electronic resource] / Stacy A.Goff // Project management Wisdom: personal site by R.Ma[ Wideman;Guest Article. – 2007.

---

Титар Дмитро Анатолійович, аспірант кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 095-746-09-32.  
E-mail:mtv@kart.edu.ua.

Titar Dmitro Anatolievich, post-graduate student of the Department of Quality, Standardization, Certification and Materials Production Technologies of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 095-591-47-44.  
E-mail:mtv@kart.edu.ua.

Стаття прийнята 26.06.2017 р.

УДК 624.21

## КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВТРУЧАНЬ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

Асп. О. О. Давиденко (НТУ)

## КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Асп. А. А. Давыденко (НТУ)

## OPERATIONAL INTERVENTIONS PERFORMANCE CRITERION HIGHWAY BRIDGES

Graduate student A. A. Davydenko

*Стаття присвячена оптимізації витрат на утримання, капітальний ремонт, реконструкцію та нове будівництво протягом життєвого циклу автодорожніх мостів.*

*Пропонується підхід до визначення необхідних експлуатаційних заходів для автодорожніх мостів, які знаходяться в п'ятому експлуатаційному стані, що базується на критерії ефективності експлуатаційних втручань, без традиційних довготривалих і дорогих процедур.*

**Ключові слова:** експлуатація автодорожніх мостів, капітальний ремонт, нове будівництво, реконструкція, технічний стан.

*Статья посвящена оптимизации расходов на содержание, капитальный ремонт, реконструкцию и новое строительство в течение жизненного цикла автодорожных мостов.*

*Предлагается подход к определению необходимых эксплуатационных мероприятий для автодорожных мостов, которые находятся в пятом эксплуатационном состоянии, основанный на критерии эффективности эксплуатационных вмешательств, без традиционных длительных и дорогостоящих процедур.*

**Ключевые слова:** эксплуатация автодорожных мостов, капитальный ремонт, новое строительство, реконструкция, техническое состояние.

*The article is devoted to optimization of expenses for maintenance, major repairs, rebuilding operation and new construction during the life cycle of highway bridges.*

*An approach is proposed for determining the necessary operational measures for highway bridges that are in the fifth operational state, based on the criteria for the effectiveness of operational interventions, without traditional long and costly procedures.*

**Keywords:** operation and maintenance of highway bridges, major repairs, new building, rebuilding operation, technical state.

**Вступ.** Статтю присвячено проблемі оптимізації витрат на утримання, капітальний ремонт, реконструкцію та нове будівництво протягом життєвого циклу автодорожніх мостів.

Загальна кількість автодорожніх мостів, підпорядкованих Укравтодору, 16191 од., 37000 п.м. Сьогодні доводиться констатувати стрімке зростання фізично застарілих споруд, непомірне зростання кількості мостів, що потребують ремонту (рисунки).

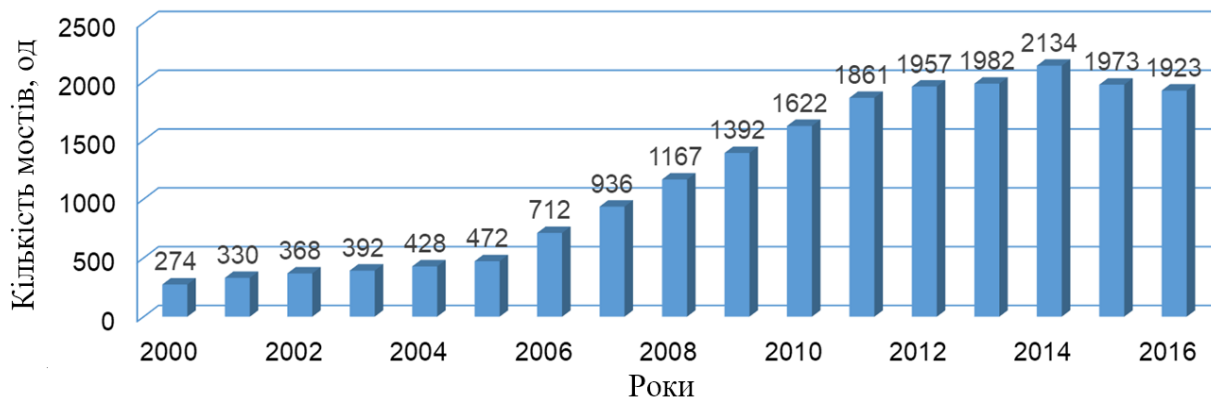


Рис. Кількість мостів, що потребують термінового ремонту

За даними тендерних закупівель, середня вартість капітального ремонту мостів складає 70 тис грн/м<sup>2</sup>, нового будівництва – 100 тис. грн/м<sup>2</sup>. Виведення споруди з експлуатації – це трудомісткі та складні будівельні роботи, вартість яких може сягати до 40 % від нового будівництва. Тоді з врахуванням демонтажу економія при капітальному ремонті на 1000 м<sup>2</sup> в порівнянні з новим будівництвом може складати 70 млн грн. Наведені кошти враховують тільки будівельні роботи. При вирішенні питання необхідності капітального ремонту, реконструкції або нового будівництва за традиційною процедурою є необхідність в спеціальному обстеженні, складанні варіантів, кошторисів і ТЕО, на основі яких і приймається рішення. Це дуже довготривалі і дорогі процедури навіть при складанні кошторисів в укрупнених показниках.

У таких умовах з'являється нагальна потреба в спрощеній процедурі визначення необхідності і ефективності експлуатаційних втручань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема оптимізації витрат на утримання, ремонт і реконструкцію протягом життєвого циклу моста завжди була центральною в теорії експлуатації. Всі дослідники цієї оптимізаційної задачі сходяться в думці, що цільова функція задачі є нелінійною, зростаючою з часом, по мірі того як деградують елементи

споруди. Ця задача сьогодні принципово вирішена. Є багато наукових публікацій, особливо закордонних [4, 5, 7, 8], в яких досліджується економічна доцільність продовження експлуатації моста. В загальному вигляді – це оптимізаційна задача, де необхідно відшукати таку стратегію експлуатації, в якій приведені витрати сягають мінімуму:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $C$  – цільова функція;

$C_i$  – складові вартості життєвого циклу;

$n$  – кількість складових вартості життєвого циклу.

