



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 167

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.

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 № 2 від 28 лютого 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

Мартинів 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
Тимофєєва 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>Фирсов П. М.</i> Экспериментальные исследования кратковременной прочности сталеклеевого безанкерного соединения на акриловых модифицированных композициях	4
<i>Крутий Ю. С., Сур'янінов М. Г.</i> Фундаментальні розв'язки приведенного рівняння параметричних коливань	17
<i>Крашенінін О. С., Пономаренко О. В., Яковлев С. С.</i> Визначення стратегії технічного обслуговування та ремонту локомотивів у післянормативний період	25
<i>Гасенко А. В., Новицький О. П., Рожко В. Н.</i> Особливості створення скінченно-елементної моделі системи «Основа – віброармована ґрунтоцементна паля»	34
<i>Кекиш Н. А.</i> Повышение эффективности организации маломощных вагонопотоков при использовании системы взаимоувязанных групповых поездов	42
<i>Шмуклер В. С.</i> Новые энергетические принципы рационализации конструкций	54
<i>Воронін С. В., Скорик О. О., Коростельов Є. М.</i> Підвищення ресурсу рейок метрополітену шляхом виконання попереджувального шліфування	70
<i>Волков В. П., Грицук І. В., Каграманян А. О., Грицук Ю. В., Волков Ю. В.</i> Особливості проведення дистанційної ідентифікації транспортного засобу в системі інформаційного забезпечення життєвого циклу в умовах ITS	79
<i>Давиденко О. О.</i> Функція інтенсивності відмов елементів споруд	88
<i>Барабаш І. В., Ксьонікевич Л. М., Гаращенко Д. П.</i> Вплив багатоконпонентних добавок на ефективну в'язкість механоактивованих цементовмісних суспензій	96
<i>Доля В. К., Куш Є. І., Скрипін В. С., Власов І. Ю.</i> Формування методу вибору вантажопідйомності транспортних засобів для роботи в схемах розвезення тарно-штучних вантажів	102
<i>Шкурпела О. О.</i> Дослідження роботи асинхронного двигуна АД-906У в режимі послаблення поля	114
<i>Стоянов Е. Г., Набока А. В.</i> Математическое моделирование работы диска перекрытия, составленного из сборных железобетонных плит	120

УДК 691.58.688.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕКЛЕЕВОГО БЕЗАНКЕРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА АКРИЛОВЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

Асп. П. М. Фирсов (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОТКОЧАСНОЇ МІЦНОСТІ СТАЛЕКЛЕЙОВОГО БЕЗАНКЕРНОГО З'ЄДНАННЯ НА АКРИЛОВИХ МОДИФІКОВАНИХ КОМПОЗИЦІЯХ

Асп. П. М. Фірсов (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)

STEEL-GLUED WITHOUT ANCHOR JOINT SHORT-TERM STRENGTH EXPERIMENTAL RESERCH ON ACRYLIC MODIFIED COMPOSITIONS

Post-graduate student Pavlo Firsov

Приводятся результаты экспериментов по определению прочности безанкерного крепления технологического оборудования в случае приклейки стальных пластин к поверхности бетона модифицированными акриловыми клеями. Детально описаны методы испытаний кратковременной прочности клеевых сталебетонных соединений, а также проведены исследования по определению влияния основных технологических факторов на прочность безанкерного клеевого крепления на акриловых модифицированных композициях. Проведены экспериментальные исследования влияния класса бетона, толщины клеевого шва и других конструктивных характеристик крепежного узла на прочность адгезии. Результаты данных экспериментальных исследований могут быть использованы для разработки узлов крепления производственного оборудования и технологических линий предприятий, а также для последующего улучшения составов полимерных клеевых материалов, широко используемых в промышленном и гражданском строительстве.

Ключевые слова: безанкерное крепление, толщина стальной пластины, бетон, акриловый модифицированный клей, прочность соединения.

Наводяться результати експериментів з визначення міцності безанкерного кріплення технологічного обладнання в разі приклеювання сталевих пластин до поверхні бетону модифікованими акриловими клеями. Детально описано методи випробувань короткочасної міцності клейових сталебетонних з'єднань, а також проведені дослідження з визначення впливу основних технологічних факторів на міцність безанкерного клейового кріплення на акрилових модифікованих композиціях. Проведено експериментальні дослідження щодо впливу класу бетону, товщини клейового шва й інших конструктивних характеристик кріплення вузла на міцність адгезії. Результати даних експериментальних досліджень можуть бути використані для розроблення вузлів кріплення виробничого обладнання та технологічних ліній підприємств, а також для подальшого поліпшення складів полімерних клейових матеріалів, широко використовуваних у промисловому і цивільному будівництві.

Ключові слова: безанкерне кріплення, товщина сталеві пластины, бетон, акриловий модифікований клей, міцність з'єднання.

The central issue of the paper is the short-term adhesive strength dependence determining from the number of various technological factors and advanced acrylic composition selection for further elements constructions and without anchor joint adhesive development. The results of the experiments on determination the technological equipment without anchor joint strength, in the case of gluing steel plates to the concrete surface with modified acrylic adhesives, are conducted. Short-term strength of adhesive steel-concrete joints testing methods, as well as the determination of the main technological factors influence on the strength of without anchor joint on acrylic modified compositions, are described in detail. The experimental research on the concrete class, adhesive layer thickness and other structural fixing joint characteristics influence on the strength of adhesion are conducted. On the basis of research results, it was demonstrated that regardless from the type of the loading, the adhesive compound geometric characteristics, concrete physic and mechanical properties, the destruction of concrete-steel joint was occurred on the concrete surface. The obtained results of experimental research data can be used for attachment joints projecting and industrial technological lines development, as well as for further polymeric adhesive materials, widely applied in industrial and civil engineering, improvement.

Keywords: joint without anchor, steel plate thickness, concrete, modified acrylic adhesive, bond strength.

Вступление. Наиболее распространенными основными видами креплений технологического оборудования и производственных линий являются сварные, болтовые и анкерные соединения. Альтернативным соединением является безанкерный способ крепления. Крепление по этому способу осуществляется путем приклейки крепежных узлов или опорных частей технологического оборудования непосредственно к предварительно обработанной поверхности бетона. Для этого соединения используют любые клеи, обладающие необходимой адгезией к бетону и стали, а также высокими физико-механическими характеристиками.

Основной материал в таких соединениях – эпоксидные и акриловые клеи, так как они по своим свойствам отвечают всем необходимым требованиям, предъявляемым к клеям для создания надежных, высокопрочностных сталебетонных креплений [1-3].

Необходимым условием успешного применения безанкерных соединений сталь - бетон с использованием акриловых клеев является комплексное решение научно-исследовательской задачи, включающей исследование их кратковременной, длительной и усталостной прочности, их

проектирование, вопросы технологии их устройства (в частности приклейки крепежных узлов к поверхности бетона для крепления оборудования и различных инженерных коммуникаций), опытно-промышленная проверка в условиях производства.

На основании анализа выполненных ранее исследований конструкций безанкерных креплений технологического оборудования и инженерных коммуникаций сотрудниками кафедры теоретической и строительной механики совместно с кафедрой строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства имени А. Н. Бекетова разработана технология и рекомендации для устройства данных креплений на модифицированных акриловых клеях [4]. Технологический процесс приклейки крепежных узлов и опорных частей оборудования выполняется непосредственно после очистки поверхностей стали и бетона и приготовления клея.

Анализ последних исследований и публикаций. В научных работах [5,6] рассмотрены общие вопросы устройства и прочности безанкерных креплений на основе клеевых соединений сталь - бетон и

обобщен опыт их применения, показывающий явную перспективность такого способа крепления технологического оборудования и инженерных коммуникаций по сравнению с традиционным способом анкеровки фундаментных бетонов и заделки выпусков арматуры закладных деталей. К данному способу установки крепежных узлов относят ряд определенных достоинств, заключающихся в том, что для их установки не требуются значительные трудовые затраты для устройства соединений, разборки бетона, бурения скважин, устройства хомутов и т.п., чем достигается существенная экономия денежных средств и трудозатрат. Это особенно актуально в случаях инженерного переоборудования промышленных предприятий, где необходимо провести большое количество креплений и монтажных процессов в краткие временные рамки.

Результаты экспериментов по определению прочности крепления технологического оборудования в случае приклейки стальных пластин к поверхности бетона модифицированными акриловыми клеями на основе полиметилметакрилата (ПММА), либо в случае анкеровки, приведены в научных работах Золотова М.С., Фирсова П.М., Гарбуз А.О., Золотова С.М. [7,8]. В данных статьях проработаны теоретико-методологические и методические подходы по определению прочностных характеристик модифицированных акриловых композиций в зависимости от типа существующего или планируемого крепежного узла.

Проблематика влияния геометрических характеристик клеевого соединения, физико-механических свойств бетона, характера подготовки бетона к склеиванию на прочность адгезии соединений на акриловых композиционных материалах была исследована в ряде работ Золотова М.С., Бабаева В.Н., Складорова В.А., Золотова С.М. [9,10].

В научных работах Ru-Xiang Cheng [11] затронуты вопросы прочности адгезии акриловых композиций с бетонными, стальными и деревянными основаниями при различных температурных условиях. Данные исследования показали, что прочность данного вида клея может изменяться в широких пределах путем введения модифицирующих добавок.

Иностранные ученые Martinez M., Abenojar J., Pantoja M. [12-14], Yanmei Wang [15] детально исследовали влияние влажности и температуры на механические свойства модифицированных составов акриловых и эпоксидных композиций, а также их полимеризацию с различными современными добавками в структуре.

Исходя из этого в данный момент представляет интерес провести дальнейшие исследования влияния различного вида усилий на прочность сталеклевого безанкерного соединения на современных модифицированных акриловых клеях, а также определить зависимость прочности крепежного узла от геометрии соединения (толщина соединения, толщина клеевого слоя, толщина стальной пластины, площадь приклейки и т.п.) и ряда других технологических факторов.

Определение целей и основных задач исследования. Растущие потребности отрасли строительства в высококачественных клеевых материалах приводят к значительному увеличению требований к составу и эксплуатационным характеристикам как самих адгезивов, так и клеевых соединений.

Необходимым условием успешного применения безанкерных соединений сталь - бетон с использованием акриловых клеев является комплексное решение научно-исследовательской проблематики, включающей исследование их кратковременной, длительной и усталостной прочности, их проектирования, вопросы технологии их устройства (в частности приклейки крепежных узлов к поверхности бетона для

крепления оборудования и различных инженерных коммуникаций), опытно-промышленная проверка в условиях производства.

Основной целью данной научной работы является испытание новой акриловой композиции для промышленного склеивания материалов, а также детальное рассмотрение вопроса кратковременной прочности сталебетонного клеевого соединения при равномерном отрыве. К задачам исследования относится экспериментальная проверка прочностных данных акрилового состава при определении влияния различных геометрических характеристик соединения на прочность крепежного узла.

Основная часть исследования. В рамках научного исследования была разработана и принята для дальнейших исследований и испытаний новая акриловая композиция для безанкерного крепления металлических конструкций с бетоном, которая содержит очищенный от стабилизатора акриловый мономер, эмульсионный полимер акрилового ряда, отвердитель – перекись бензоила, ускоритель полимеризации – диметиланилин, наполнитель – кварцевый песок [16]. Применение данной композиции для безанкерного соединения металла с бетоном позволяет существенно увеличить уровень разрушающего напряжения клеевого шва в условиях действия усилий равномерного отрыва при

уменьшении толщины металлической закладной пластины.

Данная композиция отличается от подобных аналогов тем, что в качестве очищенного от стабилизатора акрилового мономера содержит метилметакрилат, а в качестве полимера акрилового ряда – эмульсионный полиметилметакрилат при следующем соотношении компонентов, мас. %:

- очищенный от стабилизатора метилметакрилат – 31,0-30,2;
- эмульсионный полиметилметакрилат – 34,5-34,8;
- отвердитель – 0,69-0,66;
- ускоритель полимеризации – 2,11-2,14;
- кварцевый песок – остаток.

Разработанная акриловая композиция при использовании в качестве клея обеспечивает повышение адгезионного контакта металла с бетоном при уменьшении толщины закладного металлического элемента в узлах безанкерного крепления, которое приводит к повышению надежности несущих конструкций зданий и сооружений при снижении материалоемкости и себестоимости в технологии строительного производства.

Эксперименты по определению кратковременной прочности соединений сталь - клей - бетон при равномерном отрыве выполнялись на образцах (рис. 1) по схеме, представленной на рис. 2.

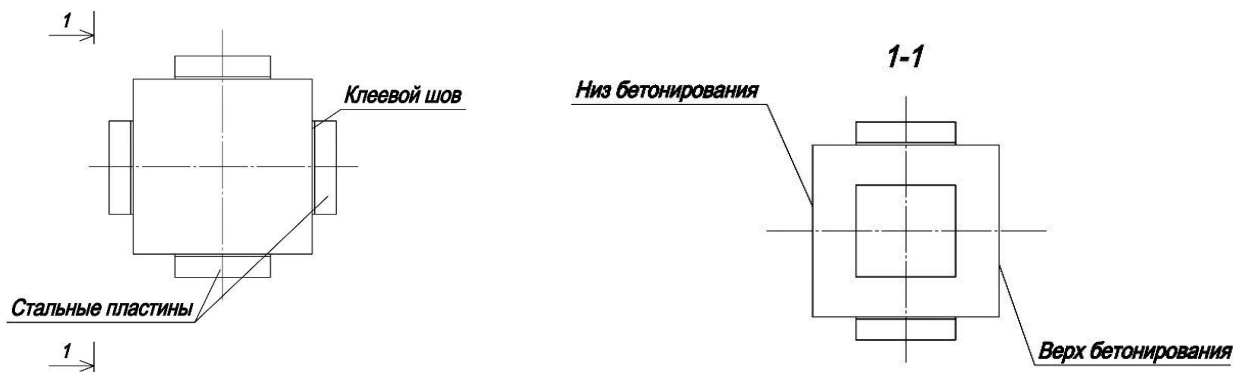


Рис. 1. Схема приклейки стальных пластин к бетонному образцу

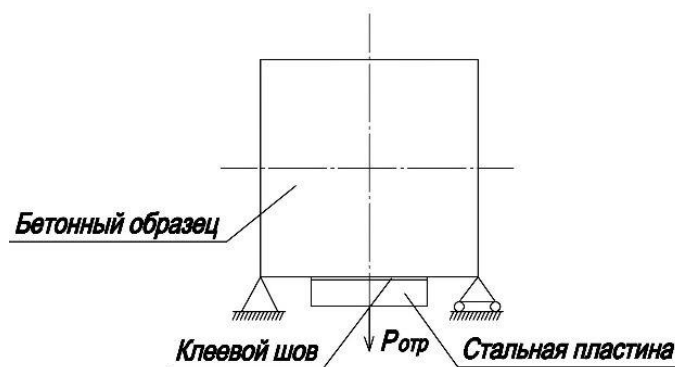


Рис. 2. Схема испытания на равномерный отрыв соединения сталь - клей - бетон

Бетонные образцы изготавливались в стандартной металлической опалубке в производственном цехе ОДО “Жилстрой-2” (Харьков) размером $100 \times 100 \times 100$ мм из бетона класса С12/15.

Для изготовления образцов крепежных узлов применялась сталь углеродистая качественная марки Ст 08 кп (ДСТУ 2834-94). Эти образцы изготавливались в виде пластин путем порезки листового проката промышленной гильотиной металлобазы ООО “Харьковметалл”. Размер в плане $a \times a = 80 \times 80$ мм, толщина $\delta_{пл} = 8$ мм.

Условная жесткость стальных пластин составила $\Delta = \delta_{пл} / a = 0,10$.

К центру пластин ручным дуговым полуавтоматическим методом были приварены болты для передачи усилий отрыва на клеевое соединение. Для получения одинаковых результатов пластины наклеивались на те стороны бетонного образца, которые находились при бетонировании в одинаковых условиях. На каждый куб наклеивались четыре пластины (рис. 1). Толщина клеевого слоя составляла $\delta_{кл} = 2$ мм.

В экспериментах использовался акриловый модифицированный клей, улучшенный состав которого был разработан при участии автора, который рекомендуется для безанкерного соединения строительных конструкций [16,

17]. Испытания образцов проводились на разрывной машине марки МР-1000 в лаборатории кафедры строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства имени А. Н. Бекетова.

В процессе испытаний определялись разрушающие усилия и характер разрушения образцов клеевых соединений.

1. *Влияние жесткости металлических пластин на прочность клеевого соединения.* Эксперименты в данном случае проводились с использованием в образцах клеевых соединений стальных пластин толщиной $\delta_{пл} = 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20$ мм при постоянных размерах в плане $a \times a = 80 \times 80$ мм.

Значения условной жесткости для указанных пластин соответственно составили $\Delta = 0,06, 0,10, 0,125, 0,15, 0,188, 0,225, 0,25$. Геометрические характеристики клеевого безанкерного соединения приведены в табл. 1.

Образцы металлических пластин изготавливались из стали марки Ст 08 кп. Бетонные образцы изготавливались в виде кубов $100 \times 100 \times 100$ мм из бетона класса С12/15. Металлические пластины приклеивались по схеме, представленной на рис. 1. Испытания клеевых соединений производились по схеме, представленной на рис. 2.

Таблиця 1

Геометрические характеристики клеевых безанкерных соединений

Размер пластины в плане $a \times a$, мм	Толщина пластины в плане $\delta_{пл}$, мм	Условная жесткость пластины $\Delta = \delta_{пл} / a$
80×80	5	0,06
80×80	8	0,10
80×80	10	0,125
80×80	12	0,15
80×80	15	0,188
80×80	18	0,225
80×80	20	0,25

2. Влияние толщины клеевого шва. Эксперименты по определению влияния толщины клеевого слоя на прочность соединения сталь - клей - бетон модифицированными акриловыми клеями проводились следующим образом. В образцах клеевых соединений использовались стальные пластины размером $a \times a = 80 \times 80$ мм и $\delta_{пл} = 8$ мм. Условная жесткость $\Delta = 0,10$. Толщины клеевого слоя принимались $\delta_{кл} = 2, 4, 8, 12, 16$ мм. Бетонные образцы принимались аналогично предыдущим испытаниям. Схемы приклейки пластин и испытаний образцов клеевых соединений представлены на рис. 1 и 2.

3. Влияние степени удаления пластины от края строительной конструкции на прочность клеевого соединения. Для определения влияния этого фактора на прочность соединения сталь - клей - бетон

в образцах клеевых соединений использовались пластины размером в плане $a \times a = 60 \times 60$ мм, 80×80 мм, 100×100 мм и 120×120 мм при толщине металлических пластин $\delta_{кл} = 8$ мм. Значения условной жесткости равны $\Delta = 0,13, 0,10, 0,08$ и $0,067$ соответственно. В качестве бетонных образцов изготавливались кубы размером $b \times b \times b = 70 \times 70 \times 70$ мм; $90 \times 90 \times 90$ мм; $100 \times 100 \times 100$ мм; $120 \times 120 \times 120$ мм; $150 \times 150 \times 150$ мм; $180 \times 180 \times 180$ мм; $200 \times 200 \times 200$ мм; $250 \times 250 \times 250$ мм; $300 \times 300 \times 300$ мм; $350 \times 350 \times 350$ мм. В данных образцах использовался бетон класса C12/15.

Геометрические характеристики клеевых соединений приведены в табл. 2. Схемы наклейки пластин и испытаний на равномерный отрыв представлены на рис. 1 и 2.

Таблиця 2

Геометрические характеристики клеевых безанкерных соединений

Размер бетонного образца в плане $b \times b$, мм	Размеры металлических пластин в плане $a \times a$, мм							
	$a \times a = 60 \times 60$		$a \times a = 80 \times 80$		$a \times a = 100 \times 100$		$a \times a = 120 \times 120$	
	b / a	F_{δ} / F_{np}	b / a	F_{δ} / F_{np}	b / a	F_{δ} / F_{np}	b / a	F_{δ} / F_{np}
70×70	1,16	1,36	-	-	-	-	-	-
90×90	1,50	2,25	1,13	1,27	-	-	-	-
100×100	1,67	2,78	1,25	1,56	1,00	1,00	-	-
120×120	2,00	4,00	1,50	2,25	1,20	1,44	1,00	1,00
150×150	2,50	6,25	1,88	3,52	1,50	2,25	1,25	1,56
180×180	3,00	9,00	2,25	5,06	1,80	3,24	1,50	2,25
200×200	3,33	11,11	2,50	6,25	2,00	4,00	1,67	2,78
250×250	-	-	3,13	9,77	2,50	6,25	2,08	4,34
300×300	-	-	-	-	3,00	9,00	2,50	6,25
350×350	-	-	-	-	-	-	2,92	8,51

4. Влияние класса бетона на прочность клеевого безанкерного соединения сталь-бетон. Для определения влияния класса бетона на прочность соединения сталь - клей - бетон образцы клеевых соединений изготавливались следующим образом. Применялись стальные пластины размером $a \times a = 80 \times 80$ мм и $\delta_{пл} = 8$ мм. Условная жесткость $\Delta = 0,10$. Бетонные образцы изготавливались в виде кубов из бетона класса С8/10, С12/15, С16/20, С20/25 и С25/30.

Образцы клеевых соединений по определению влияния класса бетона на

прочность клеевого соединения сталь - бетон, подготовленных к испытаниям, представлены на рис. 3.

Результаты экспериментов по определению влияния жесткости металлических пластин на прочность клеевых соединений сталь - бетон приведены в табл. 3. Испытания образцов проводились на разрывной машине марки МР-1000 (рис. 4), при этом разрушение клеевых соединений независимо от жесткости пластин происходило по бетону.



Рис. 3. Образцы клеевых соединений по определению влияния класса бетона на прочность соединения сталь - клей - бетон на акриловых клеях



Рис. 4. Испытания образцов клеевых соединений на разрывной машине марки МР-1000 в лаборатории кафедры строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

Результаты испытаний клеевых соединений сталь - бетон на равномерный отрыв в зависимости от жесткости стальных пластин

Условная жесткость пластины Δ	Толщина пластины $\delta_{пл}$, мм	Разброс данных прочности, МПа	Среднее значение, МПа
0,060	5	0,51-0,60	0,56
0,100	8	1,02-1,22	1,17
0,125	10	1,76-2,07	1,92
0,150	12	2,41-2,68	2,56
0,188	15	2,64-3,10	2,88
0,225	18	2,97-3,36	3,12
0,250	20	3,01-3,48	3,18

По результатам эксперимента построен график изменения прочности клеевого соединения при равномерном отрыве металлических пластин, различных по жесткости (рис. 5).

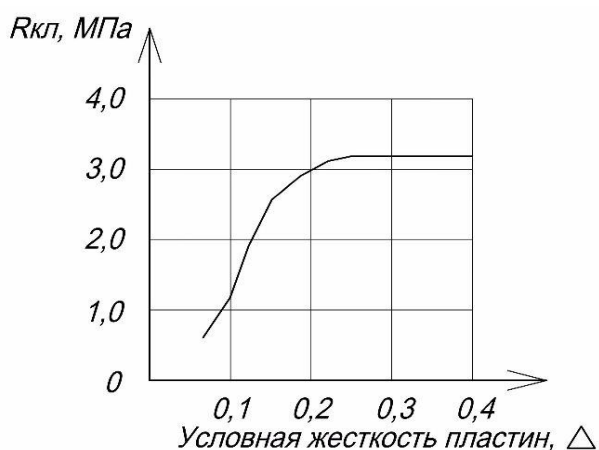


Рис. 5. Зависимость прочности клеевого соединения от условной жесткости металлических пластин

Исходя из табл. 3 и графика изменения прочности клеевого соединения при равномерном отрыве (рис. 5) сделан вывод, что увеличение условной жесткости (Δ) металлических пластин крепежного узла существенно влияет на величину предела прочности клеевого соединения.

Так, при условной жесткости пластин $\Delta = 0,060$ предел прочности составил $\sigma_{0np} = 0,60$ МПа:

- при условной жесткости пластин $\Delta = 0,100 - \sigma_{0np} = 1,20$ МПа;

- при условной жесткости пластин $\Delta = 0,125 - \sigma_{0np} = 1,92$ МПа;

- при условной жесткости пластин $\Delta = 0,150 - \sigma_{0np} = 2,60$ МПа;

- при условной жесткости пластин $\Delta = 0,188 - \sigma_{0np} = 2,90$ МПа;

- при условной жесткости пластин $\Delta > 0,225 - \sigma_{0np} = 3,20$ МПа.

Т.е. при условной жесткости пластин $\Delta = 0,225$ прочность клеевого соединения достигает максимального значения, после чего она стабилизируется. Это свидетельствует о том, что при работе на равномерный отрыв прочность клеевых соединений сталь - бетон находится в зависимости от величины условной жесткости пластин крепежных узлов. При этом увеличение условной жесткости свыше определенных классов не приводит к дальнейшему росту прочности клеевых соединений.

Результаты экспериментов по определению влияния толщины клеевого слоя на прочность соединения сталь - клей - бетон приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний клеевых соединений сталь-бетон
на равномерный отрыв в зависимости от толщины клеевого слоя

Толщина клеевого слоя, МПа	Разброс данных прочности, МПа	Среднее значение, МПа	Коэффициент однородности
2	2,87-3,67	3,18	0,85
4	2,91-3,58	3,21	0,87
8	2,84-3,70	3,20	0,84
12	2,94-3,60	3,22	0,87
16	2,91-3,63	3,20	0,86

Анализ данных эксперимента показал, что прочность соединения не изменяется с увеличением толщины клеевого слоя, при этом коэффициент однородности колеблется в диапазоне от 0,84 до 0,87.

Эксперименты по определению влияния степени удаления пластин от края

строительной конструкции на прочность соединения сталь - клей - бетон приведены в табл. 5, а также на графике (рис. 6). Разрушение образцов клеевых соединений независимо от степени удаления крепежного узла (пластины) происходило по бетону.

Таблица 5

Результаты испытаний клеевых соединений сталь - бетон на равномерный отрыв в зависимости от степени удаления пластин от обреза бетонного образца

b/a	$F_{\bar{\sigma}}/F_{np}$	Разброс данных прочности клеевого соединения, МПа	Среднее значение прочности, МПа
1	2	3	4
Металлические пластины $a \times a = 60 \times 60$ мм			
1,16	1,36	1,47-1,79	1,62
1,50	2,25	1,77-2,07	1,94
1,67	2,78	2,13-2,38	2,26
2,00	4,00	2,57-2,83	2,72
2,50	6,25	2,92-3,47	3,22
3,00	9,00	3,55-3,92	3,76
3,33	11,11	3,66-4,08	3,91
Металлические пластины $a \times a = 80 \times 80$ мм			
1,13	1,27	1,33-1,68	1,52
1,25	1,56	1,59-1,83	1,71
1,50	2,25	1,94-2,11	2,02
1,88	3,52	2,33-2,67	2,50
2,25	5,06	2,72-3,25	2,98
2,50	6,25	3,30-3,73	3,51
3,13	9,77	3,54-4,02	3,78
Металлические пластины $a \times a = 100 \times 100$ мм			
1,00	1,00	1,08-1,31	1,21
1,20	1,44	1,44-1,59	1,53

1	2	3	4
1,50	2,25	1,68-1,85	1,78
1,80	3,24	2,05-2,42	2,24
2,00	4,00	2,49-2,93	2,72
2,50	6,25	3,01-3,48	3,12
3,00	9,00	3,42-3,95	3,65
Металлические пластины $a \times a = 120 \times 120$ мм			
1,00	1,00	0,51-0,65	0,58
1,25	1,56	0,95-1,09	1,03
1,50	2,25	1,11-1,23	1,18
1,67	2,78	1,46-1,74	1,64
2,08	4,34	2,21-2,67	2,47
2,50	6,25	2,92-3,49	3,16
2,92	8,51	2,91-3,51	3,22

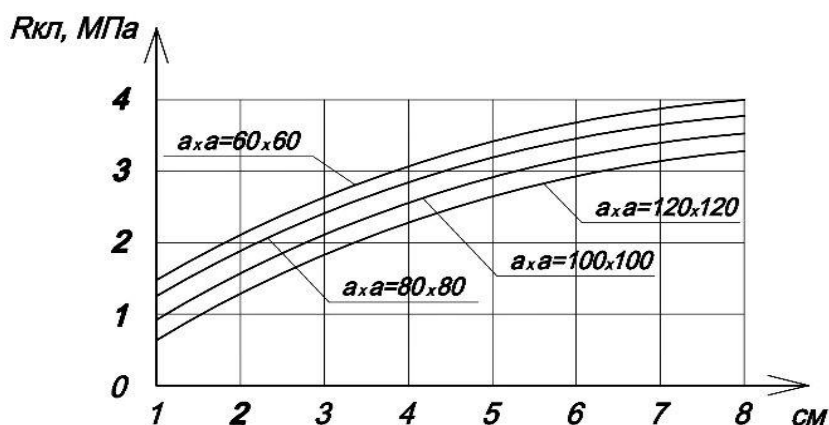


Рис. 6. Зависимость прочности клевого соединения от степени удаления пластин от края бетонного образца

Анализ этих данных свидетельствует о том, что прочность клевого соединения возрастает по мере удаления пластины от края бетонного образца. Прочность клевого соединения крепежного узла стабилизируется при $F_{\sigma} / F_{np} > 6$.

Так, при $F_{\sigma} / F_{np} \approx 1$ прочность соединения составила соответственно:

$$F_{nl} = 36 \text{ см}^2 - 1,62 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 64 \text{ см}^2 - 1,52 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 100 \text{ см}^2 - 1,21 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 144 \text{ см}^2 - 0,58 \text{ МПа}.$$

При $F_{\sigma} / F_{np} \approx 2$:

$$F_{nl} = 36 \text{ см}^2 - 2,26 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 64 \text{ см}^2 - 2,05 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 100 \text{ см}^2 - 1,78 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 144 \text{ см}^2 - 1,18 \text{ МПа}.$$

При $F_{\sigma} / F_{np} > 6$:

$$F_{nl} = 36 \text{ см}^2 - 3,91 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 64 \text{ см}^2 - 3,78 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 100 \text{ см}^2 - 3,65 \text{ МПа};$$

$$F_{nl} = 144 \text{ см}^2 - 3,22 \text{ МПа}.$$

Различные значения прочности при различных величинах F_{nl} объясняются масштабным фактором и соответственно неоднородностью бетона.

Результаты экспериментов по определению влияния класса бетона на прочность соединения сталь-клей-бетон приведены в табл. 6 и на графике (рис. 7).

Испытания образцов проводились на разрывной машине марки МР-1000, при этом разрушение клеевых соединений

независимо от класса бетона происходило по бетону.

Таблица 6

Результаты испытаний клеевых соединений сталь - бетон на равномерный отрыв в зависимости от класса бетона

Класс бетона	Прочность бетона на сжатие, МПа	Разброс данных прочности, МПа	Среднее значение, МПа	Коэффициент однородности
C8/10	15	2,31-3,42	2,62	0,67
C12/15	20	2,84-3,67	3,18	0,85
C16/20	25	3,33-3,74	3,53	0,87
C20/25	35	4,25-4,67	4,48	0,887
C25/30	40	4,68-5,13	4,91	0,912

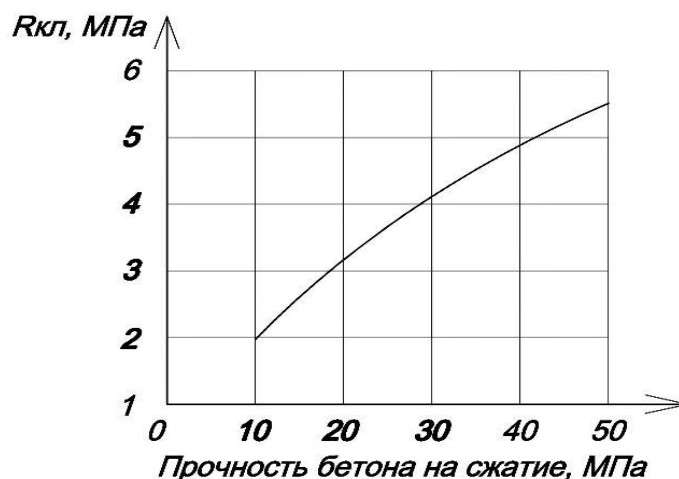


Рис. 7. Зависимость прочности клеевого соединения от прочности бетона

Анализ этих данных говорит о том, что прочность клеевого соединения сталь - бетон при равномерном отрыве зависит от прочности бетона на сжатие. Так, для бетона класса C8/10 она составила 2,62 МПа; для класса C12/15 – 3,18 МПа; для класса C16/20 – 3,53 МПа; для класса C20/25 – 4,48 МПа; для класса C25/30 – 4,91 МПа.

Испытания образцов проводились на разрывной машине марки МР-1000, при этом разрушение клеевых соединений независимо от класса бетона происходило по бетону (рис. 8).

Выводы и дальнейшие перспективы развития в данном направлении. Экспериментальными исследованиями установлено, что независимо от вида нагружения, геометрических характеристик клеевого соединения (размер в плане, толщина пластин, толщина клеевого слоя, удаление пластины от обреза строительной конструкции) и физико-механических свойств бетона разрушения соединения сталь - бетон на акриловых модифицированных композициях происходило по бетону.



Рис. 8. Характер разрушения клеевого соединения в зависимости от класса бетона

При равномерном отрыве на прочность клеевого соединения на границе сталь-бетон существенное влияние оказывают:

- условная жесткость металлических пластин Δ . Прочность соединения при этом уменьшается в три раза при уменьшении значений Δ от 0,225 до 0,060;

- удаление пластин от среза строительной конструкции от 0 до 2,5 его размера в плане приводит к увеличению прочности соединения в 2-3 раза;

- физико-механические свойства бетона (с увеличением прочности бетонов в пределах их классов от C8/10 до C25/30 прочность соединения увеличивается приблизительно в 2 раза, при этом возрастает коэффициент однородности соединения).

Экспериментально доказано, что толщина клеевого слоя не оказывает

существенного влияния на прочность соединения сталь-клей-бетон на акриловых модифицированных клеях.

Результаты данных экспериментальных исследований могут быть использованы для разработки узлов крепления производственного оборудования и технологических линий предприятий, а также для последующего улучшения составов полимерных клеевых материалов, широко используемых в промышленном и гражданском строительстве.

Кроме того, необходимо провести дальнейшие практические исследования влияния способов подготовки поверхности бетона перед склеиванием, а также влияния стороны бетонирования на прочность клеевого соединения сталь - бетон на акриловых модифицированных композициях.

Список использованных источников

1. Золотов, С. М. Акриловые клеи для соединения строительных конструкций [Текст]: монография / С.М. Золотов. – Харьков: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2016. – 185 с.
2. Фирсов, П. М. Расчетная модель клеевого соединения сталь-бетон [Текст] / П.М. Фирсов // Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства: материалы IV Междунар. науч.-техн. интернет-конф. – Харьков: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2014. – С. 56-61.

3. Брусенцева, Т. А. Композиционные материалы на основе эпоксидной смолы и наночастиц [Текст] / Т.А. Брусенцева, А.А. Филиппов, В.М. Фомин // Известия Алтайского государственного университета. – Барнаул: АлтГУ, 2014. – Вып. 1 (81). – С. 25-27.
4. Золотов, С. М. Полимерные связующие, наполнители и модифицирующие добавки акриловых клеев повышенной адгезионной и когезионной прочности [Текст] / С.М. Золотов, Е.С. Скрипник, М.С. Золотов // Комунальне господарство міст. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2013. – Вип. 110. – С. 8-16.
5. Золотов, С. М. Адгезионная прочность безанкерного соединения сталь-бетон на модифицированных акриловых клеях при равномерном и неравномерном отрыве [Текст] / С.М. Золотов, П.М. Фирсов // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2015. – Вип. 4 (82). – С. 102-106.
6. Золотов, М. С. Влияние конструктивных факторов крепежного узла на прочность клеевого соединения безанкерного крепления [Текст] / М.С. Золотов, П.М. Фирсов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2015. – Вип. 30. – С. 127-134.
7. Гарбуз, А. О. Анкерные соединения на акриловых клеях с повышенной адгезионной прочностью [Текст] / А.О. Гарбуз // Применение пластмасс в строительстве и городском хозяйстве: матер. IV Украинской науч.-техн. конф. – Харьков: ХНАГХ им. А.Н. Бекетова, 1998. – С. 12-14.
8. Золотов, С. М. Композиции на основе акриловых полимеров для ремонта и восстановления бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений [Текст] / С.М. Золотов // Материалы и изделия для ремонта и строительства: Междунар. сб. науч. тр. – Новосибирск: НГАУ, 2007. – С. 165-168.
9. Кріплення технологічного обладнання і металевих конструкцій до фундаментів та безпека праці [Текст]: монографія / Л.М. Шутенко, М.С. Золотов, Я.О. Серіков, В.О. Склярів. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2008. – 285 с.
10. Шутенко, Л. М. Крепление технологического оборудования коммунальных предприятий анкерными болтами на акриловых клеях [Текст] / Л.М. Шутенко, В.А. Склярів // Проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального комплекса города: IV Междунар. науч.-практ. конф. – М.: МИКХиС, 2008. – С. 228-231.
11. Rui-xiang Cheng. Study on bonding properties of PVC-based WPC bonded with acrylic adhesive [Text] / Rui-xiang Cheng, Li Zhang, Ying Li // Journal of Adhesion Science and Technology. – Aug. 2012. – Vol. 26. – Iss. 24. – P. 2729-2735.
12. Abenojar, J. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of an epoxy reinforced with boron carbide [Text] / J. Abenojar, M.A. Martínez, F. Velasco, J.C. del Real-Romero // Journal of Adhesion Science and Technology. – Apr. 2012. – Vol. 25. – Iss. 18. – P. 2445-2460.
13. Chamochín, R. The effect of surface treatment on the behavior of toughened acrylic adhesive/GRP (epoxy) composite joints [Text] / R. Chamochín, M. Cano, J. Abenojar, M. Pantoja, Y. Ballesteros, J.C. del Real-Romero // Journal of Adhesion Science and Technology. – Aug. 2010. – Vol. 24. – Iss. 11-12. – P. 1903-1916.
14. del Real-Romero, J.C. Adhesive bonding of aluminium with structural acrylic adhesives: durability in wet environments [Text] / J.C. del Real-Romero, M. Cano, J. Abenojar, M.A. Martínez // Journal of Adhesion Science and Technology. – Apr. 2010. – Vol. 20. – Iss. 16. – P. 1801-1818.
15. Yanmei Wang. Polymerization of epoxide with hydroxylamides as thermally latent initiators [Text] / Yanmei Wang, Mika Kimura, Atsushi Sudo // Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry. – June 2016. – Vol. 54. – Iss. 16. – P. 2611-2617.

16. Акрилова композиція [Текст]: пат. у 2016 01208 Україна, МПК C08L 33/12 (2006.01) / Золотов С.М., Фірсов П.М., Жданюк В.К., Білим П.А.; власник ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. - № 13402/ЗУ/16; заявл. 12.02.2016 р.; опубл. 24.06.2016 р. – 8 с.

17. Золотов, С. М. Реологические исследования и определение адсорбции модифицированных наполнителей метилметакрилата [Текст] / С.М. Золотов, П.М. Фирсов, К.А. Клиценко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізничн. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 161. – С. 157-169.

Фірсов Павло Михайлович, аспірант кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Тел.: +380950020626. E-mail: firsov1991@mail.ua.

Firsov Pavlo, post-graduate student, Theoretical and Structural Mechanics Department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +380950020626. E-mail: firsov1991@mail.ua.

Стаття прийнята 30.01.2017 р.

УДК 622.831

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО УРАВНЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Доктора техн. наук Ю. С. Крутий, Н. Г. Сурьянинов (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ РОЗВ'ЯЗКИ ПРИВЕДЕНОГО РІВНЯННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ

Доктори техн. наук Ю. С. Крутий, М. Г. Сур'янінов (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

FUNDAMENTAL SOLUTIONS ABOVE EQUATIONS OF THE PARAMETRIC OSCILLATIONS

Dr. sc. sciences Yu. S. Krutiy, N. G. Suryaninov

Определены фундаментальные решения уравнения Матье при нулевом параметре a и произвольном параметре Q с использованием метода прямого интегрирования. Наряду с исходным уравнением Матье рассматривается равносильная ему система уравнений. Фундаментальные решения ищутся в виде степенного ряда. Построена фундаментальная матрица решений равносильной системы уравнений. Показано, что эта матрица определяется однозначно и является матрицантом. Общее решение равносильной системы дифференциальных уравнений выражается с помощью матрицанта известной формулой, откуда получается общее решение исходного уравнения Матье.

Ключевые слова: параметрические колебания, уравнение Матье, метод прямого интегрирования, матрицант, фундаментальные решения.

Визначено фундаментальні розв'язки рівняння Мат'є при нульовому параметрі a й довільному параметрі Q з використанням методу прямого інтегрування. Поряд з вихідним

рівнянням Мат'є розглядається рівносильна йому система рівнянь. Фундаментальні розв'язки шукаються у вигляді степеневого ряду. Побудована фундаментальна матриця розв'язків рівносильної системи рівнянь. Показано, що ця матриця визначається однозначно і є матрицантом. Загальний розв'язок рівносильної системи диференціальних рівнянь виражається за допомогою матрицанта відомою формулою, звідки виходить загальний розв'язок вихідного рівняння Мат'є.

Ключові слова: параметричні коливання, рівняння Мат'є, метод прямого інтегрування, матрицант, фундаментальні розв'язки.

We define the fundamental solution of the Mathieu equation for zero setting a and arbitrary parameters q using the method of direct integration. Along with the original Mathieu equation is considered tantamount to his system of equations. Fundamental solutions obtained in the form of a power series. It is built the fundamental matrix of solutions of the equivalent system equations.

It is shown that this matrix is unambiguously determined and is matrixiant. The general solution of equivalent systems of differential equations is expressed by the well-known formula matrixiant, where we obtain the general solution of the original Mathieu equation.

Keywords: parametric oscillation, Mathieu equation, the method of direct integration matrixiant fundamental solutions.

Введение. Параметрический резонанс существенно отличается от обычного резонанса, вызываемого прямым силовым воздействием на ту или иную колебательную систему. Он наступает при выполнении определенных соотношений между частотой изменения параметра и собственной частотой возбуждаемой системы. Эти условия отличаются от характерного для обычного резонанса простого условия совпадения частоты внешнего воздействия и собственной частоты системы.

Параметрические колебания описываются уравнением Мат'є, которое в канонической форме принято записывать в виде [1]

$$y''(x) + (a - 2q \cos 2x)y(x) = 0, \quad (1)$$

где a, q – некоторые постоянные параметры.

Данное уравнение имеет множество приложений, причем, в зависимости от природы исходной задачи, параметры a, q определяются по-разному.

Анализ последних исследований и публикаций. В большинстве физических задач, которые приводят к уравнению (1), параметр q задается, в то время как параметр a является одним из собственных значений, при которых гарантировано наличие периодических решений уравнения [2, 3].

Когда параметры a и q заданы наперед, уравнение (1) называют общим уравнением Мат'є [2, 3]. Такое уравнение, согласно теореме Флоке, имеет частное решение $y(x) = e^{\mu x} \varphi(x)$, где $\varphi(x)$ – периодическая функция, а μ – характеристический показатель, зависящий от a и q . При этом основная трудность задачи заключается в определении параметра μ [4, 5].

Согласно методу Пуанкаре [4, 5], отыскание μ сводится к решению уравнения вида $\operatorname{ch} \pi \mu = y_1(\pi)$. При этом метод основывается на фундаментальных решениях $y_1(x), y_2(x)$ уравнения (1), удовлетворяющих условиям: $y_1(0) = 1; y_2(0) = 0; y_1'(0) = 0; y_2'(0) = 1$. Поэтому определение фундаментальных

решений уравнения Матье при произвольных параметрах a, q является актуальной задачей [6 – 8].

Цель и задачи исследования. Во многих приложениях возможен такой характер параметрических колебаний, при котором параметр a при определенных условиях будет нулевым. Например, при

колебаниях тонкой прямоугольной пластинки, помещенной в воздушном потоке со скоростью течения $v = v_0 + v_1 \sin \omega t$ (рис. 1), $a = 0$ при $c = \frac{3\pi}{4} b \rho v_0^2$, где b — ширина пластинки, ρ — плотность воздуха.

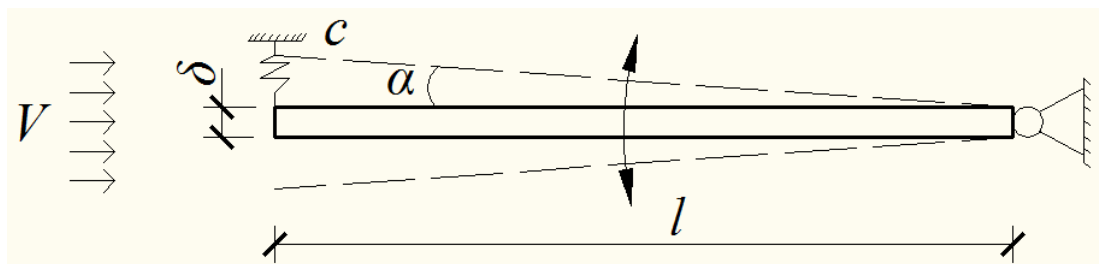


Рис. 1. Прямоугольная пластинка в воздушном потоке

Равенство $a = 0$ возможно также при колебаниях стержня под действием осевой периодической силы (рис. 2) или при колебаниях массы m в магнитном поле с

переменным магнитным потоком (рис. 3), и в целом ряде других технических приложений.

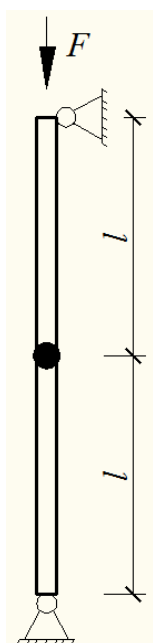


Рис. 2. Колебания стержня под действием периодической силы

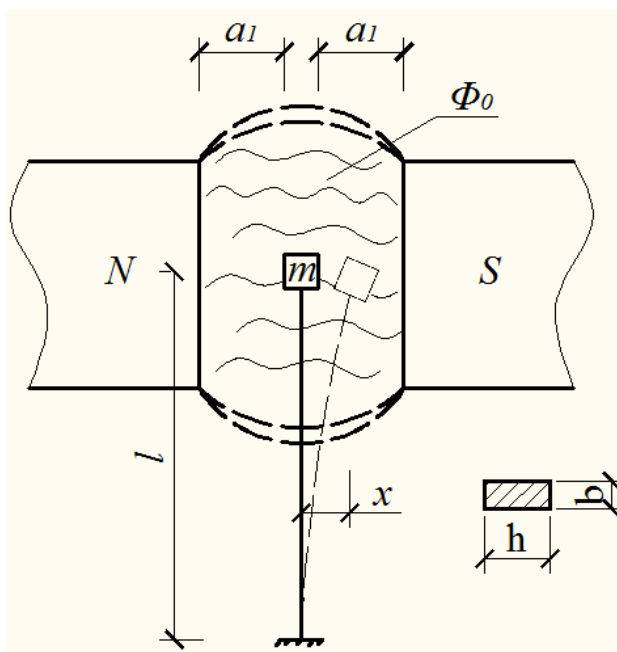


Рис. 3. Колебания массы в магнитном поле с переменным магнитным потоком

Аналитическое решение уравнения (1) для рассматриваемого случая предлагается построить методом прямого интегрирования. Суть метода подробно изложена в [9, 10]. Он основан на построении точных решений соответствующих дифференциальных уравнений с последующей разработкой способа численной реализации найденных общих интегралов.