Наведемо основні складові вартості життєвого циклу:

- $C_1$  – витрати на будівництво споруди;
- $C_2$  – поточні витрати на моніторинг і утримання;
- $C_3$  – транспортні витрати;
- $C_4$  – транспортні витрати, викликані затримками руху під час виконання ремонтних робіт або реконструкції;
- $C_5$  – інші витрати користувачів дороги;
- $C_6$  – соціальні витрати, викликані можливою аварією споруди;
- $C_7$  – витрати на охорону навколишнього середовища;



-  $C_8$  – витрати власника споруди на матеріально-технічну базу та адміністрування.

У світі широкого розповсюдження набули Системи Управління Мостоми (СУМ, англ.: BMS) [9], які у своїй більшості мають модуль оптимізації експлуатаційних витрат. Модель, згадана вище, за якою можливо спрогнозувати доцільність ремонту/ капітального ремонту/ реконструкції або нового будівництва та вирішити оптимізаційну задачу, має низку суттєвих недоліків, які ускладнюють її використання в рамках програмного комплексу, що обробляє технічну інформацію про стан споруди. По-перше, в базі даних відсутня більшість із наведених вище витрат. По-друге, для визначення витрат на будівництво моста попередньо необхідно скласти проект капітального ремонту/ реконструкції або проект нової споруди для техніко-економічного порівняння.

**Визначення мети та задачі досліджень.** Метою роботи, поданої нижче, є теоретичне дослідження оптимізації витрат на утримання, капітальний ремонт, реконструкцію та нове будівництво протягом життєвого циклу автодорожніх мостів.

Мотивацією дослідження є принципова важливість оптимізації витрат на утримання мостів для покращення їх технічного стану та підтримання дорожньо-транспортної мережі в роботоспроможному стані.

**Модель оцінки ефективності експлуатаційних втручань.** Пропонується підхід доцільності виконання капітального ремонту, реконструкції або нового будівництва мостів, який базується на даних програмного комплексу АЕСУМ Укравтодору України [1] та нормативному документі системи експлуатації автодорожніх мостів ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2013 [6].

Вводиться критерій ефективності ремонтних заходів прогнотических будов

мостів, що знаходяться в п'ятому експлуатаційному стані, згідно з класифікацією [6, табл. 4.1]. Науково-технічним базисом моделі є такі два твердження:

1. Визначальними параметрами з бази даних АЕСУМ для розбудови критерію доцільності приймаються показники технічного стану споруди [6]: інтенсивність відмов  $\lambda$  та експертна оцінка технічного стану споруди  $E$  (рейтинг).

2. Формалізованим критерієм доцільності подальшої експлуатації є безрозмірна величина  $K_E$  – критерій ефективності експлуатаційних втручань:

$$K_E = \frac{E}{\lambda \cdot 100}, \quad (2)$$

де  $E$  – експертна оцінка технічного стану моста (рейтинг);

$\lambda$  – інтенсивність відмов (швидкість деградації).

Експертна оцінка  $E$  технічного стану моста (рейтинг) [6] визначається за формулою

$$E = \frac{80(5 - \sum_{i=1}^{i=7} \alpha_i D_i)}{4} + 20, \quad (3)$$

де  $D_i$  – номер експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди згідно з [6];

$\alpha_i$  – коефіцієнти впливу стану  $i$ -го елемента на загальний стан споруди (нормалізовані коефіцієнти ваги),  $i = 1, 2, \dots, 7$ .

**Обґрунтування граничних значень критеріїв моделі.** Для визначення граничних значень використовуються статистичні оцінки вибірки термінів служби автодорожніх залізобетонних мостів України [2, 3]. Отримані за формулою (2) величини коефіцієнта ефективності  $K_E$  для середніх значень інтенсивності відмов подано в табл. 1.

Таблиця 1

Поділ мостів на групи за значенням коефіцієнта ефективності

Інтенсивність відмов	Критерій ефективності (E=39-20)
0,028	13-7
0,030	12-7
0,036	10-6
0,044	8-5

Отримані граничні значення коефіцієнта ефективності експлуатаційних втручань (табл. 1) слугують для формулювання рекомендації щодо

капітального ремонту/реконструкції або нового будівництва для автодорожніх мостів у п'ятому технічному стані (табл. 2).

Таблиця 2

Поділ мостів на групи за значенням коефіцієнта ефективності

Група А	Група Б	Група В
$K_E < 8$	$8 \leq K_E < 14$	$K_E \geq 14$
Приймається рішення про продовження експлуатації моста. Призначається капітальний ремонт або реконструкція	Рішення про припинення/продовження експлуатації моста приймається шляхом спеціального обстеження та експертного обґрунтування	Приймається рішення про припинення експлуатації моста

Алгоритм визначення доцільності капітального ремонту/реконструкції або нового будівництва автодорожніх мостів:

- з історії експлуатації визначається інтенсивність відмов  $\lambda$ ;

- за нормативним документом експлуатації мостів ДСТУ-Н [6] визначається експертна оцінка (рейтинг) технічного стану споруди  $E$  за формулою (3) на основі натурних обстежень;

- за формулою (2) визначається критерій ефективності експлуатаційних втручань;

- за значенням  $K_E$  встановлюють необхідність капітального ремонту/реконструкції або припинення експлуатації і необхідності в новому будівництві автодорожнього моста.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Виконане теоретичне

дослідження оптимізації витрат на утримання, капітальний ремонт, реконструкцію та нове будівництво протягом життєвого циклу автодорожніх мостів показало необхідність в спрощеній процедурі визначення виду експлуатаційних заходів, орієнтованій на автоматизоване прийняття рішень.

Практичним результатом дослідження є критерій ефективності експлуатаційних втручань, що дає числову оцінку, виражену в безрозмірних одиницях, доцільності капітального ремонту/реконструкції або нового будівництва автодорожніх мостів.

Критерій дозволяє прогнозувати необхідність капітального ремонту/реконструкції або нового будівництва при постійному значенні інтенсивності відмов для мостів всіх типів. Введений критерій доцільності в 2015 році був реалізований в ПК Укравтодору АЕСУМ. Застосування

критерію ефективності для вирішення проблеми ремонту, реконструкції або нового ремонту демонструє суттєвий економічний ефект за рахунок того, що відпадає необхідність попередньої розробки проектів та відповідних кошторисів.

Ця робота була виконана під керівництвом доктора технічних наук, професора А. І. Лантуха-Лященко Висловлюю йому мою щирю подяку.

### *Список використаних джерел*

1. Боднар, Л. П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку [Текст] / Л. П. Боднар // Дороги і мости: зб. наук. праць. – К.: ДерждорНДІ, 2010. – Вип. 12. – С. 31-39.
2. Давиденко, О. О. Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України [Текст] / О. О. Давиденко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 10. – С. 4-12.
3. Давиденко, О. О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд [Текст] / О. О. Давиденко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 167. – С. 88-96.
4. Дехтяр, А. С. Оптимальна експлуатація залізобетонних мостів [Текст] / А. С. Дехтяр // Системні методи керування, технології та організації виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів. – 2001. – Вип. 12. – С. 385-392.
5. Дехтяр, А. С. Планування експлуатації залізобетонних мостів [Текст] / А. С. Дехтяр // Зб. наук. праць V Наук. міжнар. симпоз. “Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій”. – Львів, 2002. – №5. – С. 162-168.
6. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2013. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів [Текст]. – [Чинні від 2013-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2013. – 116 с. – (Національний стандарт України).
7. Evaluation of Life Cycle Cost. Analysis Methodologies / Senthil Kumaran Durairaj, S.K. Ong, A.Y.C. Nee and R.V.H. Tan // Corporate Environmental Strategy, Vol. 9, No. 1, 2002. – P. 30-39.
8. Jutila A., Sundquist H. ETSI PROJECT (Stage 1). Bridge Life Cycle Optimisation [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://etsi.aalto.fi/Etsi3/PDF/Reports/ETSI\\_Stage1.pdf](http://etsi.aalto.fi/Etsi3/PDF/Reports/ETSI_Stage1.pdf).
9. Zanyar Mirzaei, Bryan T. Adey, Leo Klatter, Jung S. Kong. Overview of existing Bridge Management Systems – Report by the IABMAS Bridge Management Committee [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.f.waseda.jp/akiyama617/rIABMAS/resources/IABMAS-BMC-BMS-Report-20120717.pdf>.

---

Давиденко Олександр Олександрович, аспірант, асистент кафедри мостів та тунелів Національного транспортного університету. Тел. (050) 471-33-99. E-mail: [oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua](mailto:oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua). [orcid.org/0000-0003-0176-3256](https://orcid.org/0000-0003-0176-3256).

Davydenko Aleksandr, graduate student, Department of Bridge and Tunnel Engineering, National Transport University. Tel. (050) 471-33-99. E-mail: [oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua](mailto:oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua). [orcid.org/0000-0003-0176-3256](https://orcid.org/0000-0003-0176-3256).

Стаття прийнята 26.06.2017 р.

УДК 624.073.5

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛЕГКОБЕТОННИХ КОМБІНОВАНИХ ПЛИТ ЗА НЕКЛАСИЧНОЮ ЗСУВНОЮ МОДЕЛЛЮ**

Д-р техн. наук О. П. Воскобійник, асп. О. В. Череднікова (ПолтНТУ)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕГКОБЕТОННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ПЛИТ ПО НЕКЛАССИЧЕСКОЙ СДВИГОВОЙ МОДЕЛИ**

Д-р техн. наук О. П. Воскобойник, асп. А. В. Чередникова (ПолтНТУ)

**A DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF STRESS-STRAINED STATE OF LIGHT CONCRETE COMBINED SLABS FOR NON-CLASSICAL SHEAR MODEL**

Dr. sc. Sciences O. P. Voskobiinyk, graduate student O. V. Cherednikova

*Доопрацьовано некласичну зсувну модель визначення фізико-механічних характеристик поперечних перерізів неоднорідної структури і застосовано її для розрахунку легкобетонних комбінованих плит із профільованим настилом. Розрахунок за універсальною зсувною моделлю дає змогу визначити параметри напружено-деформованого стану у будь-якій точці зразка плити та дослідити їх зміну при різних умовах навантаження.*

**Ключові слова:** легкобетонні комбіновані плити, депланація, ітераційна модель, деформації зсуву, згин.

*Доработана неклассическая сдвиговая модель определения физико-механических характеристик поперечных сечений неоднородной структуры и применена для расчета легкобетонных комбинированных плит с профилированным настилом. Расчет по универсальной сдвиговой модели позволяет определить параметры напряженно-деформированного состояния в любой точке образца плиты и исследовать их изменение при различных условиях нагрузки.*

**Ключевые слова:** легкобетонные комбинированные плиты, депланация, итерационная модель, сдвиговые деформации, изгиб.

*The non-classical shear model for determination of the parameters of stress-strained state (SSS) of slabs with a non-uniform cross-section was improved. The improvement concerned the expressions for determination of the stresses functions of trough-thickness distribution of the cross-section and the physical and mechanical characteristics of the cross-sections. The holes into the cross-section were account for these obtained mathematical expressions. For this purpose, with the help of the apparatus of generalized functions, a discrete function is introduced which allows determining the width of the cross-section at the appropriate trough-length coordinate. After inputting the width function, the subintegral expressions of the stress distribution functions at the trough-length of the cross were converted and the corresponding integrals were found. The executed transformations allowed to correct the error that arose in the calculation of slabs in a non-classical shear model with holes in the cross-section. The refined model is used for calculation of light concrete combined slabs with profiled steel sheeting. The performed calculations allowed to defined new features in the distribution of the parameters of the stress-strained state, such as the*

*change of the trough-length distribution of stresses of the cross-section and the length distribution of stresses of the slab. They also confirmed the possibility of applying a refined non-classical shear model to calculate light concrete combined slabs, and studying the parameters of the stress-strained state at any point and under different loading and fixing conditions.*

**Keywords:** *light concrete combined slabs, the iteration model, warping, shear deformation, bending.*

**Вступ.** На сьогоднішній день в Україні гостро постає питання енергозбереження в будівництві. Тому використання плит перекриття з легкого бетону з профільованим настилом, як конструктивно-теплоізоляційного матеріалу, є досить актуальним завданням. Легкобетонні комбіновані плити з профільованим настилом [12, 13] являють собою неоднорідні композитні конструкції, що поєднують у собі сталеві профільовані листи та легкі (в тому числі теплоізоляційні) бетони [14], які працюють сумісно у складі перекриттів (покриттів) будівель, забезпечуючи несучу та огорожувальну (теплозахисну) функції [15]. Тому необхідно мати надійні та доведені до практичного застосування методи розрахунку, які б ураховували неоднорідну структуру елементів конструкцій, реальні схеми їх завантаження, крайові умови тощо. Від урахування цих факторів залежить правильність визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) таких конструктивних елементів. Проте параметри НДС суттєво залежать від впливу характерних для комбінованих конструкцій деформацій поперечного зсуву. Ці деформації викликають депланацію поперечних перерізів і можуть бути зумовлені як фізико-механічними та геометричними його характеристиками, так і характером навантаження й умовами закріплення. Тому модель деформування легкобетонних плит, яка базується на гіпотезі плоских перерізів, може виявитися непридатною для розрахунку плит з неоднорідною або композитною будовою поперечного перерізу. Отже, є актуальним розроблення точного розрахунку таких