Предлагаемым методом успешно решен целый ряд задач устойчивости и колебаний стержневых систем, пластин и оболочек [11 – 14].

Целью работы является определение фундаментальных решений уравнения Матье при нулевом параметре a и произвольном параметре q .

Основные результаты. При равенстве параметра a нулю уравнение (1) приобретает вид

$$y''(x) - 2q \cos 2x y(x) = 0 \quad (2)$$

Построим точное решение уравнения (2). Вместе с данным уравнением будем рассматривать равносильную ему систему уравнений

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = P(x)\Phi(x), \quad (3)$$

где $\Phi(x) = \begin{pmatrix} y(x) \\ y'(x) \end{pmatrix}$ – вектор неизвестных, а $P(x) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2q \cos 2x & 0 \end{pmatrix}$ – матрица коэффициентов системы.

Фундаментальные решения $y_n(x)$ ($n=1,2$) уравнения (2) будем искать в виде ряда по степеням параметра $p = 2q$:

$$y_n(x) = b_{n,0}(x) + pb_{n,1}(x) + p^2b_{n,2}(x) + p^3b_{n,3}(x) + \dots, \quad (4)$$

где $b_{n,0}(x), b_{n,k}(x)$ ($n=1,2$) ($k=1,2,3,\dots$) – неизвестные функции, которые будем

считать непрерывными вместе со своими первыми и вторыми производными. Кроме того, образуем еще ряды из производных:

$$y'_n(x) = b'_{n,0}(x) + pb'_{n,1}(x) + p^2b'_{n,2}(x) + p^3b'_{n,3}(x) + \dots; \quad (5)$$

$$y''_n(x) = b''_{n,0}(x) + pb''_{n,1}(x) + p^2b''_{n,2}(x) + p^3b''_{n,3}(x) + \dots \quad (6)$$

Пока предполагаем, что все эти ряды равномерно сходятся. В таком случае будет возможна операция их почленного дифференцирования, вследствие чего обозначения $y'_n(x), y''_n(x)$ для сумм рядов (5), (6) будут законными.

Функции

$$b_{n,0}(x), b_{n,k}(x) \quad (n=1,2) \quad (k=1,2,3,\dots)$$

найдем из условия

$$y''_n(x) - p \cos 2x y_n(x) = 0 \quad (n=1,2) \quad (7)$$

Воспользовавшись здесь представлениями (4), (6), приходим к необходимости выполнения равенства

$$b''_{n,0}(x) + \sum_{k=1}^{\infty} p^k (b''_{n,k}(x) - \cos 2x b_{n,k-1}(x)) = 0$$

Для его удовлетворения следует приравнять к нулю все коэффициенты при степенях параметра q , начиная с нулевой степени:

$$b''_{n,0}(x) = 0; \tag{8}$$

$$b''_{n,k}(x) = \cos 2x b_{n,k-1}(x) \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \tag{9}$$

Присоединим к последнему уравнению граничные условия

$$b_{n,k}(0) = b'_{n,k}(0) = 0 \quad (n = 1, 2) \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \tag{10}$$

Тогда, выписывая фундаментальную систему решений уравнения (8) и дважды интегрируя (9), получим

$$b_{n,0}(x) = x^{n-1}, \quad b_{n,k}(x) = \int_0^x \int_0^x \cos 2x a_{n,k-1}(x) dx dx \quad (n = 1, 2) \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \tag{11}$$

Последняя формула является рекуррентной. Она позволяет по известной начальной функции $b_{n,0}(x)$ последовательно определить функции $b_{n,k}(x) \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$, которые назовем

образующими. Очевидно, для таких функций равенства (7) будут удовлетворяться тождественно.

Помимо рекуррентной формулы (11), образующие функции также можно представить в развернутом виде:

$$b_{n,k}(x) = \int_0^x \int_0^x \cos 2x \dots \int_0^x \int_0^x \cos 2x \int_0^x \int_0^x \cos 2x b_{n,0}(x) dx dx dx \dots dx dx \tag{12}$$

Правая часть последней формулы содержит всего $2k$ интегралов.

Таким образом, формулами (4), (11), (12) определены два решения $y_n(x) \quad (n = 1, 2)$ уравнения (2). При этом непосредственной проверкой легко убедиться в том, что матрица

$$\Lambda(x) = \begin{pmatrix} U_1(x) & U_2(x) \\ U'_1(x) & U'_2(x) \end{pmatrix} \tag{13}$$

удовлетворяет системе (3). Для этой матрицы с учетом (10) также находим

$$\Lambda(0) = \begin{pmatrix} U_1(0) & U_2(0) \\ U'_1(0) & U'_2(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{1,0}(0) & b_{2,0}(0) \\ b'_{1,0}(0) & b'_{2,0}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{14}$$

Поскольку $|\Lambda(0)|=1 \neq 0$, то матрица (13) является фундаментальной матрицей системы (3), а функции $U_n(x)$ ($n=1,2$) – фундаментальные решения уравнения (2). Фундаментальная матрица, обладающая свойством (14), определяется однозначно и называется матрицантом [15]. С помощью матрицанта общее решение системы дифференциальных уравнений выражается известной формулой $\Phi(x) = \Lambda(x)\Phi(0)$. Отсюда получаем общее решение уравнения (2) в виде

$$y(x) = y(0)y_1(x) + y'(0)y_2(x). \quad (15)$$

Здесь константы интегрирования выражены через начальные параметры $y(0), y'(0)$.

Воспользовавшись формулой Якоби [16]

$$|\Lambda(x)| = |\Lambda(0)| \exp\left(\int_0^x \text{Sp } P(x) dx\right),$$

где $\text{Sp } P(x)$ – след матрицы $P(x)$, который в нашем случае равен нулю, для фундаментальных функций получаем тождество

$$y_1(x)y_2'(x) - y_1'(x)y_2(x) = 1. \quad (16)$$

Далее, полагая

$$\cos 2x = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{(2j)!} (2x)^{2j}, \quad (17)$$

запишем формулы для фундаментальных решений в удобном для численной реализации виде. Очевидно, после замены $\cos 2x$ в формуле (12) степенным рядом (17), образующие функции также будут представлять собою степенные ряды, причем наименьшая степень в них будет равна $n + 2k - 1$. Следовательно,

$$b_{n,k}(x) = x^{n+2k-1} \sum_{j=0}^{\infty} d_{n,k,j} x^{2j}, \quad (18)$$

где $d_{n,k,j}$ – коэффициенты, подлежащие определению. При этом

$$b_{n,k-1}(x) = x^{n+2k-3} \sum_{j=0}^{\infty} d_{n,k-1,j} x^{2j}. \quad (19)$$

Выполняя операции, предписанные второй из формул (11), перемножим ряды (17), (19) и результат дважды проинтегрируем. В итоге получим

$$b_{n,k}(x) = x^{n+2k-1} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{e_{n,k-1,j}}{(n+2k+2j-2)(n+2k+2j-1)} x^{2j}, \quad (20)$$

где $e_{n,k-1,j} = \sum_{i=0}^j (-1)^{j-i} \frac{2^{2(j-i)}}{(2(j-i))!} d_{n,k-1,j}$.

Сопоставляя между собою формулы (18) и (20), для искоемых коэффициентов получаем рекуррентную формулу

$$d_{n,k,j} = \frac{1}{(n+2k+2j-2)(n+2k+2j-1)} \sum_{i=0}^j (-1)^{j-i} \frac{2^{2(j-i)}}{(2(j-i))!} d_{n,k-1,j}.$$

Для полной определенности осталось указать начальные значения $d_{n,0,j}$ ($j = 0, 1, 2, \dots$). Сравнивая выражение для начальной функции $b_{n,0}(x)$, определенной первой из формул (11), со значением, полученным по формуле (18), когда $k = 0$, будем иметь $x^{n-1} \sum_{j=0}^{\infty} d_{n,k,j} x^{2j} = x^{n-1}$. Отсюда находим: $d_{n,0,0} = 1; d_{n,0,j} = 0$ ($j = 1, 2, 3, \dots$).

Окончательно фундаментальные решения (4) уравнения (2) с учетом (18) предстанут в виде

$$y_n(x) = x^{n-1} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} p^k d_{n,k,j} x^{2(k+j)} \quad (n = 1, 2).$$

При этом $y_1(x)$ – четное решение, а $y_2(x)$ – нечетное.

Выводы и дальнейшие перспективы развития в данном направлении. Таким образом, определены фундаментальные решения уравнения Маттье при нулевом параметре a и произвольном параметре q с использованием метода прямого интегрирования. Для практического

применения полученных результатов необходимо только указать эффективный метод численной реализации алгоритма решения, подобно тому, как это показано в [8, 10]. Изложенные принципы определения фундаментальных решений частного случая уравнения Маттье могут быть использованы для решения уравнения Маттье при произвольных параметрах a и q .

Решение уравнения Маттье имеет важнейшее прикладное значение, поскольку позволяет исследовать параметрический резонанс, который характеризуется сложным характером взаимодействия конструкции и набегающего потока и, в общем случае, связан с изменением во времени параметров динамической системы, приводящим к увеличению амплитуды колебаний. Например, вследствие изменения силы натяжения вант подвесного моста происходит возбуждение колебаний пролетных строений. Этот же эффект наблюдается в популярных сегодня навесных фасадных системах, крепящихся на так называемую подсистему — набор продольных и поперечных линейных элементов, передающих усилия с панелей обшивки на несущую конструкцию самого здания.

Список использованных источников

1. Пановко, Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем [Текст] / Я. Г. Пановко. — М.: Физматгиз, 1960. — 193 с.
2. Бейтмен, Г. Высшие трансцендентные функции. Т. 3. Эллиптические и автоморфные функции. Функции Ламе и Маттье [Текст] / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. — М.: Наука, 1967. — 301 с.
3. Бейтмен, Г. Высшие трансцендентные функции. Т. 2. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены [Текст] / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. — М.: Наука, 1974. — 297 с.
4. Уиттекер, Э. Т. Курс современного анализа. Ч. 2. Трансцендентные функции [Текст] / Э. Т. Уиттекер, Дж. Н. Ватсон. — М.: Физматлит, 1963. — 500 с.
5. Ватсон, Дж. Н. Теория бесселевых функций [Текст] / Дж. Н. Ватсон. — М.: Иностранная литература, 1949. — Ч. 1. — 799 с.
6. Ishibashi K. Simple conditions for parametrically excited oscillations of generalized Mathieu equations / K. Ishibashi, J. Sugie // Journal of Mathematical Analysis and Applications. — Volume 446, Issue 1, 1 February 2017. — P. 233–247.

7. Gadella M. Periodic analytic approximate solutions for the Mathieu equation / M. Gadella, H. Giacomini, L.P. Lara // *Applied Mathematics and Computation*, 271 (2015). — P. 436–445.
8. Mohamad M.A. Sapsis Probabilistic response and rare events in Mathieu's equation under correlated parametric excitation / M.A. Mohamad, T.P. Sapsis // *Ocean Engineering Volume 120*, 1 July 2016. — P. 289–297.
9. Крутий, Ю. С. Задача Эйлера в случае непрерывной поперечной жесткости [Текст] / Ю. С. Крутий // *Строительная механика и расчет сооружений*. — 2010. — № 6. — С. 22–29.
10. Крутий, Ю. С. Задача Эйлера в случае непрерывной поперечной жесткости (продолжение) [Текст] / Ю. С. Крутий // *Строительная механика и расчет сооружений*. — 2011. — № 2. — С. 27 – 33.
11. Krutiy Yu. S. Forced harmonic oscillations of the Euler-Bernoulli beam with resistance forces / Yu. S. Krutiy // *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. Machine building. Process Metallurgy: materials Science*. — Odessa, 2015. — № 3(47). — P. 9–16.
12. Крутий, Ю. С. Точний розв'язок диференціального рівняння вимушених поздовжніх коливань стержня з довільними неперервними параметрами [Текст] / Ю. С. Крутий // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. — Хмельницький, 2015. — № 6. — С. 23–29.
13. Крутий, Ю. С. Чисельна реалізація аналітичного розв'язку задачі про вільні коливання прямокутної пластини, що лежить на змінній пружній основі [Текст] / Ю.С. Крутий, М. Г. Сур'янінов // *Наукові нотатки: міжвуз. зб. Сер. Технічні науки*. — Луцьк, 2016. — №2 (54) — С. 167–171.
14. Крутий, Ю. С. Згин кругової циліндричної оболонки зі змінною товщиною [Текст] / Ю. С. Крутий, Н. Г. Сур'янінов // *Вісник Хмельницького національного університету. Сер. Технічні науки*. — Хмельницький, 2016. — №2 (235). — С. 116–121.
15. Федорюк, М. В. Обыкновенные дифференциальные уравнения [Текст] / М. В. Федорюк. — М.: Наука, 1985. — 448 с.
16. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц [Текст] / Ф. Р. Гантмахер. — М.: Наука, 1988. — 552 с.

Крутий Юрій Сергійович, д-р техн. наук, проректор Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (093) 501-85-10. E-mail: yuriy.krutiy@mail.ru.

Сур'янінов Микола Георгійович, д-р техн. наук, завідувач кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (050) 333-37-54. E-mail: marshall@te.net.ua.

Krutiy Yuriy, Dr. Sc. Science, Vice-rector Odessa State Academy of Construction and Architecture. Tel.: (093) 501-85-10. E-mail: yuriy.krutiy@mail.ru.

Suryaninov Nikolay, Dr. Sc. Science, Head of Structural Mechanics Odessa State Academy of Construction and Architecture. Tel. : (050) 333-37-54. E-mail: marshall@te.net.ua.

Стаття прийнята 30.01.2017 р.

УДК 629.4.083

**ВИЗНАЧЕННЯ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ
ЛОКОМОТИВІВ У ПІСЛЯНОРМАТИВНИЙ ПЕРІОД**

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, аспіранти О. В. Пономаренко, С. С. Яковлєв

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА
ЛОКОМОТИВОВ В ПОСЛЕНОРМАТИВНЫЙ ПЕРИОД**

Д-р техн. наук А. С. Крашенинин, аспиранты Е. В. Пономаренко, С. С. Яковлев

**DEFINITION OF STRATEGY MAINTENANCE AND REPAIR OF LOCOMOTIVES
WHEN EXTENDING SERVICE LIFE**

Dr. of Tech. Sc. O. Krashenin, pg. O. Ponomarenko, S. Yakovlev

Зміна технічного стану локомотивів у період післянормативного терміну експлуатації потребує вибору оптимальної стратегії технічного обслуговування (ТО) та поточного ремонту (ПР). Вона повинна враховувати необхідність коректування часу й обсягу робіт з ТО, ПР. В основу оптимізації стратегії ТО, ПР локомотивів доцільно закласти складові зміни витрат за термін подовження експлуатації.

Ключові слова: стратегія ТО, ПР локомотивів, післянормативний термін експлуатації.

Изменение технического состояния локомотивов в период посленормативного срока требует выбора оптимальной стратегии технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР). Она должна учитывать необходимость корректирования времени и объема работ по ТО, ТР. В основу оптимизации стратегии ТО, ТР локомотивов целесообразно заложить составляющие изменения расходов за срок продления эксплуатации.

Ключевые слова: стратегия ТО, ПР локомотивов, посленормативный срок эксплуатации.

In connection with the physical and moral wear and tear of rolling stock in modern conditions an important direction of ensuring the efficiency of rail transport in the future is the rational use of rolling stock operated within the designated and extended service life. The extension of the lifespan of the locomotives should be carried out by maintaining the optimum ratio adjustment measures of the timing and technology of maintenance, PR and training for repair facilities. In the face of the ageing of traction rolling stock (TRS) is locomotives and non-tractive - wagons required, the forced prolongation of term of its operation. Change of technical condition of locomotives in the period planetrating lifetime requires selection of optimum maintenance strategies and current repairs (CR). It should take into account the need to adjust the time and amount of work on the CR. The basis of the optimization strategy, CR locomotives, it makes sense to incorporate components of cost changes over the period of extended operation.

Keywords: strategy maintenance, CR of locomotives, after normative lifetime.

Вступ. В умовах необхідності виконання завдань перевезень вантажів і населення рухомим складом, що досяг або

перевищив термін нормативного використання, потрібні зважені кроки щодо обґрунтування стратегій виконання цих

завдань. Галузь перебуває у критичному стані і без докорінного реформування всіх її ланок важко очікувати забезпечення ефективності її роботи.

Вимушеним кроком є подовження терміну експлуатації локомотивів, які досягли або перевищили нормативний термін експлуатації. У свою чергу це потребує обґрунтування стратегії утримання локомотивів у понаднормативний період експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як в Україні, так і в інших країнах накопичений корисний досвід щодо обґрунтування оптимальної системи ТО, ПР ТРС. Звичайно є деякі особливості в підходах до вирішення цих завдань за умови фінансових і промислових можливостей країн і галузей.

У фахових виданнях надано відомості щодо особливостей розвитку, інфраструктури й особливостей утримання ТРС [1, 4-6]. Зокрема вітчизняні науковці багато уваги приділяли оптимізації системи експлуатації ТРС, упровадженню в ТО, ПР діагностичного забезпечення, засобів автоматизації й інформаційних технологій, оцінці життєвого циклу ТРС. За останні роки Тартаковським Е. Д., Пузирем В. Г., Калабухіним Ю. Є. та іншими провідними вченими проведено фундаментальні дослідження щодо удосконалення стратегії утримання ТРС [1, 6-9].

Визначення мети та задачі дослідження. Метою статті є розгляд питань щодо вибору й обґрунтування стратегії утримання ТРС в післянормативний період експлуатації.

Основна частина дослідження. При експлуатації ТРС відбувається процес зниження функціональних параметрів його обладнання, обумовлених процесами зношування, корозії, розвитку тріщин, деформації й інших деградаційних

процесів. Для підтримки його функціональних параметрів у межах, що допускаються технічною документацією, необхідно управляти деградаційними процесами, що відбуваються, шляхом застосування керуючих впливів, тобто за допомогою застосування тієї або іншої стратегії технічного обслуговування й ремонту. При цьому під стратегією технічного обслуговування й ремонту розуміють цілеспрямоване правило (функцію), що встановлює види, обсяг і періодичність керуючих впливів, основним призначенням і змістом яких є контроль і підтримка експлуатованого обладнання в працездатному стані в міжремонтні періоди й відновлення значень показників надійності до регламентованих значень [2, 3].

Розглянемо задачу визначення числа відновлень устаткування ТРС протягом деякого напрацювання [2-4, 8].

Нехай система складається з n елементів, з'єднаних (щодо надійності) послідовно, тобто відмова будь-якого елемента призводить до відмови системи [2]. Допустимо, що у випадку відмови кожний елемент відновлюється миттєво й повністю, відмови елементів незалежні.

У цьому випадку випадкове число відмов усієї системи до моменту t дорівнює

$$r(t) = \sum_{k=1}^n r_k(t),$$

де $r_k(t)$ – випадкове число відмов k -го елемента системи (окремого обладнання або вузлів ТРС) до моменту t ($k=1, 2, 3, \dots, n$);

$r(t)$ – випадкове число відмов усієї системи до моменту t .

Середнє число відмов до моменту t дорівнює

$$H(t) = M \left[\sum_{k=1}^n r_k(t) \right] = \sum_{k=1}^n M[r_k(t)] = \sum_{k=1}^n H_k(t),$$

де $H_k(t) = M[r_k(t)]$ – функція відновлення для k -го елемента системи.

При $t \rightarrow \infty$ процес відновлення стає стаціонарним і на підставі теореми Таклінда [10, 11, 13]

$$\lim H_k(t) = \frac{1}{T_k} + \frac{\sigma_k^2}{2T_k^2} - \frac{1}{2},$$

де T_k – середнє напрацювання на відмову k -го елемента системи; σ_k^2 – дисперсія напрацювання на відмову.

Тому для великих t можна прийняти, що кожний елемент системи

$$H_k(t) \approx \frac{1}{T_0} + \frac{\sigma_k^2}{2T_k^2} - \frac{1}{2}. \quad (1)$$

Ураховуючи, що $\sigma_k/T_k = \nu$, вираз (1) можна записати у вигляді

$$H_k(t) \approx \frac{1}{T_k} + \frac{(\nu^2 - 1)}{2}. \quad (2)$$

При $\nu = 1$ оцінка (2) перетворюється у точну формулу

$$H_k(t) = \frac{t}{T_k}.$$

Для всієї системи середнє число відновлень усієї системи дорівнює

$$H(t) \approx \sum_{k=1}^n \left(\frac{t}{T_k} + \frac{\sigma_k^2}{2T_k^2} - \frac{1}{2} \right).$$

Якщо час безвідмовної роботи кожного елемента системи підпорядковується нормальному закону з параметрами (T_k, σ_k) , то

$$H(t) \approx t \sum_{k=1}^n \frac{1}{T_k} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\sigma_k}{2T_k} \right)^2 - \frac{n}{2}. \quad (3)$$

При розподілі часу безвідмовної роботи за експоненційним законом

$$H(t) \approx t \sum_{k=1}^n \lambda_k,$$

де λ_k – інтенсивність відмов k -го елемента системи.

Вираз (3) може бути використаний для розрахунків числа відновлень і потреби в запасних частинах.

Розглянемо метод вибору оптимальної стратегії технічного обслуговування й ремонту для окремого обладнання локомотива. Ставиться завдання: визначити для окремого обладнання локомотива (деталі або вузла), прийнятих за елемент технічного обладнання, оптимальну стратегію ТО і ПР за критерієм мінімуму витрат на відновлення або заміну цього елемента на одиницю напрацювання, тобто

$$E = M\left(\frac{C}{\tau}\right), \quad (4)$$

де C – витрати на відновлення або заміну елемента;

τ – випадкова величина напрацювання;

E – математичне очікування витрат на одиницю напрацювання.

Величину C прийемо постійною. Тому (4) можна записати у вигляді

$$E = M\left(\frac{C}{\tau}\right) = CM \frac{1}{\tau} = C \int_0^{\infty} \frac{f_{\tau}(y)}{y} dy,$$

де $f_{\tau}(y)$ – функція щільності розподілу напрацювання до відмови.

Розглянемо чотири види можливих стратегій: E_1 – елемент замінюється при відмові; E_2 – елемент відновлюється при відмові; E_3 – елемент замінюється при відмові або при досягненні напрацювання T (при плановому ТО); E_4 – елемент відновлюється при відмові або при досягненні напрацювання T .

Залежно від виду стратегії E_i величина C буде різною

$$\text{для } E_1 \Rightarrow C = C_o + C_3;$$

$$\text{для } E_2 \Rightarrow C = C_{e.o} + C_o;$$

$$\text{для } E_3 \Rightarrow C = C_o + C_{e.z};$$

$$\text{для } E_4 \Rightarrow C = C_{e.n} + C_o,$$

де C_3 – вартість заміної складової частини;

$C_{e.o}$ – вартість відновлення працездатного стану складової частини при відмові;

$C_{e.z}$ – вартість заміни складової частини при відмові або при проведенні планового ТО;

$C_{e.n}$ – вартість відновлення складової частини при профілактичному обслуговуванні;

C_o – вартість робіт, пов'язаних з розбиранням, складанням, пошуком відмови й ін.

Визначимо величину E_i для кожної з розглянутих стратегій:

$$E_1 = (C_o + C_3) \int_0^{\infty} \frac{f_{\tau}(y)}{y} dy;$$

$$E_2 = (C_o + C_{e.o}) \int_0^{\infty} \frac{f_{\tau}(y)}{y} dy.$$

З порівняння E_1 і E_2 випливає, що заміна складової частини, що відмовила, доцільна за критерієм витрат на одиницю напрацювання, якщо $C_3 < C_{e.o}$.