конструкцій, що своєю чергою потребує застосування неklasичних моделей, які враховують деформації поперечного зсуву та неоднорідність будови плитного елемента по перерізу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Створенню неklasичних моделей розрахунку з урахуванням деформацій поперечного зсуву для неоднорідних конструкцій присвячені роботи Тимошенка С.П. [11], Амбарцумяна С.О. [1], Григолюка Е.І. [3], Рейсснера Е. [10], Reddy J. [9], Carrera E. [4], Піскунова В. Г., Горика О. В., Череднікова В.М. [2, 6, 7, 8] та інших авторів. Проте однією із основних проблем, що стримують їх широке використання для розрахунку легкобетонних комбінованих плит з профільованим настилом, є складність визначення фізико-механічних характеристик поперечних перерізів.

Розробленням універсальних підходів щодо визначення фізико-механічних характеристик поперечних перерізів займалися Піскунов В. Г., Горик О. В., Серов М. І., Ляхов О.Л. та Чередніков В.М., але в їхній моделі не врахований коректний перерахунок ширини поперечного перерізу при наявності в перерізі пустот, що є характерним для перерізів комбінованих плит [13]. Проте запропоновані в [2, 6, 7, 8] підходи можуть служити підґрунтям для розроблення методів визначення параметрів напружено-деформованого стану легкобетонних комбінованих плит із профільованим настилом.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Основною метою даного дослідження є удосконалення неklasичної зсувної моделі [2, 6, 7, 8] для врахування порожнин і коректного визначення ширини поперечного перерізу та її застосування для

розрахунку легкобетонних комбінованих плит із профільованим настилом.

Застосовуючи сучасні аналітичні методи, зокрема методи узагальнених функцій, можна реалізувати прикладну (інженерну) методику розрахунку неоднорідних конструкцій. При цьому така методика може ґрунтуватися як на гіпотезі плоских перерізів, так і на гіпотезах, що враховують депланації поперечних перерізів. На основі таких методів у роботах [2, 6, 7, 8] була побудована депланаційна ітераційна модель. Однак, у цих роботах не приділено належної уваги методам урахування неоднорідності поперечного перерізу і визначення його фізико-механічних характеристик (ФМХПП), що є метою даної роботи.

**Основна частина дослідження**

*Вихідні умови.* Розглянемо елемент легкобетонної комбінованої плити з неоднорідною (композитною) структурою поперечного перерізу (рис. 1). Розташу-

вання початку координат за висотою перерізу може бути довільним.

Нехай у плитному елементі є включення – фази матеріалу, які відрізняються фізико-механічними властивостями і зв'язані нерозривністю переміщень на границях фаз. Характеристики матеріалів і розміри фаз можна задавати так, щоб змодельовати різноманітну взаємодію на границях фаз, наприклад, клейові з'єднання, тріщини, відсутність з'єднання і т. ін.

Змодельовано переріз плити таким чином, щоб на рівні довільної координати  $z$  його структуру утворювали б тільки прямокутники (рис. 2). Границі кожної ділянки (фази)  $k = 1, 2, \dots, n$  визначаються геометричними параметрами ( $u_{l_k}, u_{n_k}, z_{H_k}, z_{\theta_k}$ ), а властивості матеріалу – фізико-механічними характеристиками (модулем пружності  $E_k$  і зсуву  $G_k$ ). Загальна кількість фаз дорівнює  $n$ .

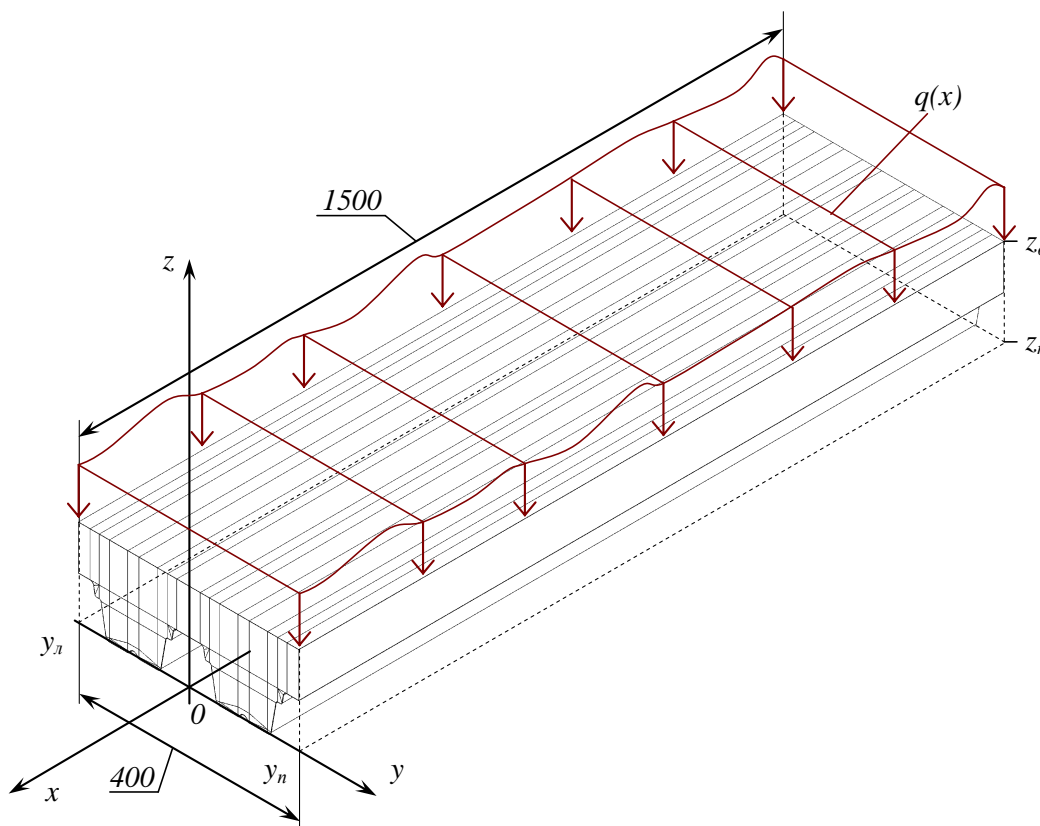


Рис. 1. Конструкція розрахункового зразка легкобетонної плити з профільованим настилом

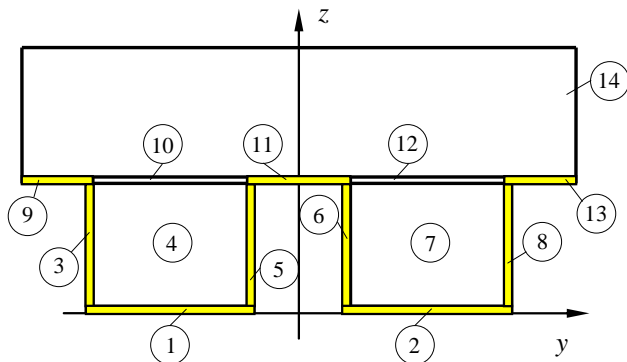


Рис. 2. Апроксимований переріз легкобетонної плити з профільованим настилом

Некласична зсувна модель будується в декілька етапів. На першому етапі відмовляються від гіпотези про суцільність і однорідність матеріалів, але зберігають гіпотезу плоских перерізів. Співвідношення, що описують деформований стан на першому етапі, не відрізняються від співвідношень опору матеріалів. Але, коли розглядається напружений стан, то в ньому виникають зміни, що викликані неоднорідною будовою перерізу. Внаслідок того що перший етап базується на гіпотезі плоских перерізів, а співвідношення, які при цьому описують деформований стан, не відрізняються від співвідношень опору матеріалів, він названий **класичною моделлю НДС**. Удосконалення некласичної моделі почнемо саме з класичної моделі.

Будемо вважати напружено-деформований стан лінійним (гіпотеза плоских перерізів). Вирази для визначення нормальних  $\sigma_x$  і дотичних  $\tau_{zx} = \tau_{xz}$

напружень, які є функціями трьох координат  $x, y, z$ , набувають вигляду [6, 7]:

$$\sigma_x(x, y, z) = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} E(y, z) \xi_0(z); \quad (1)$$

$$\tau_{xz}(x, z) = \frac{d^3 w(x)}{dx^3} f_0(z).$$

Вирази (1) за структурою відповідають аналогічним формулам опору матеріалів з тією лише відмінністю, що враховують неоднорідність поперечного перерізу. У цих виразах  $E(y, z)$  – функція розподілу модулів пружності по поперечному перерізу;  $w(x)$  – прогин плити, що згинається, який можна визначити з відомих умов закріплення балки і навантаження за формулами опору матеріалів.

На відміну від співвідношень, наведених у [2, 6, 7, 8] для  $b(z)$ , в даному випадку ширина поперечного перерізу буде визначатися з виразу:

$$b(z) = \sum_{m=1}^n b_m \left( \theta(z - z_{H_m}) - \theta(z - z_{B_m}) \right), \quad (2)$$

де  $b_m$  – ширина фази,  $b_m = y_{n_m} - y_{l_m}$ .

**Некласична модель.** У роботах [2, 6, 7, 8] було розроблено депланаційну ітераційну модель згину композитних плитних елементів. Розглянемо

знаходження коефіцієнтів жорсткості і функцій розподілу напружень за висотою перерізу тільки для першої ітерації (вищі ітерації виконують аналогічно).

Відповідно до [2, 6, 7, 8] нормальні і дотичні напруження визначаються такими

співвідношеннями:

$$\sigma_x(x, y, z) = E(y, z) \left( \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \xi_0(z) - \frac{d^2 \chi(x)}{dx^2} \xi_I(z) \right); \quad (3)$$

$$\tau_{xz}(x, z) = \frac{d^3 w(x)}{dx^3} f_0(z) - \frac{d^3 \chi(x)}{dx^3} f_I(z),$$

де  $\xi_0(z)$  та  $f_0(z)$  – функції, що відповідають виразам класичної моделі, поданої у [12];

$\chi(x)$  – нова шукана функція, пов'язана з урахуванням деформацій зсуву та депланацією перерізу;

$\xi_I(z)$  і  $f_I(z)$  – функції розподілу нормальних і дотичних напружень за

висотою перерізу, які також обумовлені урахуванням деформацій зсуву. Зупинимося на їх знаходженні докладніше.

Структура формул  $\xi_I(z)$  і  $f_I(z)$ , як і аналогічних функцій для вищих ітерацій, схожа зі структурою формул  $\xi_0(z)$  і  $f_0(z)$ :

$$\xi_I(z) = \frac{B_I(z_g)}{B(z_g)} - \psi_I(z); \quad (4)$$

$$f_I(z) = \frac{1}{b(z)} \left( B_I(z) - \frac{B_I(z_g)}{B(z_g)} B(z) \right), \quad (5)$$

де функції  $\psi_I(z)$  та  $B_I(z)$  задаються виразами:

$$\psi_I(z) = \frac{1}{b(z)} \int_{z_n}^z \int_{y_n}^{y_n} \frac{f_0(z)}{G(y, z)} dy dz; \quad (6)$$

$$B_I(z) = \int_{z_n}^z \int_{y_n}^{y_n} E(y, z) \psi_I(z) dy dz. \quad (7)$$

Щоб знайти ці інтеграли, знову скористаємося правилом інтегрування узагальненої функції Хевісайда та перетвореннями, аналогічними до виведення формули за некласичною моделлю, яка наведена [12]:

$$\psi_I(z) = \frac{1}{b(z)^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{b_i b_j E_j}{G_i} \left( \psi_{IB}(z)_{i,j} - \frac{B_0(z_g)}{B(z_g)} \psi_{Ib}(z)_{i,j} \right); \quad (8)$$

$$B_I(z) = \frac{1}{b(z)^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{b_i b_j b_k E_i E_k}{G_j} \times \left( B_{IB}(z)_{i,j,k} - \frac{B_0(z_g)}{B(z_g)} B_{Ib}(z)_{i,j,k} \right), \quad (9)$$