Розглянемо стратегію E_3 . Нехай складова частина обладнання замінюється при відмові й досягненні напрацювання T (із профілактичною метою). Якщо відмова відбулася, то математичне очікування витрат на одиницю напрацювання дорівнює

$$M = \left\{ \frac{C_3 + C_o}{\tau} \right\} \Big|_{\tau=0}^{\tau=T}$$

де знак $\left. \begin{matrix} \tau = T \\ \tau = 0 \end{matrix} \right\}$ означає, що математичне очікування обчислюється за умови $0 < \tau < T$. Якщо відмова не відбулася, то заміна відбувається при $\tau = T$.

Отже, при такій стратегії E дорівнює

$$E_3 = (C_3 + C_o) \cdot \left\{ \int_0^T \frac{1}{y} \cdot f_{\tau}(y) dy + \frac{1}{T} \cdot [1 - F_{\tau}(T)] \right\}.$$

Для стратегії E_4 отримуємо

$$E_4 = (C_o + C_{e.o}) \int_0^T \frac{f_{\tau}(y)}{y} dy + \frac{(C_o + C_{e.o})}{T} \cdot [1 - F_{\tau}(T)].$$

Диференціюючи E_4 по T і прирівнюючи до нуля похідну, знаходимо

$$(C_o + C_{e.o}) \cdot \frac{1}{T} \cdot f_{\tau}(T) + (C_o + C_{e.o}) \cdot \left[-\frac{1}{T^2} + \frac{1}{T^2} \cdot F_{\tau}(T) - \frac{1}{T} \cdot f_{\tau}(T) \right] = 0.$$

Множачи на T^2 , отримуємо

$$(C_o + C_{e.n}) \cdot (1 - F_\tau(T)) = (C_{e.o} - C_{e.n}) \cdot T \cdot f_\tau(T).$$

Вважаючи, що $\lambda_\tau(T) = \frac{f_\tau(T)}{1 - F_\tau(T)}$ – інтенсивність відмов, знаходимо оптимальне значення T

$$T = \frac{C_o + C_{e.n}}{C_{e.o} - C_{e.n}} \cdot \frac{1}{\lambda_\tau(T)}.$$

Можлива змішана стратегія, коли складова частина заміняється при відмові, а при профілактичному обслуговуванні проводиться її відновлення. У цьому випадку

$$E_5 = (C_3 + C_o) \int_0^T \frac{1}{y} \cdot f_\tau(y) dy + \frac{C_{e.n} + C_o}{T} \cdot [1 - F_\tau(T)].$$

За аналогією з E_4 отримуємо

$$(C_3 + C_o) \cdot (1 - F_\tau(T)) = (C_3 - C_{e.n}) \cdot T \cdot f_\tau(T),$$

$$T = \frac{C_o + C_{e.n}}{C_3 - C_{e.n}} \cdot \frac{1}{\lambda_\tau(T)}.$$

Ця стратегія можлива, якщо $C_3 < C_{e.n}$.

Оптимізацію стратегій технічного обслуговування й ремонту (ТО, ПР) проводимо у два етапи: на першому етапі визначається вид стратегії, на другому – періодичність операцій ТО, ПР.

Завдання вибору оптимальної стратегії буде підрозділятися на послідовний розв'язок двох завдань:

- вибір оптимального виду стратегій ТО, ПР;
- вибір періодичності операцій ТО, ПР для обраного виду стратегій.

Практика показує, що здебільшого найефективнішою є стратегія ТО, ПР за станом. Для застосування цієї стратегії необхідно визначити періодичність проведення контролю технічного стану об'єкта. Однак складність застосування цієї стратегії полягає в тому, що може бути

невідома функція розподілу напрацювання на відмову й розглянутий вище метод не може бути застосований. Тому в цьому випадку доцільно використовувати міні-максний метод [12].

Завдання полягає у виборі оптимальної стратегії, що зводиться до визначення таких моментів часу $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, < \dots$ проведення перевірок, які мінімізували б математичне очікування повних витрат від відмов і від проведення самих перевірок.

Математичне очікування витрат в описаній ситуації може бути знайдене як

$$C = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} [C_1(k+1) + C_2(x_{k+1} - t)]. \quad (5)$$

Причому розв'язок задовольняє умову

$$x_{k+1} - x_k + \frac{C_1}{C_2} = \frac{F(x_k) - F(x_{k-1})}{F(x_k)}, \quad (6)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$ – число перевірок;

x_k – моменти проведення перевірок;

C_1 – витрати на перевірку;

C_2 – втрати від відмови.

Припустимо, що нічого невідомо про закон розподілу відмов F . Міні-максний підхід рекомендує вибирати як F найбільш несприятливий (щодо витрат) розподіл. Очевидно, що в цьому випадку таким розподілом є рівноімовірний на досліджуваному відрізку $[0, T]$ розподіл [11-13]. Для цього розподілу вирази (5) і (6) набудуть вигляду

$$C = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} [C_1(k+1) + C_2(x_{k+1} - t)] \frac{dt}{T},$$

$$x_{k+1} - x_k + \frac{C_1}{C_2} = x_k - x_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Виражаючи x_k через x_1 , отримуємо

$$x_k = kx_1 - \frac{k(k-1)C_1}{2C_2},$$

звідки

$$x_1 > \frac{k-1}{2} \cdot \frac{C_1}{C_2}.$$

Це означає, що слід проводити лише кінцеве число перевірок, наприклад n . Оскільки $x_n = T$, то можна знайти, що

$$x_k = \frac{kT}{n} + k(n-k) \frac{C_1}{2C_2}, \quad k = \overline{0, n}. \quad (7)$$

Щоб $\{x_k\}$ утворювало послідовність перевірок, необхідно

$$x_{k+1} - x_k > 0, \quad k = 1, 2, \dots$$

при

$$\frac{T}{n} + \frac{C_1}{2C_2}(n-2k-1) > 0, \quad k = 1, 2, \dots, n-1.$$

Для $k = n-1$ отримуємо

$$n(n-1) < 2 \frac{C_2 T}{C_1}. \quad (8)$$

Оскільки різниця між середніми витратами при $(n+1)$ перевірці й середніми витратами при n перевірках є

$$-\frac{C_2}{2T} \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \left(\frac{T}{n+1} - \frac{C_1 n}{2C_2} \right)^2 < 0.$$

Отже, n вибирається як найбільше ціле число, що задовольняє нерівність (8). Після того, як n обране, визначаються $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, відповідно до умови (7).

На підставі наведених залежностей виконані розрахунки зміни часу проведення технічних заходів з утримання локомотивів при продовженні їх експлуатації понаднормативний термін.

У таблиці для різних значень $T = \{T_1 = 5 \text{ р. (60 міс)}, T_2 = 10 \text{ р. (120 міс)}, T_3 = 15 \text{ р. (180 міс)}, T_4 = 20 \text{ р. (240 міс)}\}$ і співвідношень $C_1/C_2 = \{1, 2, 3, 4\}$ обчислені значення x_i . При цьому кількість інтервалів визначається із співвідношення $n(n-1) = 2 \frac{C_2}{C_1} \cdot T$. Значення дорівнює $n = 11$ для всіх розглянутих значень $C_1/C_2 = 1$ і $T = \{T_1 = 5 \text{ р. (60 міс)}, T_2 = 10 \text{ р. (120 міс)}, T_3 = 15 \text{ р. (180 міс)}, T_4 = 20 \text{ р. (240 міс)}\}$. Для інших співвідношень C_1/C_2 значення n набуває значення відповідно до таблиці для всіх значень T .

Таблиця

Розрахунки часу проведення технічних заходів з утримання локомотивів

T , рік (міс)	C_1/C_2	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
5(60)	1	10,45	19,91	28,36	35,82	42,27	47,73	52,18	55,64	58,09	59,55	60,00
	2	14,50	27,00	37,50	46,00	52,50	57,00	59,50	60,00			
	3	17,50	32,00	43,50	52,00	57,50	60,00					
	4	20,00	36,00	48,00	56,00	60,00						
10(120)	1	15,91	30,82	44,73	57,64	69,55	80,45	90,36	99,27	107,18	114,09	120,00
	2	20,91	39,82	56,73	71,64	84,55	95,45	104,36	111,27	116,18	119,09	120,00
	3	25,33	47,67	67,00	83,33	96,67	107,00	114,33	118,67	120,00		
	4	29,00	54,00	75,00	92,00	105,00	114,00	119,00	120,00			
15(180)	1	21,36	41,73	61,09	79,45	96,82	113,18	128,55	142,91	156,27	168,64	180,00
	2	26,36	50,73	73,09	93,45	111,82	128,18	142,55	154,91	165,27	173,64	180,00
	3	31,36	59,73	85,09	107,45	126,82	143,18	156,55	166,91	174,27	178,64	180,00
	4	36,00	68,00	96,00	120,00	140,00	156,00	168,00	176,00	180,00		
20(240)	1	26,82	52,64	77,45	101,27	124,09	145,91	166,73	186,55	205,36	223,18	240,00
	2	31,82	61,64	89,45	115,27	139,09	160,91	180,73	198,55	214,36	228,18	240,00
	3	36,82	70,64	101,45	129,27	154,09	175,91	194,73	210,55	223,36	233,18	240,00
	4	41,82	79,64	113,45	143,27	169,09	190,91	208,73	222,55	232,36	238,18	240,00

За розрахованими результатами побудовані графічні залежності

$$X = f\left(\frac{C_1}{C_2}, T\right) \text{ (рисунок).}$$

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку

1. Проведення заходів з утримання локомотивів у понаднормативний термін повинно передбачати коректування часу проведення ТО, ПР за призначений термін з урахуванням необхідного коректування обсягу ТО, ПР.

2. Збільшення відносних витрат C_1/C_2

дає змогу збільшити міжремонтний термін проведення ТО, ПР локомотивів за кожним напрацюванням.

3. З часом закінчення періоду понаднормативного терміну використання зменшується період проведення ТО, ПР локомотивів.

4. Отримані залежності дають змогу визначити час проведення ТО, ПР локомотивів для різних термінів T понаднормативної експлуатації і співвідношення витрат C_1/C_2 .

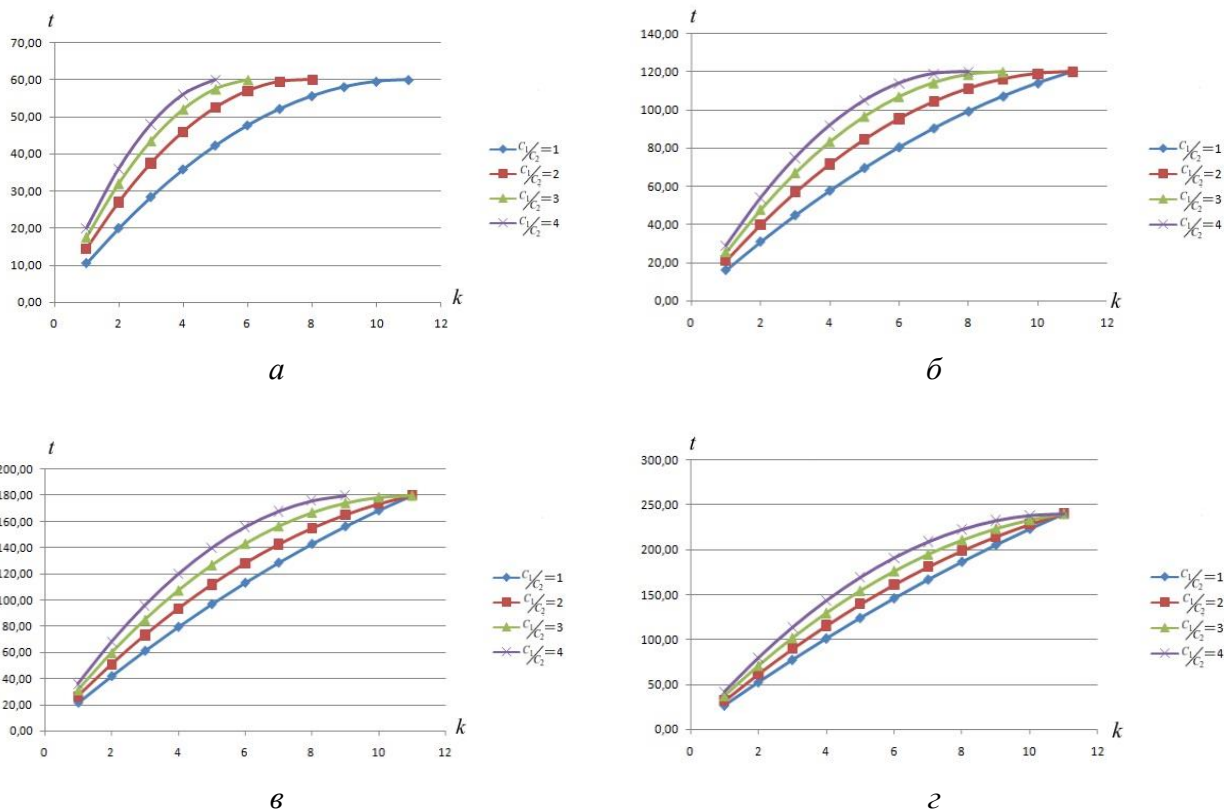


Рис. Зміна міжремонтних пробігів у залежності від C_1/C_2 та понаднормативного терміну експлуатації T :
 а – при $T = 5$ р. (60 міс); б – при $T = 10$ р. (120 міс);
 в – при $T = 15$ р. (180 міс); г – при $T = 20$ р. (240 міс)

Список використаних джерел

1. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог [Текст]: монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин [и др.]. – Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2011. – 174 с.
2. Галкин, В. Г. Надежность тягового подвижного состава [Текст]: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четверов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
3. Северцев, Н. А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке [Текст]: учеб. пособие для вузов / Н. А. Северцев. – М.: Высш. школа, 1989. – 432 с.
4. Колегаев, Р. Н. Определение оптимальной долговечности технических систем [Текст] / Р. Н. Колегаев. – М.: Сов. радио, 1967.
5. Михлин, В. М. Прогнозирование технического состояния машин [Текст] / В. М. Михлин. – М.: Колос, 1976. – 288 с.
6. Оцінка показників ТО при подовженні терміну експлуатації ТРС по наробці [Текст] / Е. Д. Тартаковський, О. В. Устенко, О. С. Крашенінін [та ін.] // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 132. – С. 5-11.
7. Крашенінін, О. С. Покращення організації технічного обслуговування та поточного ремонту тягового рухомого складу в післянормативний термін його використання [Текст] /

О. С. Крашенінін, О.О. Шапатіна, Ю.В. Черняк // Транспортні інновації. – К., 2011. – № 9. – С. 26-28.

8. Оценка периодичности технического обслуживания и ремонта в период после нормативных сроков эксплуатации ТПС [Текст] / А. С. Крашенинин, О. А. Шапатина, С. А. Матвиенко [и др.] // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 128. – С. 165-167.

9. Крашенінін, О. С. Оцінка ефективності системи подовження терміну служби ТРС більш нормативного і оновлення експлуатаційного парку [Текст] / О. С. Крашенінін, П. О. Харламов // Вісник Східноукраїнського університету ім. Володимира Даля: наук. журнал. – Луганськ, 2012. – № 3(174). – С. 109-113.

10. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 832 с.

11. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 460 с.

12. Вагнер, С. Основы исследования операций [Текст] / С. Вагнер. – М: Мир, 1973. – Т. 3. – 501 с.

13. Байнхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход [Текст] / Ф. Байнхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.

14. Cantos, P. Efficiency Measures and Output Specification: The Case of European Railways [Text] / Cantos P., Pastor J. M., Serrano L. // J. of Transport and Statistics. – 2000. – Vol. 3, № 3. – P. 61–68.

15. Hughes, M. Cost and capacity drive high speed train design [Text] / M. Hughes // Railway Gazette International. – 2010. – № 5. – P. 37–39.

16. New technology center for temple mills train service Eurostar [Text] // Railway Gazette International. – 2008. – № 10. – P. 820–821.

Крашенінін Олександр Семенович, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua.
Пономаренко Олена Вячеславівна, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua.
Яковлев Сергій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua.

Krashenin Olexander, Ph.D., professor of maintenance and repair of rolling stock Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua.

Ponomarenko Olena, graduate student of maintenance and repair of rolling stock Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua.

Yakovlev Sergiy, graduate student of maintenance and repair of rolling stock Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua.

Стаття прийнята 02.02.2017 р.

УДК 624.154/155:624.138.2

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ «ОСНОВА – ВІБРОАРМОВАНА ГРУНТОЦЕМЕНТНА ПАЛЯ»

Кандидати техн. наук А. В. Гасенко (ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка),
О. П. Новицький (ДП ПАТ «СУМБУД»),
В. Н. Рожко (ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка)

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «ОСНОВА – ВИБРОАРМИРОВАННАЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНАЯ СВАЯ»

Кандидаты техн. наук А. В. Гасенко (ПолтНТУ им. Ю. Кондратюка),
А. П. Новицкий (ДП ПАТ «СУМБУД»),
В. Н. Рожко (ПолтНТУ им. Ю. Кондратюка)

FEATURES OF CREATION FINITE-ELEMENT MODEL OF THE SYSTEM "BASIS – VIBROREINFORCED SOIL-CEMENT PILE"

PhD. tehn. A. V. Hasenko, PhD. tehn. O. P. Novitskiy, PhD. tehn. V. N. Rozhko

Розглянуто порядок створення моделі віброармованих ґрунтоцементних паль для скінченно-елементного аналізу. Паля в основі (ґрунті) перебуває в об'ємних гранично-навантажених умовах. Серед особливостей створення такої моделі описано порядок прикладення системи навантажень і накладання закріплень на її поверхню, обґрунтовано оптимальний вибір розмірів скінченно-елементної сітки та розкрито прийнятну методіку задавання фізико-механічних властивостей матеріалів.

Ключові слова: будівлі та споруди залізничного транспорту, віброармована ґрунтоцементна паля, скінченно-елементна модель.

Рассмотрен порядок создания модели виброармированных ґрунтоцементных свай для конечно-элементного анализа. Свая в основании (почве) находится в объемных предельно-нагруженных условиях. Среди особенностей создания такой модели описан порядок приложения системы нагрузок и наложения закреплений на ее поверхность, обоснованно оптимальный выбор размеров конечно-элементной сетки и раскрыто принятую методіку задания физико-механических свойств материалов.

Ключевые слова: здания и сооружения железнодорожного транспорта, виброармированная ґрунтоцементная свая, конечно-элементная модель.

The use of soil-cement piles produced by deep soil mixing technology as the bearing structures foundations of buildings of railway transport is efficient and less resource-intensive compared with other types of pile foundation engineering. The general procedure for creating models vibroreinforced soil-cement piles for finite-element analysis presented in this article. The first step of creating model is geometric creation the volumetric body. This body consists of two components: three-dimensional soil-cement body and linear reinforcing rods. Among the physical and mechanical properties of materials given initial Young's modulus, Poisson's ratio, initial yield stress and initial yield strain. Diagram deformation of materials given also. Pile in basis (soil) is applied body forces. The procedure for applying loads and application of the system anchored to

the piles described among features creation of such conditions. The optimal size of finite-element mesh is performed using piles length of 9 meters and diameter of 750 mm.

Keywords: *building of railways, vibroreinforced soil-cement pile, finite-element model.*

Вступ. Розвиток сучасного будівництва громадських будівель транспортної інфраструктури, а також таких штучних споруд залізничного транспорту, як мости, шляхопроводи, віадуки тощо, спрямований на збільшення їх висоти, прогонів та вантажопропускної здатності. Це призводить до збільшення навантажень на фундаменти та основи. Усе більшого поширення набувають технології укріплення ґрунтів основи цементом, зокрема створення ґрунтоцементних елементів і паль за бурозміщувальною технологією без виймання ґрунту [4].

За допомогою числового моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) напружено-деформованого стану (НДС) будівельних конструкцій та їх окремих елементів можливо розкрити характер їх руйнування чи форму втрати стійкості, виявити небезпечні місця концентрації напружень на їх поверхні, більш детально дослідити роботу арматурних стержнів та каркасів усередині конструкції [2].

Дослідження віброармованих ґрунтоцементних паль, виготовлених за бурозміщувальним методом, регламентуються нормативно-правовими актами України, зокрема Постановою Кабінету Міністрів України від 17.05.2012 р. № 397 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012-2016 роки». Результати роботи використовувалися в межах науково-дослідної роботи кафедри будівельних конструкцій СумНАУ, що зареєстрована в УкрНТІ (номер державної реєстрації 0114U001765).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати досліджень будівельних конструкцій із застосуванням комп'ютерних програм на базі МСЕ [1],

особливо із урахуванням повних діаграм роботи матеріалів, усе частіше висвітлюються у науковій літературі. Зокрема у роботі [7] проведено спрощене моделювання нелінійного аналізу конструкцій на основі методу Койтера-Ньютона. Незначне спрощення дає змогу скоротити числовий розрахунок та практично не знижує точність результатів розрахунку. Комп'ютерне моделювання дає змогу проводити детальні дослідження внутрішніх стержневих елементів у композитних конструкціях [5], а також виконувати повний аналіз тривісного напружено-деформованого стану конструкцій [6].

До нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми належить таке. Взаємодія віброармованих ґрунтоцементних паль, влаштованих у різних видах ґрунту, вивчена ще недостатньо [3], тому неможливо коректно задати всі необхідні дані для розрахунку в геотехнічних комплексах (наприклад, PLAXIS, MIDAS). У проаналізованих наукових працях розкрито важливі питання, які можливо поєднати під час розроблення принципів створення числової скінченно-елементної моделі віброармованих ґрунтоцементних паль, що знаходиться в об'ємних змінних по довжині конструкції в гранично-навантажених умовах.

Визначення мети та задачі дослідження. Удосконалити розрахункову схему системи «основа – віброармована ґрунтоцементна паля» з використанням МСЕ і пружної моделі системи для подальшого оцінювання її НДС. Моделювання палі вирішено виконати як конструкції, а вплив навколишнього ґрунту задати діючими силами бокового тиску й опору тертя по бічній поверхні.

Основна частина дослідження. Для числового моделювання було використано

засіб автоматизації інженерного розрахунку, аналізу міцності та надійності (CAE – computer-aided engineering) FEMAP. Використовувалася навчальна демо-версія SDRC-FEMAP 8/1a S/N 000-00-00-DEMO-406F-00000000.

У програмі була створена модель ґрунтоцементної палі, що була впроваджена та випробувана статичним навантаженням при будівництві 10-поверхового житлового будинку. Для виконання числового експерименту було прийнято використовувати ґрунтові умови та конфігурацію палі, що зазнавала статичних випробувань на будівельному майданчику.

Під час досліджень дотримано всіх передумов числового моделювання, а також введено деякі припущення, що, на думку авторів роботи, не дали значної похибки на результати проведеного моделювання. Зокрема фізико-механічні характеристики сталі та ґрунтоцементу задавалися як для повністю однорідних та ізотропних матеріалів. Також виконувалося незначне коригування діаграм їх деформування, що обумовлено обмеженнями використаного програмного комплексу (січний модуль пружності будь-якого матеріалу не може бути більшим від початкового модуля пружності). Власну

вагу конструкцій моделей не враховано у зв'язку її малості у порівнянні із зовнішнім навантаженням.

Створення скінченно-елементної моделі, адекватної до натурних віброармованих ґрунтоцементних паль для визначення їх НДС, виконувалось у розглянутому нижче порядку.

Під час створення просторової геометрії моделі (етап 1) спочатку формувався плоский круглий поперечний переріз досліджуваної ґрунтоцементної палі $d = 750$ мм. Потім формувалась кругла гранична поверхня, на основі якої видовжувалась об'ємна циліндрична модель палі (див. рис. 1, а). Для задавання арматурних стержнів попередньо об'ємна модель була розбита площинами (рис. 1, б), на перетині яких утворювалися прямі для подальшого розташування на них арматурних стержнів (рис. 1, в).

Під час задавання фізико-механічних властивостей матеріалів (етап 2) враховано пружно-пластичні характеристики матеріалів: нелінійну залежність між деформаціями і напруженнями для ґрунтоцементу (рис. 2) та протяжну ділянку плинності для сталі із незначним зміцненням (рис. 3) [4].