де функції  $\psi_{IB}(z)_{i,j}$ ,  $\psi_{Ib}(z)_{i,j}$  і  $B_{IB}(z)_{i,j,k}$ ,  $B_{Ib}(z)_{i,j,k}$  дорівнюють:

$$\begin{aligned} \psi_{IB}(z)_{i,j} &= \theta(z - z_{H_i}) \left( \theta(z_{H_i} - z_{H_j}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \psi_0(z) dz dz - \theta(z_{H_i} - z_{\theta_j}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \psi_0(z) dz dz \right) - \\ &\quad - \theta(z - z_{\theta_i}) \left( \theta(z_{\theta_i} - z_{\theta_j}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \psi_0(z) dz dz - \theta(z_{H_i} - z_{\theta_j}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \psi_0(z) dz dz \right); \\ \psi_{Ib}(z)_{i,j} &= \theta(z - z_{H_i}) \left( \theta(z_{H_i} - z_{H_j}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z dz dz - \theta(z_{H_i} - z_{\theta_j}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \psi_0(z) dz dz \right) - \\ &\quad - \theta(z - z_{\theta_i}) \left( \theta(z_{\theta_i} - z_{\theta_j}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z dz dz - \theta(z_{H_i} - z_{\theta_j}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z dz dz \right); \\ B_{IB}(z)_{i,j,k} &= \theta(z - z_{H_i}) \left( \theta(z_{H_i} - z_{H_j}) \left[ \theta(z_{H_j} - z_{H_k}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{H_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz \right] - \theta(z_{H_i} - z_{\theta_j}) \left[ \theta(z_{\theta_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz \right] \right) - \theta(z - z_{\theta_i}) \times \\ &\quad \times \left( \theta(z_{\theta_i} - z_{\theta_j}) \left[ \theta(z_{H_j} - z_{H_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{H_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz \right] - \right. \\ &\quad \left. - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz \right] - \theta(z_{H_i} - z_{\theta_j}) \left[ \theta(z_{\theta_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz - \right. \\ &\quad \left. - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z \psi_0(z) dz dz dz \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{1b}(z)_{i,j,k} = & \theta(z - z_{H_i}) \times \left( \theta(z_{H_i} - z_{H_j}) \left[ \theta(z_{H_j} - z_{H_k}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{H_k}}^z dzdzdz - \right. \right. \\
 & - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z dzdzdz \left. \right] - \theta(z_{H_i} - z_{\theta_j}) \left[ \theta(z_{\theta_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z dzdzdz - \right. \\
 & \left. \left. - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{H_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z dzdzdz \right] \right) - \theta(z - z_{\theta_i}) \times \\
 & \times \left( \theta(z_{\theta_i} - z_{\theta_j}) \left[ \theta(z_{H_j} - z_{H_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{H_k}}^z dzdzdz - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{H_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z dzdzdz \right] - \right. \\
 & \left. - \theta(z_{H_i} - z_{\theta_j}) \left[ \theta(z_{\theta_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z dzdzdz - \theta(z_{H_j} - z_{\theta_k}) \int_{z_{\theta_i}}^z \int_{z_{\theta_j}}^z \int_{z_{\theta_k}}^z dzdzdz \right] \right);
 \end{aligned}$$

Аналогічні процедури можуть бути побудовані для будь-якої ітерації.

Для знаходження ФМХПП  $D_{12}$  і  $D_{22}$  [2, 6, 7, 8] використовується формула (8), а самі  $D_{12}$  та  $D_{22}$  знаходяться чисельно.

Обчислення функцій розподілу напружень за висотою перерізу, характеристик жорсткості та параметрів НДС виконувалося за допомогою програмного комплексу Mathcad. Розглядався зразок, поданий на рис. 1 і 2 з такими характеристиками: до плити прикладалося рівномірно розподілене навантаження амплітудою  $q = 8444$  Н/м, довжина прольоту плити 1,4 м, матеріал включень 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 13 – оцинкована сталь з модулем пружності  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа і модулем зсуву  $G = 0,8 \cdot 10^5$  МПа; матеріал включень 4, 7, 10, 12, 14 – полістиролбетон з модулем пружності  $E = 480$  МПа і модулем зсуву  $G = 218$  МПа. У результаті розрахунку були отримані такі значення коефіцієнтів жорсткості для плити (рис. 1):

$$D_{00} = -1,429685057574169 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}^2;$$

$$D_{01} = 5,816237083351402 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}^4;$$

$$D_{11} = -1,924595852722144 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м}^6.$$

У підсумку оброблення результатів розрахунку було отримано широкий спектр графічних та аналітичних даних (напружень, прогинів). Наведемо деякі з них. На рис. 3 показано тривимірну діаграму розподілу дотичних напружень по поперечному перерізу плити на лівій опорі ( $x = 0$  м) за неklasичною моделлю. Для побудови діаграми переріз розбивався на розрахункові точки по осях  $z$  та  $y$ . На кожен вісь приймалося по 100 розрахункових точок. Загальна кількість розрахункових точок – 10000. Діаграма дає змогу наочно уявити розподіл напружень по усьому перерізу, у тому числі і стрибки напружень у зонах переходу до меншої ширини поперечного перерізу. Нульові ділянки на діаграмі відповідають порожнинам у перерізі (відсутній матеріал). У зонах переходу матеріалів відсутні стрибки напружень, що відповідає фізичній суті дотичних напружень.

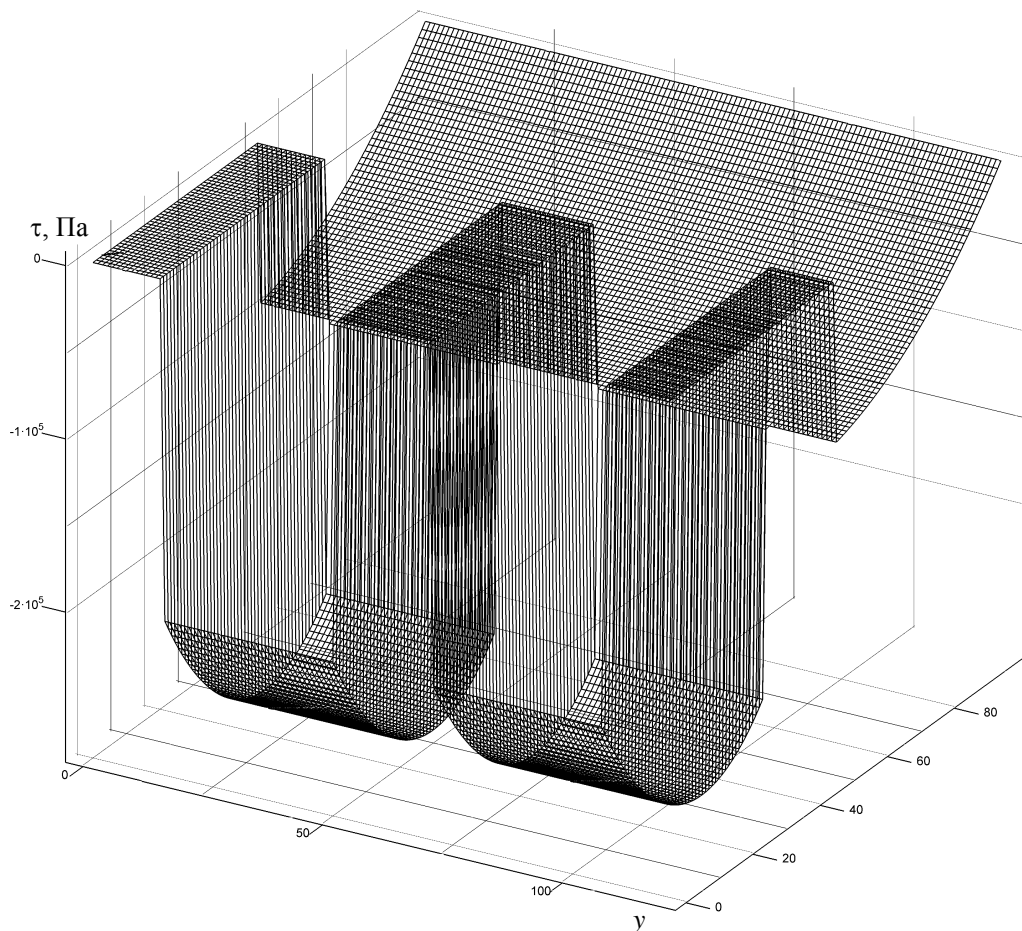


Рис. 3. Тривимірний діаграма розподілу дотичних напружень по поперечному перерізу плити на лівій опорі (верхня частина перерізу віддалена від нас)

На рис. 4 зображено тривимірну діаграму розподілу нормальних напружень по поперечному перерізу плити посередині її прольоту ( $x = 0,7$  м), що обчислені за неklasичною моделлю. Для наочності сприйняття діаграму розвернуто верхньою частиною перерізу до глядача. Кількість розрахункових точок така сама, як і для діаграми дотичних напружень. Діаграма наочно демонструє, що нормальні напруження змінюються по двох координатах перерізу, на відміну від дотичних напружень. Найбільші напруження виникають у профільованому настилі по краях перерізу. У той самий час напруження у полістиролбетоні значно менші за напруження у профнастилі і у

масштабі діаграми практично не відрізняються від нуля.

Як видно з наведених діаграм, за доопрацьованою моделлю можна отримати параметри напружено-деформованого стану легкобетонної комбінованої плити в числовому або графічному вигляді для будь-якої точки будь-якого перерізу плити та порівняти з допустимими величинами для кожного матеріалу, з яких складається конструкція.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Запропоновані авторами удосконалені методи дають змогу визначити параметри напружено-деформованого стану легкобетонних

комбінованих плит з комбінованим настилом у будь-якій точці конструкції через залежності неklasичної зсувної моделі. Запропонована в роботі модель дає змогу автоматично описати структуру поперечного перерізу та реалізувати процедури розрахунку неоднорідних

комбінованих плитних елементів із практично необмеженою кількістю фаз. Як видно з поданих формул, їх структура не залежить від кількості включень. Від кількості включень залежить лише час розрахунку, який від ітерації до ітерації зростає в геометричній прогресії.