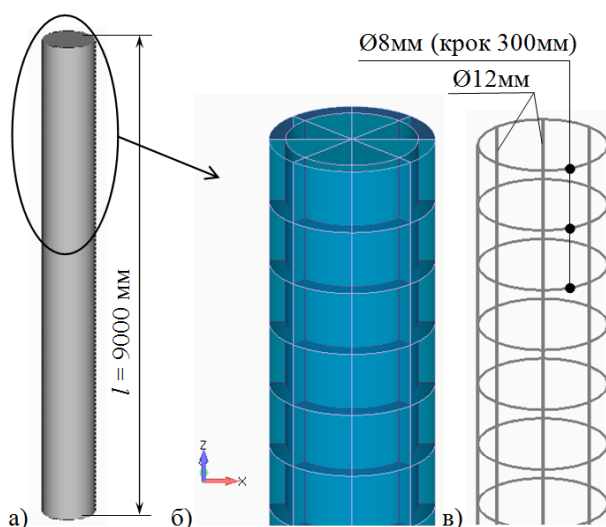


Рис. 1. Об'ємна модель палі (а); елемент палі, розбитий площинами, (б) та ділянка арматурного каркаса (в)

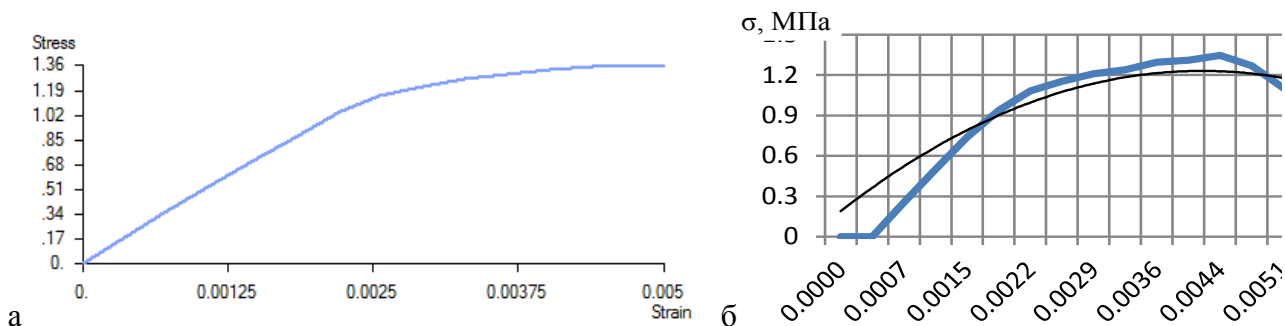


Рис. 2. Нелінійний закон деформування ґрунтоцементу: а – використаний під час числового моделювання; б – за результатами натурних випробувань

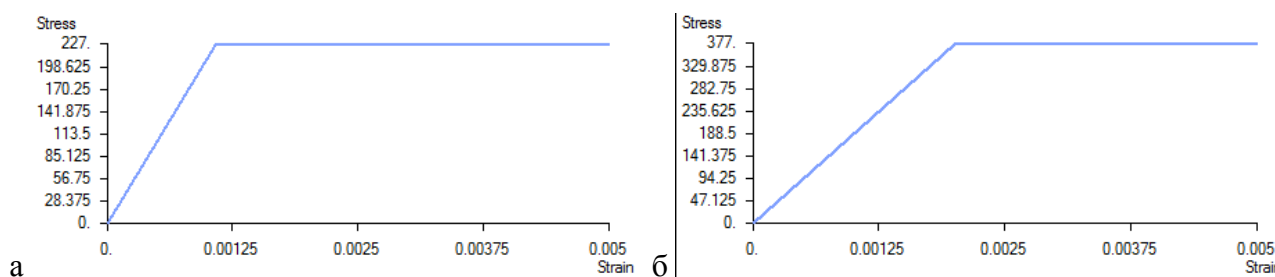


Рис. 3. Спрощений дволінійний закон деформування σ_s - ϵ_s арматурних стержнів класу А240С (а) та А400С (б)

Для проведення розрахунків задано початковий модуль пружності (Young’s Modulus E), коефіцієнт поперечних деформацій (Poisson’s Ratio ν), напруження (Initial Yield Stress σ_y) та деформації (Initial Yield Strain ϵ_y) на кінці ділянки

пропорційності матеріалів – початок плинності та розвитку незворотних (залишкових) деформацій. До таблиці зведені характерні вихідні фізико-механічні характеристики.

Таблиця
Фізико-механічні характеристики прийнятих у розрахунку матеріалів

Вихідний матеріал	Фізико-механічні характеристики				
	$E \times 10^5$ МПа	ν	σ_y , МПа	$\epsilon_y \times 10^{-5}$	σ_{ult} , МПа
Ґрунтоцемент	0,005	0,2	0,35	70	1,36
Арматура класу А240С	2,1	0,3	225	107	227
Арматура класу А400С	2,0	0,3	375	200	377

Під час розбиття композитної моделі на скінченні елементи (СЕ) (етап 3) враховано, що чим менший буде розмір СЕ, тим точніше можна визначити місця концентрації напружень, тобто місця

початку руйнування палі. Проте зменшення розмірів СЕ призводить до підвищення необхідних персональному комп’ютеру ресурсів для проведення розрахунку. Для визначення ефективності типу та розмірів

SE модель ґрунтоцементної палі було розбито на SE двох груп (тетраедри Tet Mesh та гексаедри Hex Mesh (див. рис. 4, а і б) із різними розмірами та визначено необхідні ресурси персонального комп'ютера для проведення відповідних розрахунків. Результати виконаного порівняння наведено на рис. 4, д. Для створення об'ємної SE сітки моделей палі було прийнято використовувати тривимірні об'ємні елементи типу solid у формі гексаедрів. Розмір сторони елемента

приймався 100 мм, що складає близько 1,1 % від максимального розміру моделі. На рис. 4, в, г показана модель палі, розбита на обрані SE, а також внутрішній арматурний каркас, розбитий на SE лінійного типу Line elements – Beam. Після створення скінченно-елементних сіток ґрунтоцементної палі та арматурного каркаса виконувалося обов'язкове об'єднання їх вузлів (Check Coincident Nodes), що збігаються.

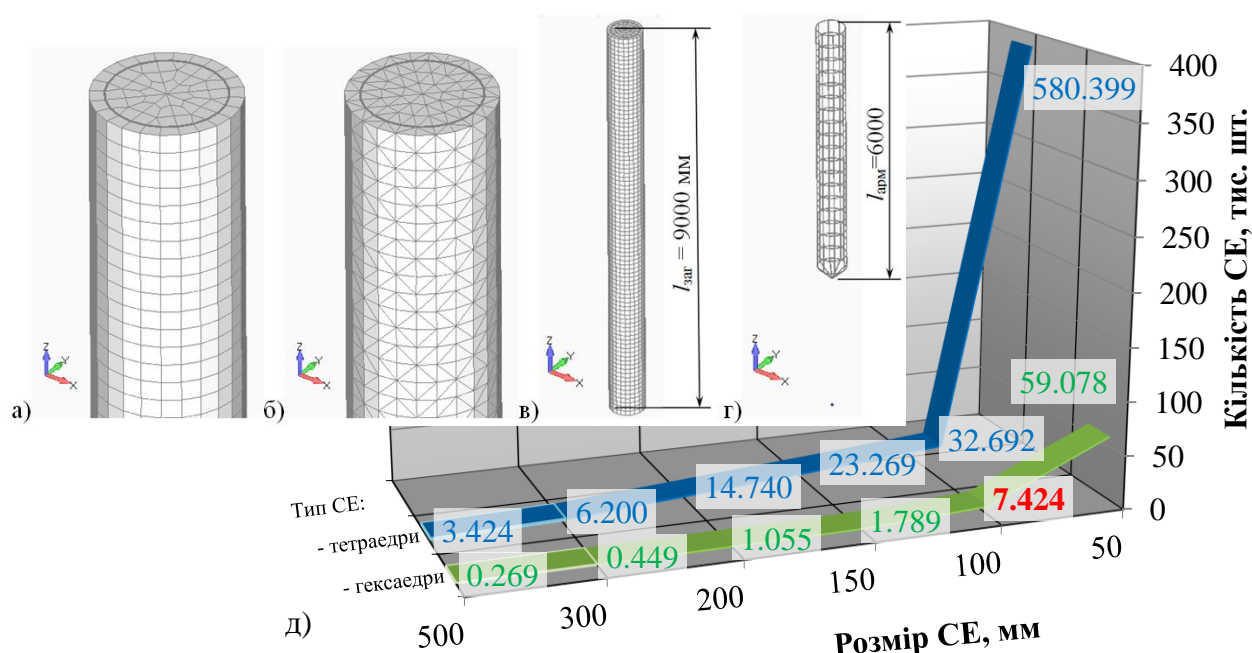


Рис. 4. Порівняння ефективності типу та розмірів SE: фрагмент моделі палі, розбитої на SE гексаедри (а) або тетраедри (б); повна модель ґрунтоцементної палі (в) і арматурного каркаса (г); залежність розмір – кількість SE

Для досягнення результатів розрахунку, які б найкраще відповідали результатам натурального експерименту, врахування повних діаграм деформування вихідних матеріалів недостатньо. Необхідно найбільш точно описати умови роботи палі в реальних умовах – умовах обтиснення інженерно-геологічних шарів. Тобто скласти рівноцінну натурній розрахункову схему роботи палі (етап 4). Для цього, по-перше, слід задати тотожні

реальним умови закріплення (граничні умови) палі і, по-друге, сформувані відповідну систему навантажень, як корисних, так і навантажень навколишнього обтиснення ґрунту.

Граничні умови (Constraint Definition) задавалися рівномірнорозподілені до верхнього та нижнього обрізу палі. До нижнього обрізу палі було прикладене жорстке закріплення (Fixed): заборонялися поступальні переміщення по всіх трьох

координатних осях (TX, TY і TZ) та кутові переміщення по цих же осях (RX, RY і RZ), так як нижній кінець палі був закріплений у товщі ґрунту. Верхній обріз був шарнірно закріплений у площині поперечного перерізу (Pinned): заборонені переміщення в осях TX і TY, так як верхній кінець палі був закріплений тільки ростверком, через який передавалося корисне навантаження.

Навантаження до моделей ґрунтоцементних паль прикладалося як стичне рівномірнорозподілене по відповідних площах та поділялося на три групи: корисне вантажне вертикальне, прийняте рівним максимальному навантаженню, що було прикладене до палі під час проведення натурного експерименту на будмайданчику – 105 т, навантаження бокового обтиснення ґрунтом та сили бокового тертя, що виникали між боковими поверхнями палі та ґрунтом під час її стиску (рис. 5).

Задане вертикальне навантаження на обріз палі під час проведення програмним комплексом розрахунку збільшувалося поетапно. Кількість таких етапів (Max Increments) складала 100 розрахунків. Завершуючи кожний етап розрахунку, програмний комплекс FEMAP формував базу (Output Control) визначених внутрішніх зусиль (Force), напружень (Stress) та переміщень (Strain), а також проводив аналіз відповідності отриманих напружень і деформацій до заданих вихідних діаграм деформування ґрунтоцементу та арматурних стержнів. У разі виявлення невідповідності програмний комплекс вносив коригування та повторював розрахунок даного етапу навантаження. Число таких можливих ітерацій на кожному етапі завантаження (Iterations Before Update) приймалося рівним 10. При цьому точність вихідних даних розрахунку (Convergence Tolerances) приймалася кратною 0,001. Задля точнішого врахування заданих нелінійних

діаграм деформування вихідних матеріалів (Arc-Length Solution Strategy) було ввімкнено опцію Arc-Length Method – так званий «Обхід по кривій».

Бокове навантаження обтиснення палі ґрунтом та навантаження бокового тертя визначено розрахунковим шляхом згідно з проведеними інженерно-геологічними вишукуваннями на будівельному майданчику проведення натурного експерименту палі. Так як паля була розділена по висоті на частини висотою 300 мм (задля влаштування поперечних арматурних каркасів) та по колу на 8 сегментів (задля влаштування вертикальних робочих арматурних стержнів), то задавалися усереднені значення дії сил з рівномірним розподіленням по цих площадках. Тобто розмір площадок, до яких прикладалося бокове навантаження складав по висоті 300 мм та по ширині 295 мм (1/8 периметра палі), що є 1,1 % від загальної довжини конструкції. На рис. 5 показані розподіли бокового обтиснення палі ґрунтом та сил бокового тертя відповідно.

Після створення об'ємної SE моделі ґрунтоцементної палі проводилась перевірка коректності моделі (етап 5), а саме видалялися зайві граничні поверхні, через які могли виникнути непоправні помилки при розрахунках.

Проводився контроль якості та симетричності розбиття моделі на SE, кількість об'єднання вузлів SE сітки, що збігаються, тип граничних умов, величини прикладених навантажень та поверхні їх поширення. На всіх етапах SE аналізу моделей (Load Factor) проводився поточний контроль ходу нелінійного розрахунку (Nonlinear History), а саме контролювалися почерговість та протяжність основних ділянок роботи пружно-пластичних матеріалів: ділянки пружності, пропорційності, плинності, зміцнення тощо.

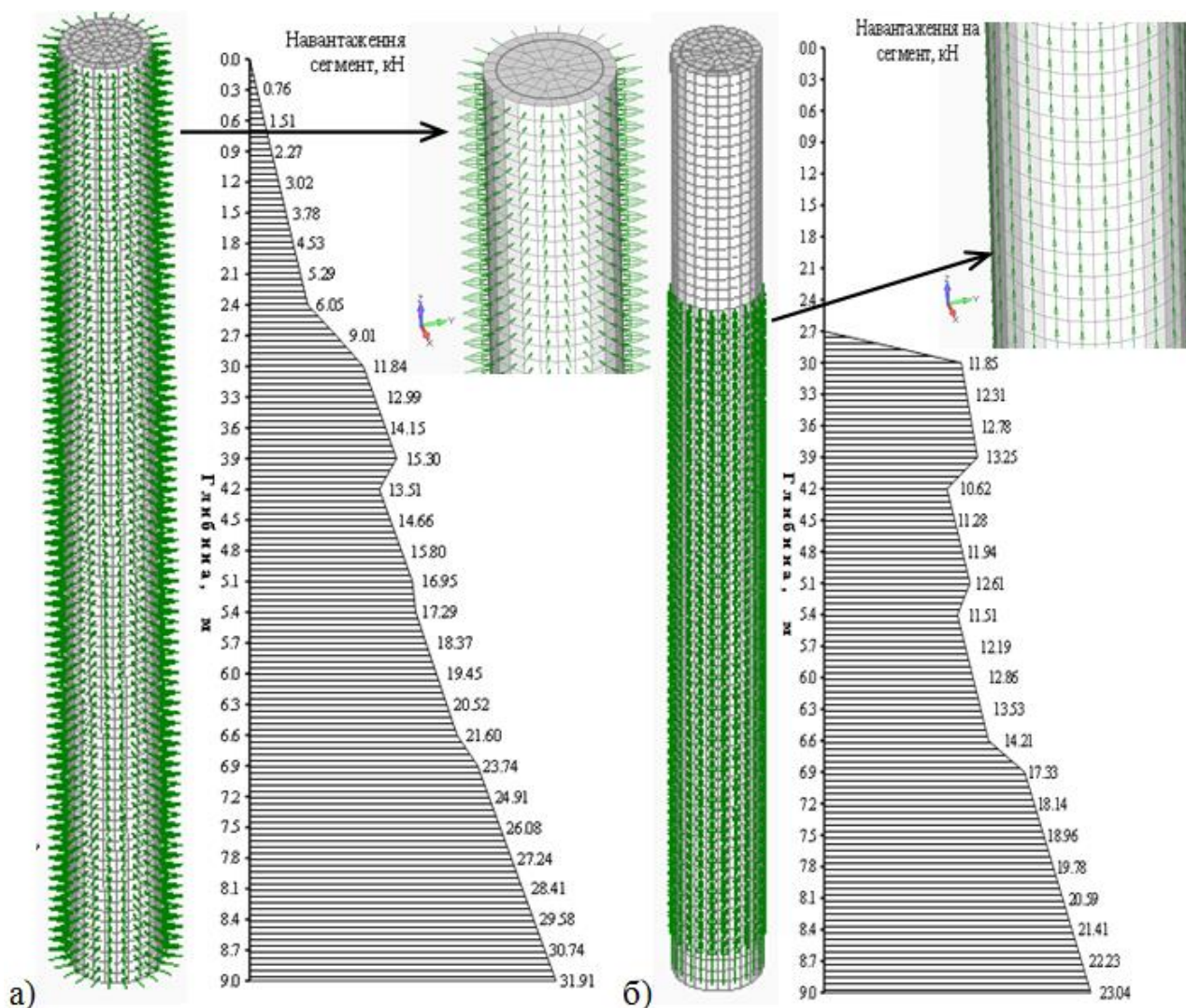


Рис. 5. Діаграми розподілу зусиль по висоті: а – бокового обтиснення палі ґрунтом; б – тертя між боковими поверхнями палі та ґрунтом під час її стиску

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Створена скінченно-елементна модель системи «основа – віброармована ґрунтоцементна паля» дає змогу проводити аналіз напружено-деформованого стану палі по висоті в залежності від інженерно-геологічних умов основи. За результатами числених досліджень можливо визначати найбільш

оптимальні розміри ґрунтоцементних паль, а також конструкцію їх армування (діаметр та крок розташування поздовжніх і поперечних арматурних стержнів), що може бути використано під час нового будівництва громадських будівель інфраструктури та штучних споруд залізничного транспорту, а також під час проведення ремонтно-відновлювальних робіт таких існуючих споруд.

Список використаних джерел

1. Гореев, В. В. Математическое моделирование при расчетах и исследованиях строительных конструкций [Текст] / В.В. Гореев, В.В. Филиппов, Н.Ю. Тезиков. – М.: Высшая школа, 2002. – 206 с.
2. Городжа, А. Д. Сучасний стан контролю якості залізобетонних паль і бурових стовпів [Текст] / А.Д. Городжа, Б.О. Трошинський, В.П. Козел // Основи і фундаменти: міжвідомчий наук.-техн. зб. – К.: КНУБА, 2006. – Вип. 30. – С. 34-38.
3. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти [Текст]: підручник / М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев [та ін.]. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.
4. Цветков, В. С. Учет технологических факторов при проектировании состава цементогрунтовых смесей [Текст] / В. С. Цветков. – М.: Стройиздат, 1978. – 210 с.
5. Beicha D. Effective transverse elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites [Text] / D. Beicha, T. Kanit, Y. Brunet, A. Imad, A. E. Moumen, Y. Khelifaoui // Mechanics of Materials. – 2016. – Vol. 102. – pp. 47-53. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.08.010.
6. Bishnu P. A new method of applying long-term multiaxial stresses in concrete specimens undergoing ASR, and their triaxial expansions [Text] / P. G. Bishnu, K. P. Daman // Materials and Structures. – 2016. – Vol. 49 (9). – pp. 3409-3508. – DOI: 10.1617/s11527-015-0734-z.
7. Liang K. An eigenanalysis-based bifurcation indicator proposed in the framework of a reduced-order modeling technique for non-linear structural analysis [Text] / K. Liang, M. Ruess, M. Abdalla // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2016. – Vol. 81. – pp. 129-138. – DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2016.01.013.

Гасенко Антон Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050)404-64-88. E-mail: gasent@mail.ru.

Новицький Олександр Павлович, канд. техн. наук, заступник начальника ДП ПАТ «СУМБУД» Головна випробувальна лабораторія в будівництві. Тел.: (050)577-78-27. E-mail: novitskiy_a@i.ua.

Рожко Валерій Нарцизович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050) 740-38-63. E-mail: vn_rozhko@mail.ru.

Hasenko Anton, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Reinforced-concrete and Stone Constructions and Strength of Materials, Faculty of Civil Engineering, Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University. Tel.: (050)404-64-88. E-mail: gasent@mail.ru.

Novitskiy Oleksandr, PhD. Sc, deputy head SC PJSC «SUMBUD» Main testing laboratory in construction. Tel.: (050)577-78-27. E-mail: novitskiy_a@i.ua.

Rozhko Valerij, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Reinforced-concrete and Stone Constructions and Strength of Materials, Faculty of Civil Engineering, Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University. Tel.: (050)740-38-63. E-mail: vn_rozhko@mail.ru.

Стаття прийнята 13.02.2017 р.

УДК 656.073:656.222.4

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ МАЛОМОЩНЫХ
ВАГОНПОТОКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ ВЗАИМОУВЯЗАННЫХ
ГРУППОВЫХ ПОЕЗДОВ**

Н. А. Кекиш (БелГУТ)

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ МАЛОПОТУЖНИХ
ВАГОНПОТОКІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ
ГРУПОВИХ ПОЇЗДІВ**

Н. А. Кекіш (БілДУТ)

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE LOW-POWER CAR FLOWS USING THE
SYSTEM OF INTERRELATED GROUP TRAINS**

N. A. Kekish

Рассмотрены принципы организации вагонопотоков по системе взаимосвязанных групповых поездов и ее отличительные особенности. Проанализированы основные факторы, определяющие эффективность данной системы с точки зрения ускорения продвижения маломощных вагонопотоков. Приведены результаты сравнительной технико-экономической оценки реализации предлагаемой системы организации на полигоне Белорусской железной дороги и даны рекомендации по перспективам ее применения на других полигонах.

Ключевые слова: организация вагонопотоков, конфигурация полигона, маломощные потоки, групповые поезда, постоянное расписание, потенциал транзитности.

Розглянуто принципи організації вагонопотоків по системі взаємопов'язаних групових поїздів і її відмінні риси. Проаналізовано основні фактори, що визначають ефективність даної системи з точки зору прискорення просування малопотужних вагонопотоків. Наведено результати порівняльної техніко-економічної оцінки реалізації запропонованої системи організації на полігоні Білоруської залізниці та надано рекомендації щодо перспектив її застосування на інших полігонах.

Ключові слова: організація вагонопотоків, конфігурація полігона, малопотужні потоки, групові поїзди, постійний розклад, потенціал транзитності.

This paper is dedicated to considering the basic principles of the organization of car flows on the system of interrelated group trains and its distinctive features. The main factors determining the effectiveness of the system in terms of accelerating the promotion of low-power car flows and reduce transportation costs were analyzed. The use of regular schedule and taking into account the permanent factor of polygon configuration allows to create a transparent and stable system of organization.

The article stresses the need to clarify terminology. In particular, the quantification of the term "low-power flow" was made, as well as given an extended interpretation of the term "implementation of the transit potential" in the application to the proposed system.

The article contains results of the comparative technical and economic evaluation of the implementation of the proposed system at the Belarusian Railways polygon and recommendations on the prospects for its use on other railways.

Keywords: *Organization of car flows, polygon configuration, low-power flows, group trains, regular schedule, transit potential.*

Введение. Система организации вагонопотоков является технологической основой, на которой базируется вся работа железнодорожного транспорта. Скорость доставки, себестоимость перевозок, эффективность использования инфраструктуры и подвижного состава, численность персонала и степень напряженности его работы, безопасность движения – все эти факторы, непосредственно определяющие конкурентоспособность железных дорог, зависят от выбранной системы организации вагонопотоков. Поэтому при решении вопросов, связанных с системой организации вагонопотоков, очень важен комплексный подход.

Разделение обширного союзного полигона на полигоны отдельных стран поставило перед железнодорожными администрациями сложную задачу адаптации системы организации к условиям и экономическим интересам своей страны с одновременным сохранением устойчивого технологического взаимодействия с соседними дорогами. Такая адаптация жизненно необходима для ряда дорог в связи с резким различием в размерах, конфигурации полигонов и структуре внутридорожного вагонопотока по мощности. Эти отличия делают невозможным применение с прежней эффективностью устоявшихся принципов организации, разработанных для других условий.