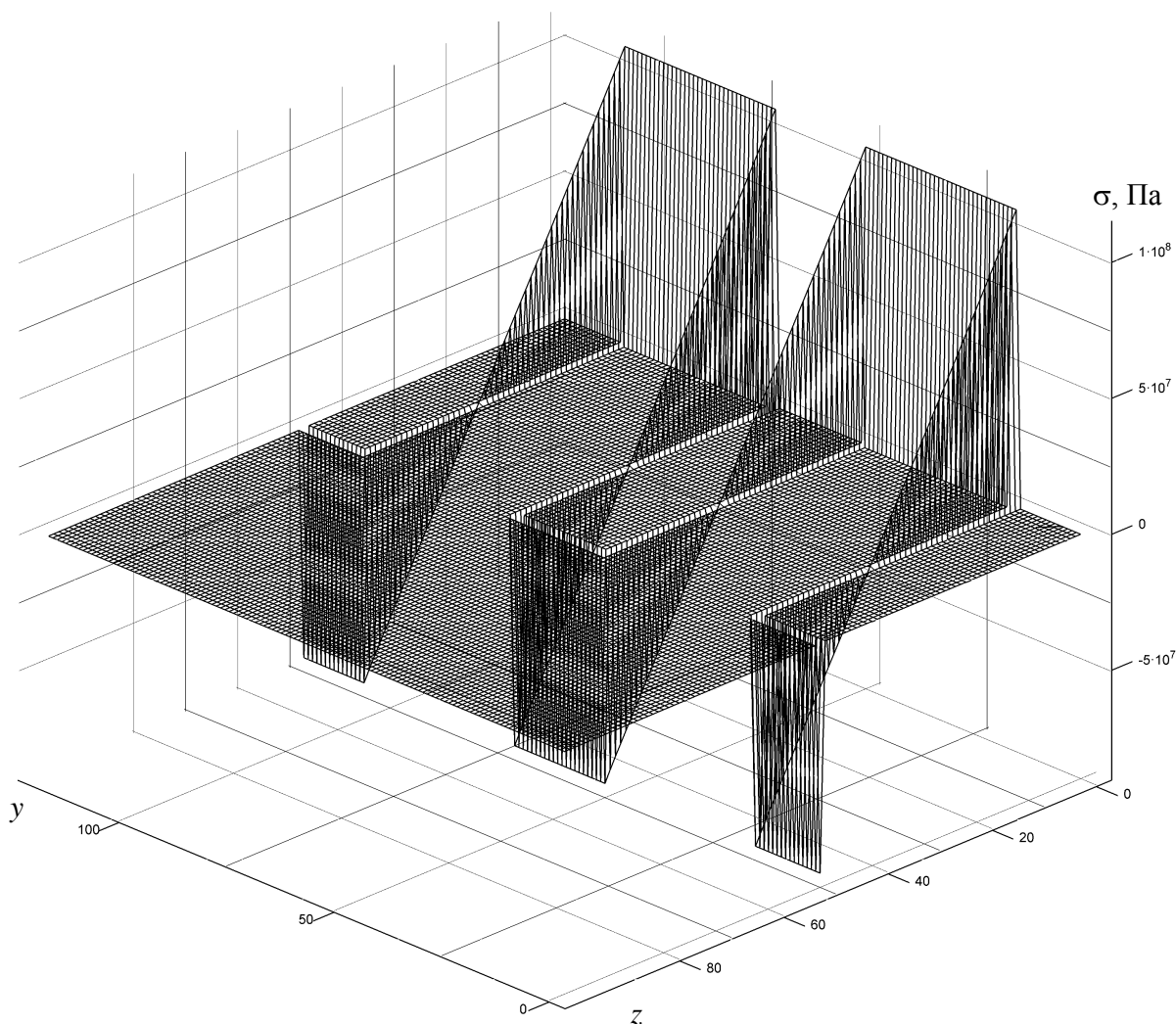


Рис. 4. Тривимірна діаграма розподілу нормальних напружень по поперечному перерізу плити посередині прольоту (верхня частина перерізу наближена до нас)

Використання запропонованої в роботі моделі є особливо актуальним для коректного розрахунку параметрів напружено-деформованого стану комбінованих плит при проектуванні конструктивних елементів, які поєднують у собі матеріали, фізико-механічні

характеристики яких суттєво (на декілька порядків) відрізняються (наприклад, при використанні як матеріалу плити надлегких – теплоізоляційних бетонів, у тому числі пінополістиролбетонів з низьким модулем пружності).

*Список використаних джерел*

1. Амбарцумян, С. А. Некоторые вопросы развития теории анизотропных слоистых оболочек [Текст] / С.А. Амбарцумян // Изв. АН Арм. ССР: сер. физ.- мат. наук. – 1964. – Т. 17, № 3. – С. 29-53.
2. Горик, О. В. Дослідження неklasичної ітераційної моделі деформування композитних брусів [Текст] / О. В. Горик // Машинознавство. – 2000. – №2. – С.18-24.
3. Григолюк, Э. И. Неклассическая теория колебаний стержней, пластин и оболочек. Итоги науки и техники [Текст] / Э. И. Григолюк, И. Т. Селезов – М. : Наука, 1972. – Т.5. – 271 с.
4. Carrera E. Developments, ideas and evaluations based upon Reissner's mixed variational theorem in the modeling of multilayered plates and shells. ASME Appl Mech Rev 2001;54(4):301–29. DOI: 10.1115/1.1385512.
5. Khdeir A, Reddy J, Librescu L. Analytical solution of a refined shear deformation theory for rectangular composite plates. Int J Solids Struct 1986;23(10):1447–63. DOI: 10.1016/0020-7683(87)90009-6.
6. Piskunov V.G., Goryk A.V., and Cherednikov V.N. Modeling of transverse shears of piecewise homogeneous composite bars using an iterative process with account of tangential loads. 2. Resolving equations and results. Mechanics of Composite Materials 2000;36;Iss.6: 445-452. DOI: 10.1023/A:1006798314569.
7. Piskunov V.G., Goryk A.V., and Cherednikov V.N. Modeling of transverse shears of piecewise homogeneous composite bars using an iterative process with account of tangential loads. 1. Construction of model. Mechanics of Composite Materials 2000; 36; Iss.4: 287-296. DOI: 10.1007/BF02262807.
8. Piskunov V.G., Goryk A.V., Lyakhov A.L., Cherednikov V.N. High-order model of the stress–strain state of composite bars and its implementation by computer algebra. Compos Struct 2000;48:169–176 DOI: 10.1016/S0263-8223(99)00091-4.
9. Reddy J. A refined nonlinear theory of plates with transverse shear deformation. Int J Solids Struct 1983;20(9):881–96. DOI: 10.1016/0020-7683(84)90056-8.
10. Reissner E. On transverse bending of plates, including the effect of transverse shear deformation. Int J Solids Struct 1975;11:569–73. DOI: 10.1016/0020-7683(75)90030-X.
11. Timoshenko, S.P. On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars // Philosophical Magazine and Journal of science. – 1921. – Vol.41, ser.6, №245. – P. 744 – 746.
12. Cherednikov V. M., Voskobiinyk O. P., Cherednikova O. V. «Evaluation of the Warping Model for Analysis of Polystyrene Concrete Slabs with Profiled Steel Sheeting.» Periodica Polytechnica Civil Engineering 2017; 61(3), pp. 483–490, 2017. <https://doi.org/10.3311/PPci.8717>.
13. Designers' Guide to Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures : 2th editions / Roger P. Johnson. – 2011. – 310 p.
14. Лещенко, М. В. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона [Текст] / М. В. Лещенко, В. А. Семко // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №8 (60). – С. 44-55. (doi: 10.5862/MCE.60.6).

15. Semko V. Effect of Bracing Systems on Overall Stability and Deformability of Cold-Formed Steel Roofing Structures / V. Semko, D. Prohorenko // Design, Fabrication and Economy of Metal Structures: International Conference Proceedings 2013, Miskolc, Hungary, April 24 – 26, 2013. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 229-234.

---

Воскобійник Олена Павлівна, д-р техн. наук, професор кафедри організації і технології будівництва та охорони праці Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050) 304-40-23.  
E-mail: elenvosko@gmail.com.

Череднікова Олександра Володимирівна, аспірант кафедри архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (095) 546-80-41. E-mail: al.chered108@gmail.com.

Voskobiinyk Olena Pavlivna, Dr. Sc. Science of building constructions, Department of organization and technology of building and health safety Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: (050) 304-40-23.

E-mail: elenvosko@gmail.com.

Cherednikova Oleksandra Volodymyrivna, Architecture and Urban Construction Department Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: (095) 546-80-41. E-mail: al.chered108@gmail.com.

Стаття прийнята 26.06.2017 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО  
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE  
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY  
TRANSPORT**

*Випуск 170*

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. № 1328 (додаток 8)).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу  
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Янченко Л.В.

Редактори Буранова Н.В., Еткало О.О., Решетилова В.В.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 27.06.2017 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн.друк. арк. 11,25. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха,7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.