Анализ исследований. Система организации вагонопотоков, которая долгие годы использовалась на союзном полигоне, за последние годы претерпела существенные изменения на большинстве входивших в него железных дорог. Наиболее явной является тенденция к переходу на технологии постоянного

расписания [1-4]. Эта тенденция является закономерной и отражает требования рынка по созданию транспортного продукта с приемлемыми для условий конкурентной среды параметрами перевозки. На РЖД она реализуется прежде всего для отправительской маршрутизации, что объясняется особенностями структуры вагонопотока [4]. Что касается зарубежного опыта применения постоянного расписания в грузовом движении, то особый интерес для полигонов масштабов Белорусской железной дороги или Укрзализниці представляет опыт небольших европейских стран, например Словакии [5], с их системой дискретного формирования и обращения грузовых поездов между выделенными станциями сети по постоянному расписанию. Однако эффективному применению такой технологии может препятствовать стабильно большая доля маломощных корреспонденций во внутридорожном потоке на ряде полигонов. В связи с этим закономерно существенное возрастание интереса к такой форме организации вагонопотоков, как групповые поезда. Однако подход к определению эффективности выделения групповых назначений в плане формирования [2] в целом остается прежним:

- традиционное позиционирование групповых поездов как средства организации вагонопотоков на направлениях с переломом массы и длины составов;
- нормирование в том или ином виде их массы и длины с незначительными отклонениями;
- методика расчета, базирующаяся на изначальном приоритете одnogруппных назначений и сравнении по отдельным струям.

Возможность формирования взаимосвязанных групповых поездов, обращающихся по постоянному расписанию, хотя и декларируется, но не дается четких рекомендаций по сфере применения этого способа организации, критериям выделения групповых назначений, количеству групп. В большинстве своем исследования ведутся в направлении организации групповых поездов в оперативных условиях [6-9]. Но для оперативной организации требуется основа в виде плана формирования, а существующие подходы к выделению групповых назначений не дают возможности эффективно применять предлагаемые схемы обращения групповых поездов.

Цель исследования. Целью настоящего исследования является разработка системы организации внутридорожных маломощных вагонопотоков на базе сети взаимосвязанных групповых поездов (ВГП), обращающихся по постоянному расписанию в пределах замкнутого разветвленного полигона. Учет особенностей конфигурации полигона и структуры обращающихся вагонопотоков призван адаптировать систему организации к конкретным условиям функционирования.

Основная часть исследования. Предлагаемая система ВГП имеет четко очерченную сферу применения, определяемую характеристиками полигона обращения и структурой вагонопотока. Она является комплементарной по отношению к существующей системе организации. В назначения, формируемые в рамках системы ВГП, включаются только корреспонденции вагонопотоков, обращающиеся в пределах полигона дороги и не охваченные назначениями межгосударственного сетевого плана формирования, отправительской и порожней маршрутизации.

Характеристики полигона обращения: замкнутый полигон с высокой степенью разветвленности по данной классификации [10], количеством технических станций на каждом направлении не менее 3, общим количеством технических станций не менее 8.

Структура вагонопотока: выделенный для обращения по данной системе внутридорожный вагонопоток должен иметь выраженное преобладание маломощных потоков (струй вагонопотока) в общей структуре (более 50 % от их общего количества). Маломощные струи вагонопотока определенных назначений образуются при агрегации соответствующих маломощных корреспонденций. Следует отметить необходимость квантификации термина “маломощный поток”. Этот термин употребляется достаточно давно и широко, но, как правило, без указания на количественные параметры, позволяющие классифицировать поток как маломощный. Исключением можно считать статью [9], где авторы определяют маломощное назначение как назначение с суточным вагонопотоком менее 60-80 ваг/сут. Представляется целесообразным привязка верхней количественной границы маломощного потока к объекту исследования – параметрам существующей системы организации. В отношении выбранного для исследования полигона маломощным следует считать поток, среднесуточная мощность которого составляет менее $\frac{3}{4}$ мощности, достаточной для выделения сквозного одnogруппного назначения при средней величине составов поездов, формируемых на данном полигоне в рамках технической маршрутизации. Снижение порога мощности потока на $\frac{1}{4}$ призвано учесть возможные колебания величины состава при разных методах поездообразования (отправление по свободному расписанию с накоплением до унифицированной или дифференцированной массы/длины состава либо отправление по постоянному расписанию с накоплением до нормы массы/величины состава с установленным отклонением, как это описано в модели [11]). Например, предлагаемая система ВГП может быть применена к полигону соответствующей конфигурации, если более 50 % струй вагонопотоков на назначения в пределах

полигона дороги имеют мощность менее 45 ваг/сут при средней величине формируемых составов в 60 ваг.

Система ВГП является замкнутой, выделение групповых назначений и обращение поездов в ее рамках предусматривается только в пределах выбранного полигона. Замкнутый характер определяется возможностью влиять на продвижение отдельных категорий вагонопотоков через систему их организации, минимально затрагивая уже сформированную структуру взаимодействия между соседними железнодорожными администрациями.

Система ВГП базируется на принципах декомпозиции, повышения транзитности и взаимосвязи. Принцип декомпозиции отражает структуру сети для задачи организации выделенного вагонопотока. Все станции полигона классифицируются как узловые пункты трех уровней, а сам полигон разбивается на соответствующие районы тяготения. Механизм повышения транзитности в системе ВГП реализуется через максимально возможную для данного полигона и технологически приемлемую детализацию потока при формировании групповых назначений, переход вагонов из состава одного поезда в состав другого преимущественно через обмен групп, а также через жесткое нормирование времени нахождения вагонов на узловых пунктах и в районах тяготения. Принцип повышения транзитности диктует необходимость формировать групповые поезда с возможно большим, но целесообразным с технологической точки зрения количеством групп в составе. Например, для условий полигона Белорусской железной дороги это групповые поезда с максимальным количеством групп в составе, равным 4. Такое количество групп дает возможность большинству узловых пунктов первого уровня сформировать групповые назначения с максимальной возможностью

реализации имеющегося потенциала транзитности.

Принцип взаимосвязи подразумевает два основных требования к организации обращения ВГП:

- структура формируемых групповых назначений должна обеспечивать технологическую возможность обмена групп с учетом действующих ограничений;
- должно быть разработано постоянное расписание обращения ВГП, учитывающее необходимость согласованного подвода поездов из районов тяготения, согласованного приема ВГП с пересекающихся направлений и согласованного их отправления на основе установленных норм простоя.

Для конкретного исследуемого полигона с использованием теории графов разрабатывается базовая модель организации вагонопотоков по системе ВГП, которая является основой плана формирования поездов в рамках данной системы. Математическая постановка задачи построения и корректировки базовой модели предусматривает формирование множества вариантов групповых назначений, их поэтапный отбор и взаимную увязку в масштабах полигона [12].

Методика построения и корректировки базовой модели имеет ряд принципиальных отличий от классической методики расчета плана формирования групповых поездов, используемой в инструктивных указаниях [2]:

1) пространственный характер расчета: предусмотрено формирование групповых поездов всеми выделенными узловыми пунктами первого уровня на полигоне, а не только на отдельных направлениях;

2) изначально заложенный приоритет групповых поездов: сфера применения системы ВГП, особенно в части структуры выделенного вагонопотока по мощности, предопределяет нецелесообразность в большинстве случаев формирования

сквозных однопутных поездов в рамках данной системы;

3) критерий выделения назначений: основным критерием выступает максимальная реализация потенциала транзитности для данной конфигурации полигона, а не мощность потока;

4) нормирование массы/длины составов или отдельных групп: в системе ВГП для составов определяется средняя величина состава, используемая для расчетов, а также широкий диапазон допустимой величины состава для целей оперативной работы по формированию групповых поездов. Нижняя граница этого диапазона может быть рассчитана по методике, приведенной в [13], в качестве верхней границы может быть использовано ограничение по силе тяги или ограничение по длине приемо-отправочных путей (в зависимости от условий конкретного полигона). Таким образом, система ВГП использует категорию групповых поездов, не предусмотренную существующими методиками: без постоянного веса групп, но с постоянным расписанием;

5) отсутствие “ядра”: базовая технология ВГП предусматривает преимущественно не прицепку или отцепку, а перецепку групп, в том числе между несколькими согласованными поездами пересекающихся в данном узловом пункте направлений. При такой технологии и отсутствии жесткого нормирования массы/длины групп наличие “ядра” не является необходимым;

б) интенсивность обращения. В существующей системе организации вагонопотоков решающим критерием в определении интенсивности отправления поездов является мощность потока и некоторая установленная норма величины состава. В системе ВГП основными параметрами выступают норма времени на переход вагонов из состава в состав и норма времени на обслуживание района тяготения, рассчитанные из условия соблюдения установленной маршрутной

скорости. Через эти параметры в системе ВГП изначально закладываются условия соблюдения срока доставки в той части логистической цепи доставки груза, в которой на этот процесс может повлиять система организации вагонопотоков в пределах выбранного полигона [14].

Реализация основных принципов построения системы ВГП позволяет:

- создать оптимальные условия для продвижения каждого типа вагонопотока в соответствии с его мощностью и характером следования. Комплементарность системы ВГП по отношению к существующей системе организации вагонопотоков сохраняет эффективный механизм организации для дальних мощных вагонопотоков (отправительская маршрутизация, выделение сквозных однопутных назначений), в то же время обеспечивая продвижение дальних маломощных потоков на основе их поэтапной агрегации в масштабах полигона;

- создать минимальные равные с точки зрения потенциального соблюдения срока доставки условия для продвижения вагонопотоков вне зависимости от мощности каждой конкретной струи и от того, по каким участкам пролегает маршрут следования – малодетальным или грузонапряженным;

- создать условия для максимальной прозрачности процесса перевозки как для клиента, так и для оперативной работы за счет существенного снижения уровня неопределенности в системе.

Эти преимущества одинаково важны как для интеграционной, так и для сепарационной модели организации работы железных дорог [15], что создает предпосылки к эффективному внедрению предлагаемой системы на полигонах с различными условиями взаимодействия между основными структурными подразделениями, обслуживающими перевозочный процесс.

Эффективность организации маломощных вагонопотоков по системе

ВГП прежде всего оценивается по ускорению их продвижения. При этом следует иметь в виду, что ускорение не является самоцелью. Его смысл лежит в достижении двух основных целей: соблюдение установленного срока доставки и ускорение оборота вагона.

При существующей системе организации вагонопотоков маломощные корреспонденции включаются, как правило, в участковые поезда. На полигонах с высокой степенью разветвленности и большим количеством технических станций на маршруте следования для дальних потоков это оборачивается длительными простоями на транзитных станциях из-за многочисленных переработок. Система ВГП дает возможность ускорить продвижение дальних маломощных потоков за счет двух основных факторов: лучшей реализации потенциала транзитности и сокращения продолжительности простоя на технических станциях (узловых пунктах).

Классическая трактовка понятия потенциала транзитности [16] в

применении к организации вагонопотоков по системе ВГП требует расширения и уточнения. В трактовке понятия потенциала транзитности применительно к системе ВГП можно выделить два аспекта:

- дальность следования корреспонденций;
- характер проследования технической станции.

Поскольку для условий функционирования системы ВГП полигон представляется как замкнутый, то дальность следования корреспонденций при анализе реализации потенциала транзитности ограничивается пределами полигона. В качестве технических станций формирования, транзита и расформирования выступают соответствующие узловыe пункты первого уровня направления. Различие с существующей системой иллюстрирует рис. 1. Если при существующей системе дальность следования корреспонденции вагонопотока равна расстоянию 1-5, то при системе ВГП станцией назначения считается станция 4.

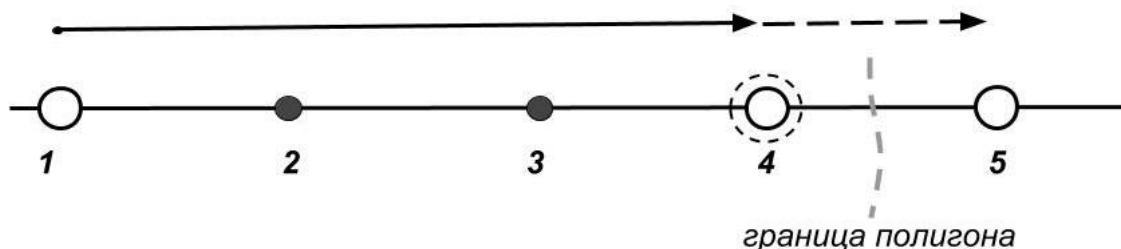


Рис. 1. Искусственное ограничение дальности следования корреспонденций для оценки реализации потенциала транзитности в системе ВГП

Классическая трактовка предусматривает реализацию потенциала транзитности при проследовании технической станции транзитом без переработки. В системе ВГП каждая корреспонденция вагонопотока, включенная в такие поезда, может проходить транзитную техническую станцию двумя способами: транзитом с

обменом групп и транзитом с переработкой, причем, согласно принципам построения системы ВГП, преимущественно переход вагонов из состава одного поезда в состав другого должен проходить через обмен групп. Таким образом, для системы ВГП трактовка реализации потенциала транзитности должна быть

расширена на проследование транзитом с обменом групп. Такое расширение правомерно с точки зрения:

1) сущности выполняемых технологических операций, т.к. имеет место отсутствие переработки вагонов, которые следуют через данную техническую станцию (в системе ВГП – узловой пункт первого уровня) транзитом с обменом групп;

2) продолжительности выполняемых операций, т.к. простой при следовании транзитом с обменом групп, как правило, незначительно превышает простой при следовании транзитом без переработки и всегда существенно меньше простоя при следовании транзитом с переработкой.

Кроме того, для системы ВГП в связи с особенностями конфигурации полигонов, рекомендуемых для ее применения, может присутствовать такой тип проследования технической станции, как проследование без остановки. Возможность проследования узлового пункта первого уровня без остановки закладывается на этапе расчета базовой модели организации вагонопотоков по системе ВГП (плана формирования системы ВГП). Такой вариант проследования может быть квалифицирован как абсолютная реализация потенциала транзитности. При существующей системе организации вагонопотоков такой вариант также возможен. Для сквозных одnogруппных назначений основным ограничителем по абсолютной реализации потенциала транзитности выступает конфигурация полигона, а именно расстояния между техническими станциями, определяющие схему оборота локомотивов.

Таким образом, для корректного сравнения системы организации вагонопотоков на базе ВГП с существующей системой организации вагонопотоков по критерию реализации потенциала транзитности следует учитывать особенности обращения ВГП и искусственно ограничивать дальность

следования корреспонденции рамками выбранного полигона.

Под уровнем транзитности назначения понимается количество технических станций, которые корреспонденции вагонопотока, включенные в данное назначение, будут проходить транзитом без переработки [17], в расширенной трактовке – транзитом с обменом групп. В качестве назначения, для которого оценивается уровень транзитности, в системе ВГП выступает назначение каждой отдельной группы в групповом составе. В качестве технической станции, относительно которой оценивается реализация потенциала транзитности, рассматривается транзитный узловой пункт первого уровня. Узловые пункты первого уровня, выступающие как станции отправления и назначения корреспонденции вагонопотока в пределах полигона, потенциально не могут быть проследованы транзитом, поэтому при расчете уровня транзитности не учитываются.

Если говорить о степени реализации потенциала транзитности, то можно выделить следующие категории назначений, в которые могут включаться корреспонденции вагонопотоков (рис. 2):

- назначения, не обладающие потенциалом транзитности (А). Не обладают потенциалом транзитности назначения на соседнюю техническую станцию (узловой пункт первого уровня) на соответствующем направлении. В данном случае потенциал транзитности не реализуется по объективным причинам, обусловленным характеристиками самой корреспонденции;

- назначения, частично реализующие имеющийся потенциал транзитности (В). При включении корреспонденции вагонопотока в такие назначения часть транзитных узловых пунктов первого уровня на маршруте следования он проходит без переработки (с обменом групп), а часть – с переработкой;

- назначения, полностью реализующие потенциал транзитности (C). При включении корреспонденции вагонопотока в такие назначения все транзитные узловые пункты первого уровня на маршруте следования он проходит без переработки (с обменом групп);

- назначения, полностью не реализующие потенциал транзитности (D). При включении корреспонденции вагонопотока в такие назначения все транзитные узловые пункты первого уровня на маршруте следования он проходит с переработкой.

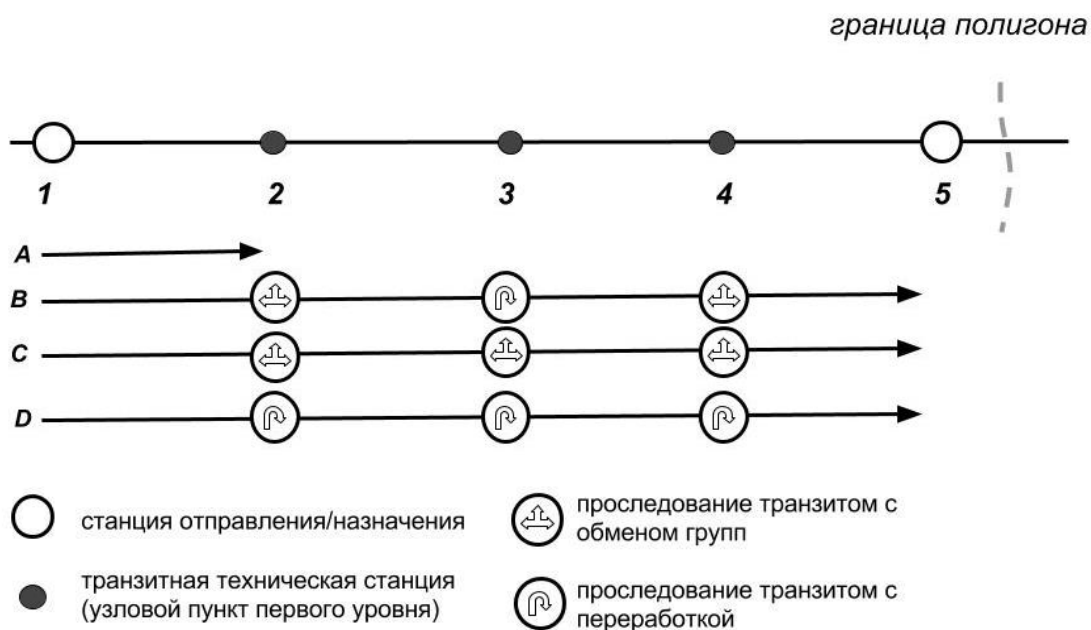


Рис. 2. Варианты реализации потенциала транзитности различными категориями назначений

Во всех случаях маршрут следования для системы ВГП ограничен масштабами полигона.

Сокращение продолжительности простоя на технических станциях (узловых пунктах первого уровня) достигается как за счет уменьшения количества переработок вагонов дальних назначений в связи с лучшей реализацией потенциала транзитности, так и за счет жесткого нормирования продолжительности нахождения вагонов на узловых пунктах. Происходит не только замена более длительного простоя транзитного вагона с переработкой значительно менее длительным простоем при обмене групп, но и сокращение продолжительности простоя с переработкой.

Для проведения сравнительной оценки ускорения продвижения маломощных вагонопотоков за счет повышения уровня транзитности формируемых назначений на основании данных о фактических вагонопотоках за 2016 г., полученных из АСОВ “Динамическая карта”, была сформирована итоговая модель организации вагонопотоков по системе ВГП для полигона Белорусской железной дороги (ИМ). Эта модель была сопоставлена с моделью организации внутридорожного вагонопотока по существующему плану формирования (ПФ).

Сопоставление производилось для той части вагонопотока, которая может быть охвачена системой ВГП. Дальность следования корреспонденций в обоих вариантах была ограничена рамками

полигона. В качестве технических станций, относительно которых для обоих вариантов определялась степень реализации потенциала транзитности, были выбраны 17 основных станций Белорусской железной дороги, которые в системе ВГП выступали как узловые пункты первого уровня. Проследование технических станций, находящихся на маршруте

следования между выделенными узловыми пунктами первого уровня, в данном расчете не учитывалось.

Сравнивая достигнутый уровень транзитности назначений, можно отметить и количественное, и качественное преимущество системы ВГП по этому показателю (рис. 3).

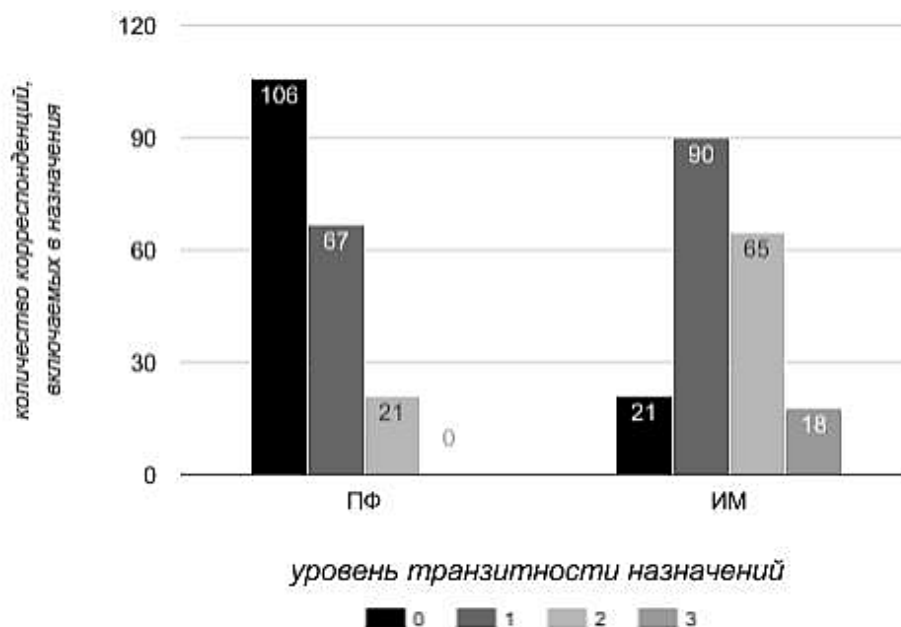


Рис. 3. Уровень транзитности назначений при существующей системе организации и системе ВГП

Количественное преимущество определяется ростом количества корреспонденций, включаемых в назначения первого и второго уровня транзитности. Количественное изменение видно по появлению назначений третьего уровня транзитности, отсутствующих в существующей системе. Преобладающая часть вагонопотока в условиях предлагаемой системы включается в назначения, полностью или частично реализующие имеющийся потенциал транзитности. При существующей системе наблюдается обратная картина: из-за

преобладания участковых назначений в структуре плана формирования большая часть рассматриваемого вагонопотока включается в назначения, полностью не реализующие имеющийся потенциал транзитности (рис. 4).

Повышение транзитности вагонопотоков при реализации системы ВГП положительно сказывается на ускорении их продвижения, что убедительно демонстрируют сравнительные графики маршрутной скорости (рис. 5). Следует отдельно отметить, что при существующей системе с нарушением установленной

маршрутної швидкості на частині маршрута між вузловими пунктами першого рівня слідують 37% від загальної кількості кореспонденцій.

В найбільшій ступені при реалізації системи ВГП закономірно прискорюється просування дальніх кореспонденцій (рис. 6).

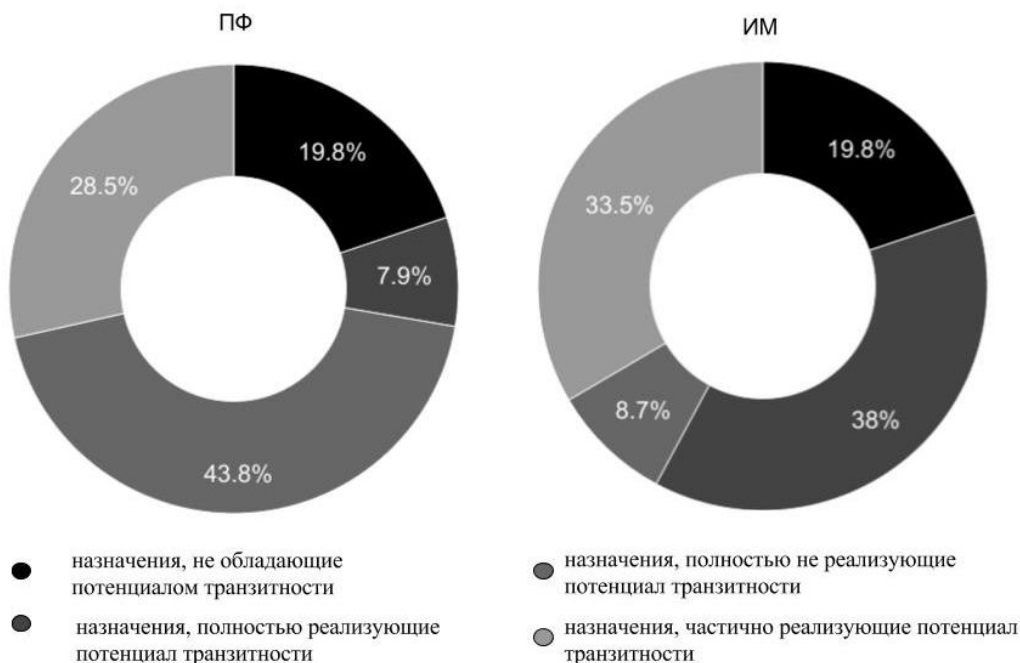


Рис. 4. Распределение выделенного вагонопотока по назначениям с разной степенью реализации потенциала транзитности

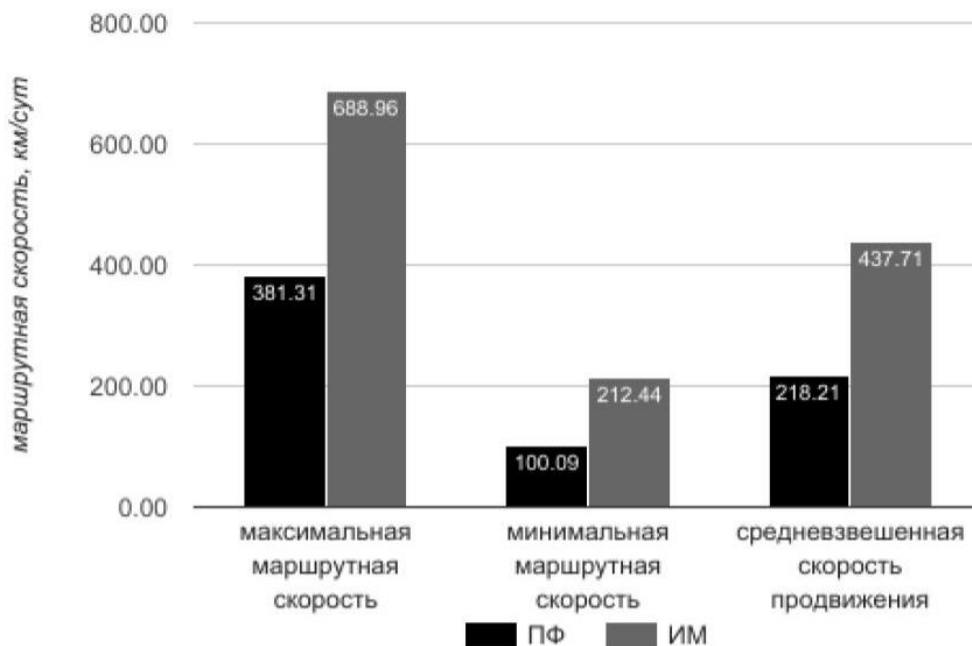


Рис. 5. Сравнительные показатели маршрутной скорости

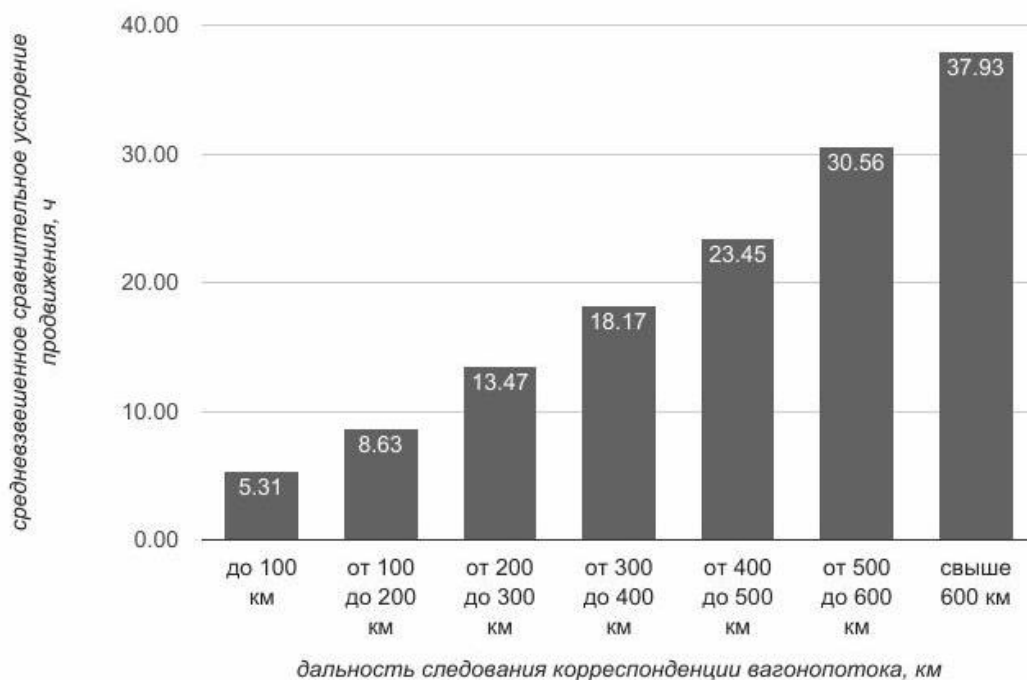


Рис. 6. Ускорение продвижения корреспонденций вагонопотоков в зависимости от дальности следования при реализации системы ВГП

При данном расчете были выделены следующие основные факторы сокращения затрат при организации вагонопотоков по системе ВГП (по сравнению с существующей системой организации):

- ускорение оборота вагона, обеспечивающее снижение затрат на простой вагонов на 64 %, суммарных затрат на перевозки для выделенной части вагонопотока – на 18-27 %;
- выравнивание размеров движения в четном и нечетном направлении за счет установления минимальной интенсивности отправления (снижение затрат на дополнительный пробег локомотивов из-за разности размеров движения на 71 %);
- перераспределение объема переработки между станциями (снижение общего объема переработки на 10 % с повышением эффективности использования сортировочных мощностей в целом по полигону).

Выводы и перспективы дальнейшего развития. Предлагаемая система ВГП является эффективным

инструментом организации маломощных внутридорожных вагонопотоков на полигонах с высокой степенью разветвленности. Обращение по постоянному расписанию, учет конфигурации полигона и заложенные в основу расчета принципы повышения транзитности и соблюдения срока доставки позволяют добиться существенного ускорения продвижения маломощных вагонопотоков. Экономическая целесообразность применения данной системы определяется прежде всего уровнем снижения затрат, связанных с ускорением оборота вагона.

Система адаптирована для применения на полигонах с двумя основными признаками: высокая степень разветвленности по конфигурации и преобладание маломощных потоков в общей структуре. Кроме исследованного в работе полигона Белорусской железной дороги, по критерию конфигурации в качестве перспективных для внедрения системы могут рассмат-

риваться полигоны Дальневосточной, Забайкальской, Свердловской, Северо-Кавказской, Юго-Восточной железных

дорог (среди полигонов РЖД), а также объединенный полигон Львовской и Юго-Западной дорог Укрзализниці.

Список использованных источников

1. Шаров, В. А. Интегрированная технология управления движением грузовых поездов по расписанию [Текст] / В. А. Шаров, А. Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 8. – С. 11–22.
2. Методические рекомендации по организации вагонопотоков на Белорусской железной дороге [Текст]: утв. приказом № 772 НЗ первого заместителя начальника Белорусской железной дороги 30.12.2013. – Минск, 2014. – 324 с.
3. Інструктивні вказівки з організації вагонопотоків на залізницях України [Текст]: №1028 – ЦЗ: затв. наказом Укрзалізниці 29.12.2004. – К.: ТОВ «Швидкий рух», 2005. – 100 с.
4. Апатцев, В. И. К реализации комплексной программы поэтапного перехода на организацию движения грузовых поездов по расписанию на российских железных дорогах [Текст] / В. И. Апатцев, В. А. Шаров // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 3. – С. 69–72.
5. Masek, J. Innovative Methods of Improving Train Formation in Freight Transport [Text] / J. Masek, J. Samaj, E. Nedeliakova // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineer. – 2015. – Vol. 9, Issue 11. – P. 1936-1939.
6. Прохорченко, А. В. Удосконалення технології роботи полігона мережі на основі організації групових поїздів за жорстким графіком руху [Текст] / А. В. Прохорченко // 36. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 114. – С. 196-200.
7. Бутько, Т. В. Формалізація технології організації групових поїздів оперативного призначення [Текст] / Т. В. Бутько, А. В. Прохорченко, А. М. Киман // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 4, № 3 (76). – С. 38-43.
8. Киман, А. М. Удосконалення технології організації групових поїздів оперативного призначення на основі синхронізації графіка руху на станціях обміну груп вагонів [Текст] / А. М. Киман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 5. – С. 48-51.
9. Лаврухін, О. В. Формування автоматизованої технології просування групових поїздів оперативного призначення [Текст] / О. В. Лаврухін, О. М. Костенніков, А. М. Киман // Транспортні системи та технології перевезень. – 2016. – Вип. 12. – С. 51-57.
10. Кудрявцев, В. А. Закономерности составообразования на сортировочных станциях при отправлении поездов по твердому графику движения [Текст] / В.А. Кудрявцев, А.А. Светашев // Известия ПГУПС. – 2015. – №2. – С. 5–14.
11. Кекиш, Н. А. Конфигурация полигонов железных дорог [Текст] / Н. А. Кекиш // Мир транспорта. – 2011. – №2(35). – С. 98–103.
12. Кекиш, Н. А. Математическая постановка задачи формирования базовой модели организации вагонопотоков по системе взаимоувязанных групповых поездов между узловыми пунктами первого уровня [Текст] / Н. А. Кекиш // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2007. – № 1–2 (14–15). – С. 99–103.
13. Кудрявцев, В. А. Определение оптимальной нормы состава грузового поезда [Текст] / В. А. Кудрявцев, В. В. Волчанинов, Ю. А. Кокшаров // Известия ПГУПС. – 2004. – №2. – С. 19–28.

14. Кекиш, Н. А. Организация вагонопотоков по системе взаимоуязванных групповых поездов: проблемы и пути решения [Текст] / Н. А. Кекиш // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2009. – № 1(18). – С. 34–37.

15. Jaržemskis, A. The Differences in Efficiency Measurment: The Case of European Raylways [Text] / A. Jaržemskis, V. Jaržemskis // Transport and Telecommunication. – 2014. – Vol. 15, № 2. – P. 151-163.

16. Аветикян, А. А. Потенциал транзитности вагонопотоков [Текст] / А. А. Аветикян. – М.: Транспорт, 1981. – 191 с.

17. Ерофеев, А. А. Повышение транзитности в системе организации вагонопотоков [Текст] / А. А. Ерофеев // Наука и прогресс транспорта: Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2008. – № 21. – С. 228-232.

Кекиш Наталія Анатоліївна, молодший науковий співробітник кафедри вишукування та проектування колії Білоруського державного університету транспорту. Тел.: (+37529) 682-66-93. E-mail: natalia.kekish@gmail.com.

Kekish Natalia, Research Associate of the Department "Surveying and Design of Roads" of the Belarusian State University of Transport. Tel.: (+37529) 682-66-93. E-mail: natalia.kekish@gmail.com.

Стаття прийнята 15.02.2017 р.

УДК 624.04:681.324.06:721.011.1

НОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова)

НОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРИНЦИПИ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)

NEW ENERGY PRINCIPLES OF STRUCTURES RATIONALIZATION

Dr. of sciences V. S. Shmukler

В статье рассматривается построение метода прямого проектирования конструкций, основанного на эксплуатации компилятора, фундированного методом конечных элементов и методом адаптивной эволюции. На приведенных тест-примерах показаны приоритеты подхода и особенности получаемых конструктивных реализаций. Обозначена связь известных критериев рационализации параметров конструктива с новыми критериями, введенными в работе. Полученные результаты являются основой алгоритма машинного проектирования конструкций с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: энергетический портрет конструкции, плотность потенциальной энергии деформации, равнопрочность, критерий нормируемого состояния.

У статті розглядається побудова методу прямого проектування конструкцій, основаного на експлуатації компілятора, фундованого методом скінченних елементів і методом адаптивної еволюції. На наведених тест-прикладі показані пріоритети підходу й

особливості отриманих конструктивних реалізацій. Зазначений зв'язок відомих критеріїв раціоналізації параметрів конструктиву з новими критеріями, що введені до роботи. Отримані результати є основою алгоритму машинного проектування конструкцій з покращеними характеристиками.

Ключові слова: енергетичний портрет конструкції, щільність потенціальної енергії деформації, рівномірність, критерій нормованого стану.

This paper examines the method of direct design of structures, which is based on usage of the compiler founded by finite element method (FEM) and method of adaptive evolution (MAE). In this connection, the concept of the reference stress-strain state of the system formed by sequential build its energy equally strong counterpart is introduced. In this case, the refinement exposed, in general, not only the geometry, but also the physical and mechanical properties of elements. At the same time, it has the opportunity to varying characteristics such as coordinates of the bearing design, constraint type, load location, and others. The result of indicated approach is to build an energetic portrait of the system, including the definition of the system topology, characterized by a minimum value of the accumulated during deformation, potential energy and uniform (quasiuniform) distribution of potential energy density. In the above test examples illustrated approach priorities and features of derived implementations Relationship between known criteria of structure parameters rationalization and new ones introduced in this paper is denoted. Noticed reference stress-strain state of the system is the first approach of the formation of the final decision. Therefore, in the paper, based on the exploitation of Kieffer-Johnson method a sequence of procedures for its numerical implementation is revealed. Derived results are the basis for CAD algorithm design of structures with improved characteristics.

Keywords: energetic portrait of structures, density of strain energy, uniform strength, normalized state criterion.

Введение. Дуализм мира предопределяет прямой поиск конструктивных решений механических систем, развивающихся в направлениях:

- создание элементов (конструкций) с максимальной несущей способностью и/или жесткостью при заданном расходе материалов;

- создание элементов (конструкций) с минимальным расходом материалов при заданном ресурсе.

В обоих случаях проблема сводится к постановкам и решениям нелинейных задач рационализации (оптимизации). Как известно, степень сложности применяемых методов и алгоритмов реализации, в этом случае, существенно выше, чем при поверочном (традиционном) подходе. Кроме того, формируемые решения непосредственно связаны с конкретными условиями нагружения и опирания конструктива, что сужает область их

применения. Последнее являлось поводом поочередно наступавших упадка либо ренессанса данного направления. Тем не менее исчерпание ресурсов всех видов на фоне достижений информатики (переход от потребления и переработки материи к работе с информационными потоками [7]) обуславливают новый виток в построении или эксплуатации идей прямого проектирования. Что может быть интересней, чем взамен получения ответа об удовлетворении всех ограничений задачи (обратный подход) создание образа (в смысле геометрии, а иногда и физики) конструкции? Однако совершенно очевидно, что подобная трактовка предполагает формулирование соответствующих критериев в логически обоснованных и физически оправданных терминах. Естественно, в этом случае, обратиться к галилеевским «...не знаете, как сделать – спросите у Природы...» и

«...нельзя безопасно эксплуатировать конструкцию, если не знать, как она будет умирать...», т.е. использовать кеплеровские «...их величества Аналогии...» [6,14].

Позитивность сказанному можно найти в новых положениях, базирующихся на энергетическом подходе, фундированном принципом возможных перемещений Ж. Л. Лагранжа [6,16].

Цель и задачи исследования.

Идеология постановок задач прямого проектирования, излагаемая далее, предполагает (пусть и приближенно) отображение двух обстоятельств:

- введение в качестве критерия единой функции цели;
- введение в ограничения изопериметрического условия, связанного с управлением напряженно-деформированным состоянием (НДС) системы.

В этом случае, как известно, может быть достигнуто значительное упрощение постановок задач рационализации параметров конструктива. Здесь предполагается, что единообразная запись функции цели отображает возможность приближенной эквивалентной замены традиционных критериев (стоимость, вес, объем и т.д.) одним, связанным при этом с характером и особенностями НДС. Аналогичное требование предъявляется и к ограничениям, задающим управление НДС.

В свою очередь виртуальное многообразие ограничений, описывающих область допустимых решений (ОДР), предопределило построение процедуры, состоящей из двух этапов [16]:

- поиск эталонного решения;
- формирование окончательного решения.

При этом представилось целесообразным для построения эталонного решения использовать новые положения, основанные на энергетических принципах, а именно [6]:

- утверждения о том, что для регулируемых систем с постоянным объемом материала, числом внешних и

внутренних связей (внешние параметры) под действием статической внешней нагрузки – собственного веса, потенциальная энергия деформации (ПЭД) после перестройки достигает нижней грани на рациональном сочетании величин геометрических параметров:

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), \quad k = 1, 2, \dots, \infty, \quad (1)$$

где U – ПЭД; k – номер варианта сравнения; $\alpha \in M$; M – множество допустимых значений внешних геометрических параметров.

Положение (1) может быть распространено на случай присутствия на множестве виртуальных загрузок какого-либо превалирующего. В частности при компоновке тонкостенного элемента, испытывающего деформацию изгиба с кручением, можно обнулить (минимизировать) крутящий момент за счет прохождения вектора нагрузки через центр изгиба, что будет соответствовать выполнению (1). Результатом здесь будет отказ от формирования элемента, имеющего замкнутый контур (рис. 1) [8,15];

- требования изоэнергетичности состояния системы (конструкции), т.е. такого, при котором

$$e[\{\bar{x}\}] = const, \quad (2)$$

где e – плотность потенциальной энергии деформаций (ППЭД);

$\{x\}$ – вектор внутренних параметров.

Решение практических задач с критерием (1) в определенной степени подтверждает эффективность его эксплуатации, а также возможность регулирования не только геометрическими, но и физико-механическими характеристиками системы [1,6,16-18].

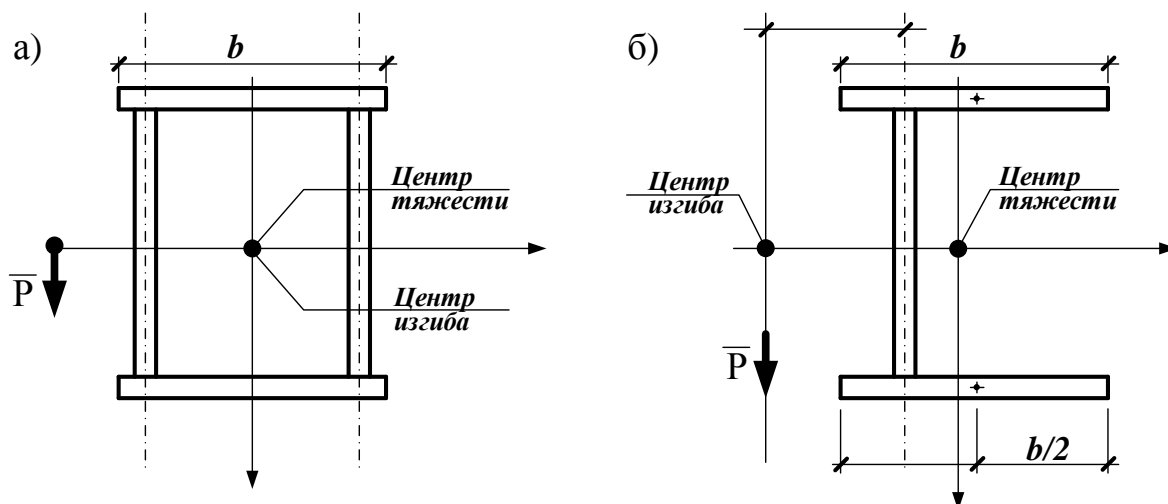


Рис. 1. Сечения элементов, испытывающих изгиб с кручением:
 а – замкнутый профиль (традиционное решение);
 б – открытый профиль (рациональное решение)

Примем, в духе [6], что под внешними экстенсивными параметрами понимаются параметры, которые определяют сопротивляемость системы без изменения общего объема материала (габариты элементов системы, координаты опорных связей и мест приложения нагрузок и т.п.), а внутренние интенсивные параметры определяют топологию, объем, а также свойства материалов.

Следует также отметить, что следствием первого положения, кроме представления (1), является следующее:

- при лавинообразном устранении связей, вследствие появления пластических шарниров, вплоть до появления предельного состояния, когда система превращается в механизм, ПЭД возрастает и достигает верхней границы [7]:

$$U_u = \sup U, \quad (3)$$

где U_u – предельная величина ПЭД.

Условие (3) может быть использовано при определении наиболее опасного сочетания нагрузок в случае многообразия загрузений. Очевидно, что наиболее

опасному загрузению (при упругом деформировании) будет соответствовать большая величина ПЭД.

Следствием критерия (2) является то, что при $e=e_u$ во всех точках конструкции достигается глобальный минимум расхода материалов (1). Здесь фундаментальная структурообразующая величина e_u – ресурс, суть мера вязкости материала или предельная плотность энергии деформирования [12,13]. Она определяется работой, затрачиваемой на деформацию образца вплоть до его разрушения, приходящейся на единицу объема и измеряемой площадью индикаторной диаграммы деформирования материала. С величиной ресурса связано очень ценное качество конструкции – резильянс, определяемый количеством упругой энергии, которое можно запасти в ней, не причиняя повреждения [16].

В свою очередь изоэнергетичность, порождаемая (2), как рациональная форма существования искусственных элементов, обеспечивает наиболее приемлемое распределение материала, а также его эффективную работу в конструкции. Применяя к (2) итерационный подход,

базирующийся на методе адаптивной эволюции (МАЭ), для какого-либо геометрического или физико-механического параметра конструкции, можно записать

$$h_{i+1} = h_i [e_i e_{iu}^{-1}]^\gamma, \quad (4)$$

где h – геометрический (физико-механический) параметр системы;

i – номер итерации;

$\gamma \in (0,1)$ – характеристика адаптивной эволюции, отражающая скорость сходимости процедуры МАЭ.

Введенные положения позволяют не только обозначить эталонное решение, но и, что является весьма важным, построить энергетический портрет конструкции. Под энергетическим портретом конструкции понимается 3D-построение и отображение поля плотности энергии деформации с одновременным определением ПЭД. Данное обстоятельство, наряду с определением рациональной топологии системы (не только форма, но и содержание), предопределяет установление предельного состояния как для структурных элементов конструкции (например конечных элементов), так и для системы в целом. Кроме того, при условии сходимости процедуры (4) происходит отсеив ненатуральных (паразитирующих) элементов системы. Отметим, что, кроме минимизации расхода материалов, критерии (1)÷(2) могут быть использованы для приближенной оценки некоторых важных механических характеристик. В связи с чем рассмотрим иллюстративный пример. Пусть рассматриваются 13 квадратных изгибаемых конструктивно анизотропных пластин, имеющих одинаковый объем (расход материалов). Все пластины оперты по контуру шарнирно и несут равномерно распределенную единичную нагрузку. У каждой пластины

задана эксклюзивная геометрия подкрепляющих ребер.

В духе введенных критериев, ставится задача определения той топологии ребер, для которой, во-первых, выполняется критерий (1), а во-вторых, проводится оценка выполнения ограничения (управления) (2). Решение рассматриваемых задач реализовано в среде ПК ЛИРА [8]. Результаты решения приведены на рис. 2.

Анализируя построенную диаграмму, можно отметить, что пятому варианту топологии пластины соответствует минимальное значение ПЭД. Далее для всех рассмотренных вариантов были оценены частоты собственных колебаний основного тона и обертонов, а также максимальные прогибы пластин.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 3, 4, пятому варианту топологии плиты соответствует не только минимальное значение ПЭД, но и максимальное значение частоты собственных колебаний основного тона, практически и обертонов, а также минимальное значение прогиба, что говорит о максимальной изгибной жесткости этой пластины. Таким образом, допустимо констатировать (хотя и с известной степенью осторожности), что критерий (1) может использоваться как универсальный. Удовлетворение условию (2) реализуется в том числе и за счет придания подкрепляющим ребрам переменной жесткости [16-18]. При этом для обеспечения технологичности решений (например для железобетонных или сталежелезобетонных конструкций) используются захороняемые вкладыши-пустотообразователи (рис. 5) [6]. Для металлических элементов, в этом случае, уместна установка конструктивов с переменным сечением и/или использованием металлов разных марок.

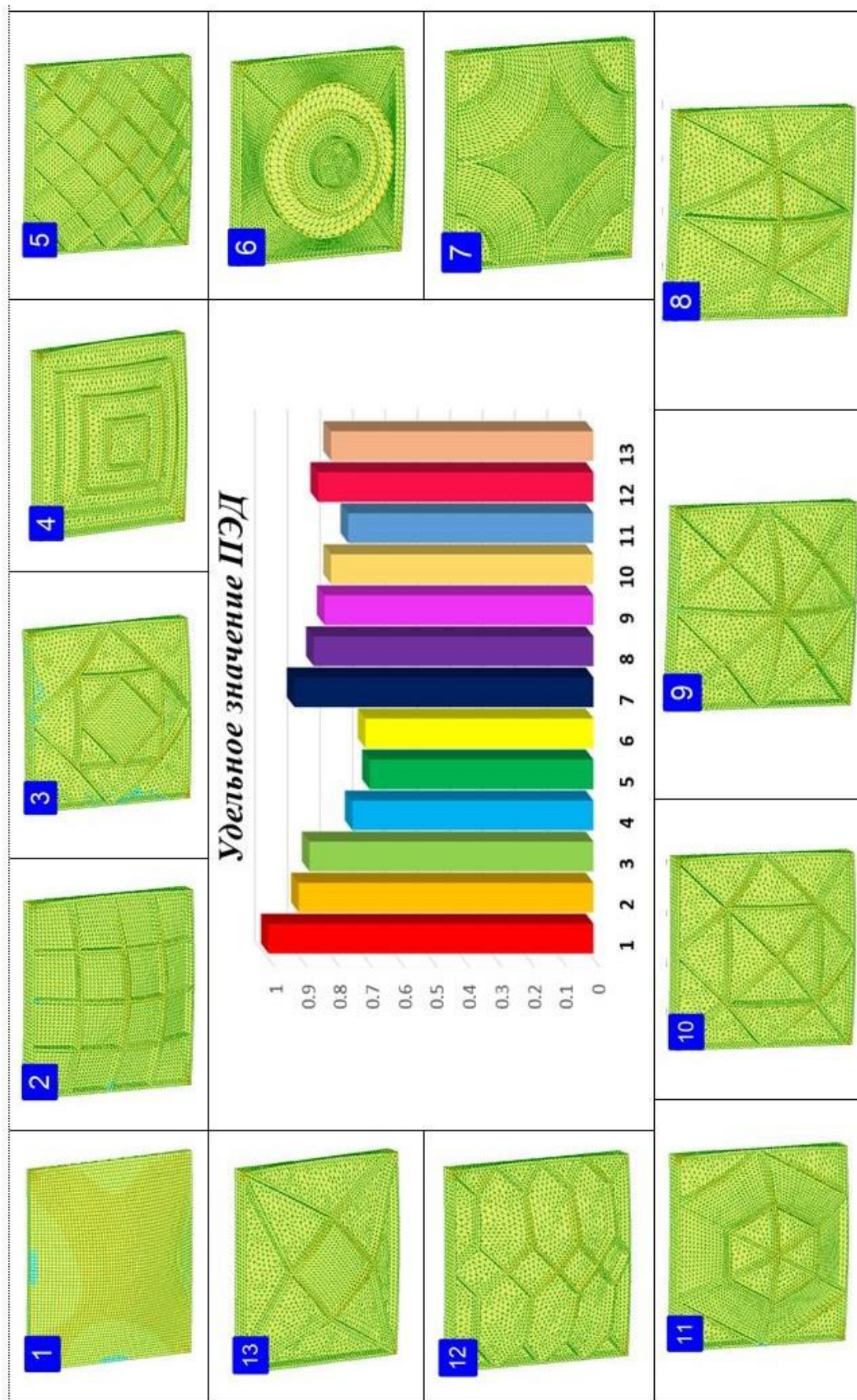


Рис. 2. Иллюстрированный пример

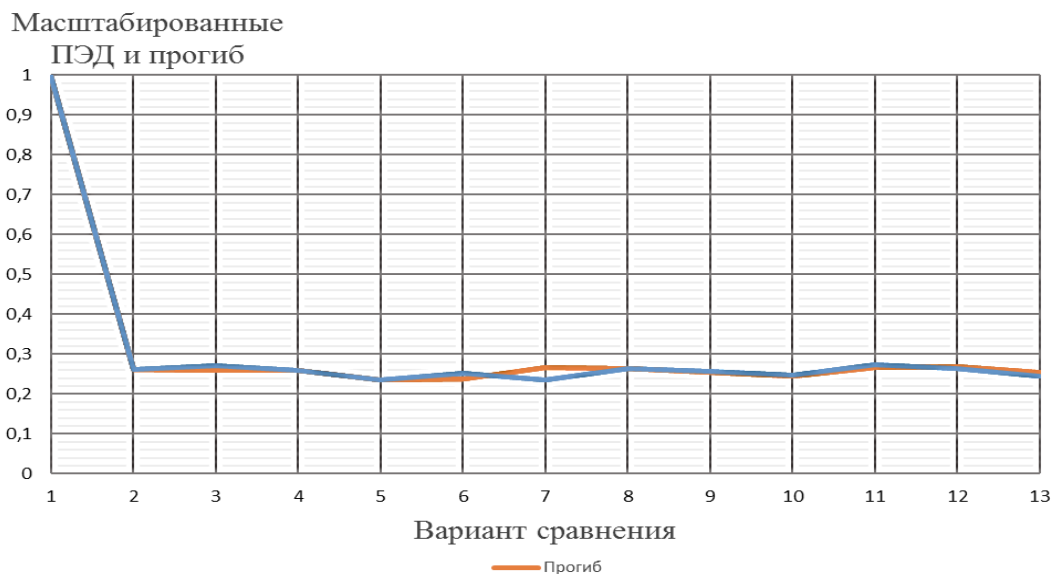


Рис. 3. Максимальный прогиб и ПЭД для вариантов сравнения

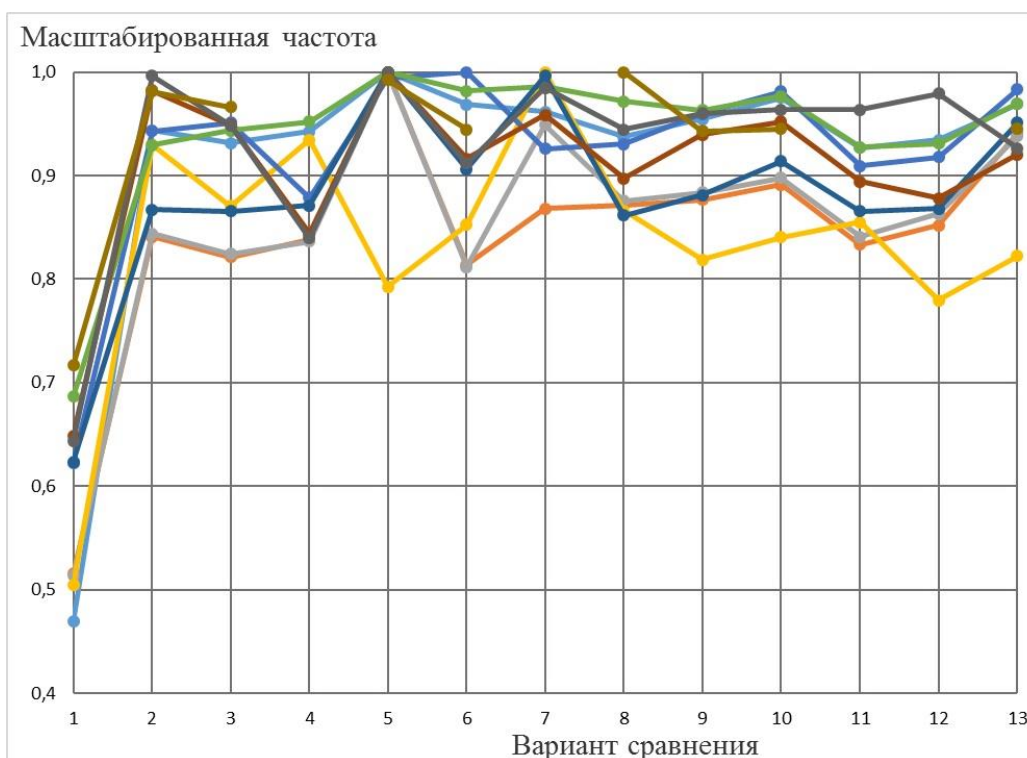


Рис. 4. Частоты собственных колебаний рассматриваемых пластин

Условия (2) и (4) содержат величину предельной плотности потенциальной энергии e_n . С этой характеристикой связано понятие нормируемого значения плотности потенциальной энергии деформации e_n или,

что тоже самое – нормируемого потенциала деформации [12], необходимого для построения эталонного решения (энергетически равнопрочная система).

Далее, в духе [6; 16], обозначим частные (парциальные) величины ППЭД так, что

$$e_n = e_n(e_{nc}; e_{nt}; e_{nsh}), \quad (5)$$

где $e_{nc}; e_{nt}; e_{nsh}$ – нормируемые величины ППЭД для деформаций растяжения, сжатия и сдвига соответственно.

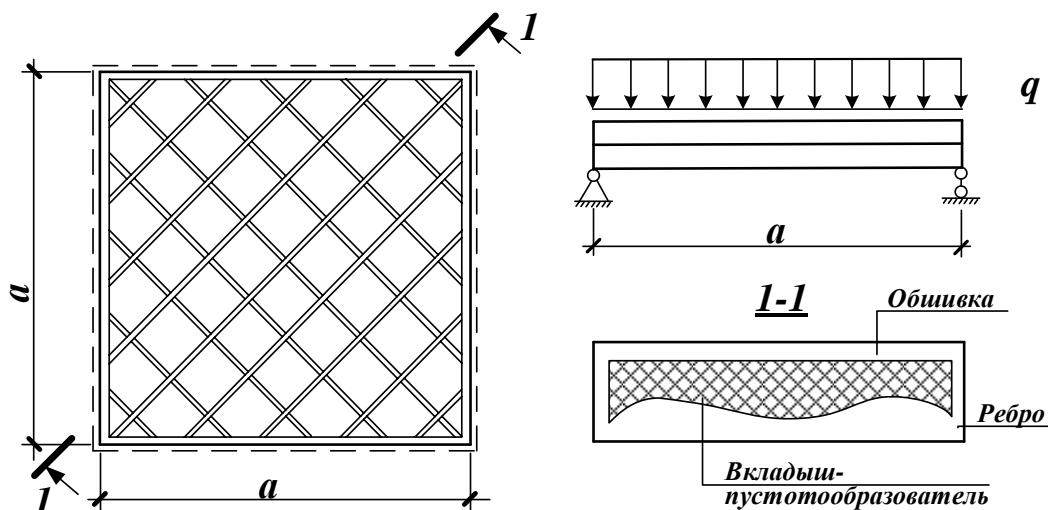


Рис. 5. Оребренная пластина с ребрами переменной жесткости

При этом каждую частную ППЭД представим в виде

$$e_{nc} = \frac{9}{2} K \cdot \varepsilon_0^2 + \int_0^{\varepsilon_{nc}} \sigma_c d\varepsilon_c, \quad (6)$$

$$e_{nt} = \frac{9}{2} K \cdot \varepsilon_0^2 + \int_0^{\varepsilon_{nt}} \sigma_t d\varepsilon_t, \quad (7)$$

$$e_{nsh} = \int_0^{\varepsilon_{nsh}} \tau d\gamma, \quad (8)$$

где $K = \frac{E_0}{3(1-2\nu)}$ – объемный модуль деформаций;

E_0 – начальный модуль деформаций 1-го рода материала;

$\varepsilon_0 = \frac{1}{3} I_1(T_\varepsilon)$; $I_1(T_\varepsilon)$ – первый инвариант тензора деформаций;

$\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_c)$; $\sigma_t = \sigma_t(\varepsilon_t)$; $\tau = \tau(\gamma)$ – заданные (известные) диаграммы материала, построенные для деформаций сжатия, растяжения, сдвига;

$\varepsilon_{nc}; \varepsilon_{nt}; \lambda_n$ – нормируемые значения деформаций на сжатие, растяжение, сдвиг.

Первое слагаемое в (6), (7) представляет собой удельную потенциальную энергию изменения объема, а второе – удельную потенциальную энергию изменения формы.

Здесь считается, что диаграммы материалов могут быть получены непосредственно из соответствующих экспериментов, а нормируемые значения деформаций представлены выражением

$$\varepsilon_{nk} = \gamma_k \varepsilon_{ku}; \quad \gamma_k \in (0,1),$$

где k – индекс, последовательно принимающий значения, $k = cvtvsh$,

соответствующий деформации сжатия, растяжения, сдвига;

γ_k – статистически обоснованный коэффициент запаса.

Назначая разные значения γ_k для различных элементов системы, появляется возможность управления последовательностью выхода их из строя. Данное обстоятельство предопределяет в том числе эксплуатацию теории очередей, а также репрезентативное резервирование [9];

ε_{ku} – предельная деформативность.

При наличии связи $\varepsilon = \varepsilon(\gamma)$ выражениями (6)÷(8) может быть учтена дилатансия.

Диаграмму деформирования материала (рис. 6) представим в виде полинома седьмой (нечетной) степени:

$$\sigma = \alpha_1 \varepsilon + \alpha_3 \varepsilon^3 + \alpha_5 \varepsilon^5 + \alpha_7 \varepsilon^7. \quad (9)$$

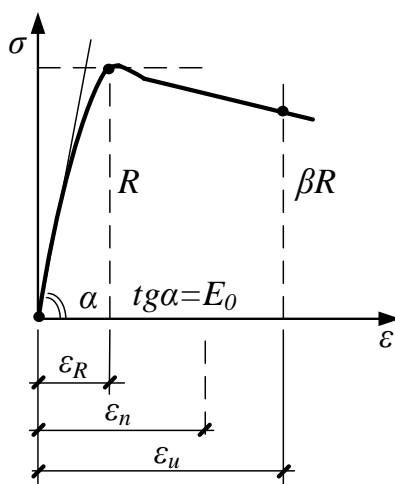


Рис. 6. Диаграмма деформирования материала

В (9) неизвестные коэффициенты α_j ($j=1,3,5,7$) можно выразить через характеристики диаграммы:

$$\{ \alpha \}^T = \{ E_0; R; \varepsilon_R; \varepsilon_u; \beta \}, \quad (10)$$

- где E_0 – начальный модуль деформаций;
- R – предел прочности;
- ε_R – деформация, соответствующая пределу прочности;
- ε_u – предельная деформативность;
- β – напряжение, соответствующее предельной деформативности.

Перечисленные характеристики, в общем случае, являются функциями температуры, времени и других

параметров, что подтверждено значительным количеством исследований [12; 13].

Для определения коэффициентов α_j используются следующие условия:

$$\begin{aligned} &\text{при } \varepsilon = 0; \sigma = 0; \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_0; \\ &\text{при } \varepsilon = \varepsilon_R; \sigma = R; \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0; \\ &\text{при } \varepsilon = \varepsilon_u; \sigma = \beta \cdot R. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя (9) в (11) и решая систему линейных уравнений, определяются коэффициенты α_j (таблица).

Коэффициенты полинома (9)

Коэф-фициент	Значение
$\alpha_3 \cdot E_0^{-1}$	$\frac{\varepsilon_u^4}{2(\varepsilon_u^2 - \varepsilon_R^2)^2} \left[\frac{1}{\varepsilon_R^2} \left(\frac{R}{E_o \varepsilon_R} - 1 \right) \left(5 - 7 \frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^2} \right) - \frac{1}{\varepsilon_R^2} \left(\frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^2} - 1 \right) + \frac{2\varepsilon_R^4}{\varepsilon_u^6} \left(\frac{\beta R}{E_o \varepsilon_u} - 1 \right) \right]$
$\alpha_5 \cdot E_0^{-1}$	$\frac{\varepsilon_u^4}{2(\varepsilon_u^2 - \varepsilon_R^2)^2} \left[\frac{1}{\varepsilon_R^4} \left(7 \frac{\varepsilon_R^4}{\varepsilon_u^4} - 3 \right) \left(\frac{R}{E_o \varepsilon_R} - 1 \right) - \frac{1}{\varepsilon_R^4} \left(1 - \frac{\varepsilon_R^4}{\varepsilon_u^4} \right) - \frac{4\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^6} \left(\frac{\beta R}{E_o \varepsilon_u} - 1 \right) \right]$
$\alpha_7 \cdot E_0^{-1}$	$\frac{\varepsilon_u^4}{2(\varepsilon_u^2 - \varepsilon_R^2)^2} \left[\frac{1}{\varepsilon_R^4 \varepsilon_u^2} \left(\frac{R}{E_o \varepsilon_R} - 1 \right) \left(3 - 5 \frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^2} \right) - \frac{1}{\varepsilon_R^4 \varepsilon_u^2} \left(\frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^2} - 1 \right) + \frac{2}{\varepsilon_u^6} \left(\frac{\beta R}{E_o \varepsilon_u} - 1 \right) \right]$

Зависимость (9) удобно представить в виде

$$\tilde{\sigma} = \tilde{E}_0 \cdot \tilde{\varepsilon} \cdot \Psi(\tilde{\varepsilon}), \quad (12)$$

где $\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{R}$; $\tilde{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_u}$; $\tilde{\sigma}, \tilde{\varepsilon} \in (0,1)$,

$$\tilde{E}_0 = \frac{E_0 \varepsilon_u}{R};$$

$$\Psi(\tilde{\varepsilon}) = 1 + \alpha_3 \cdot \varepsilon_u^2 \tilde{\varepsilon}^2 + \alpha_5 \cdot \varepsilon_u^4 \tilde{\varepsilon}^4 + \alpha_7 \cdot \varepsilon_u^6 \tilde{\varepsilon}^6$$

Таким образом, располагая вектором (10), имеется возможность представить диаграмму состояния для частных видов деформирования в виде (12). Достоинствами (12) является простота и физическая прозрачность.

Представим теперь нормируемую ППЭД в виде [6]

$$e_n = a_1 + a_2 \chi_\varepsilon^2 + a_3 \chi_\varepsilon^3, \quad (13)$$

где $\chi_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$, $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$ –

главные линейные деформации;

χ_ε – параметр Лоде-Надаи деформированного состояния;

при $\chi_\varepsilon = -1$; $e_u = e_{tn}$;

при $\chi_\varepsilon = 1$; $e_u = e_{en}$;

при $\chi_\varepsilon = 0$; $e_u = e_{shu}$.

После определения a_1 ; a_2 ; a_3 получим [16]

$$e_n = 0,5 \chi_\varepsilon [(\chi_\varepsilon + 1)e_{nc} + (\chi_\varepsilon - 1)e_{nt}] + (1 - \chi_\varepsilon^2)e_{nsh}. \quad (14)$$

Выражение (14) является критерием, определяющим эксплуатационное состояние рационализированного элемента. В частном случае, когда верхние пределы интегрирования в (6)-(8) равны

предельным деформациям, выражение (4) предопределяет предельное состояние в локальной области (точка, конечный элемент). При $e_{nc} = const$; $e_{nt} = const$;

$e_{nsh}=const$ критерий (14) совпадает с критерием построенным в [6].

В свою очередь внеинтегральные члены в (6)÷(7) можно представить в виде

$$\frac{9}{2}K \cdot \varepsilon_0^2 = \frac{E_0}{6(1-2\nu)} \cdot I_1^2(T_\varepsilon). \quad (15)$$

Здесь следует отметить, что без внесения значительной погрешности в решение объемная деформация ε_0 в большинстве случаев может приниматься равной нулю. Интегральные члены в (6)÷(8), благодаря представлению (9), вычисляются точно.

Важным моментом является то, что предлагаемый подход предполагает эксплуатацию в основном 3D-конечно-элементных моделей [10].

При этом, если в конечном элементе $e_i > e_{iu}$, он выключается из работы.

Располагая алгоритмами, устанавливающими последовательное объединение смежных отбракованных элементов, появляется возможность построения поверхностей расчленения (разрушения) конструкции, т. е. установления последовательности перехода от разрушения в локальной области к глобальному виртуальному коллапсу.

Эталонное решение. Как отмечалось ранее, эталонное решение строится на базе зависимостей (1), (2) с использованием итерационной процедуры (4). Специфической особенностью здесь является тот факт, что в качестве параметров управления выбираются физико-механические параметры конечного элемента [16]:

$$C_{i+1}^L = (e_L e_n^{-1}) C_i^L, \quad (16)$$

где i – номер итерации;

C_i^L – физико-механический параметр в общем случае анизотропного L -го конечного элемента на i -м шаге итерации.

В случае изотропного тела зависимость (16) принимает вид

$$E_{i+1}^L = (e_L e_n^{-1}) E_i^L, \quad (17)$$

где E_i^L – модуль деформаций 1-го рода (внутренний параметр).

При этом коэффициент поперечной деформации может (при необходимости) приниматься по умолчанию как неварьированный в силу его незначительной изменчивости $\nu \in (0;0,5)$. В окончательном виде эталонное решение представляет собой поле модулей деформаций, соответствующее энергетически равнопрочному элементу.

Чаще всего процедура (17) является вложенной, а внешняя процедура отображает удовлетворение критерию (1), реализуя перебор внешних параметров.

Используя далее следствие локального закона сохранения потенциальной энергии деформаций, запишем [6]

$$V_N^L = [E_N^L (E_0^L)^{-1}] V_0^L, \quad (18)$$

где V_0^L – стартовый объем L -го конечного элемента (КЭ);

V_i^L – объем энергетически равнопрочного L -го КЭ;

E_0^L – начальный модуль деформаций 1-го ряда материала;

E_N^L – модуль деформаций 1-го рода материала на последнем шаге итераций;

N – количество итераций.

Принимая гипотезу о равномерном распределении энергии по степеням свободы, следует пересчитать координаты сетки КЭ на основе (18).

Данная логико-вычислительная процедура позволяет получить геометрический образ энергетически равнопрочной конструкции (рис. 7). Далее,

как правило, производится преобразование (огрубление) полученной формы с целью

обеспечения технологичности изготовления рассматриваемого конструктива.

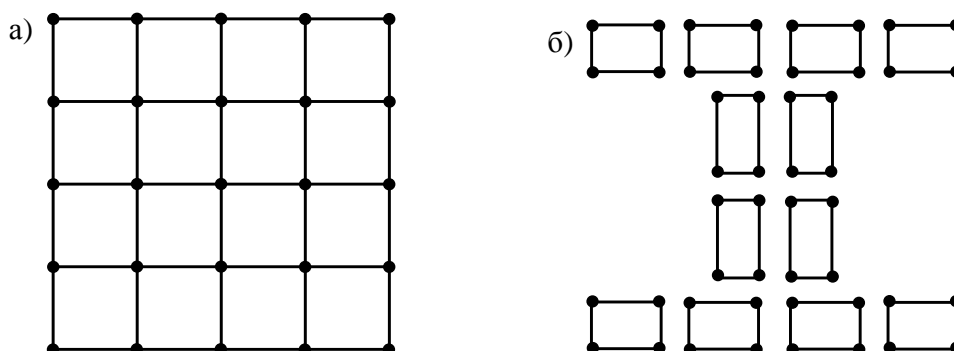


Рис. 7. Трансформация сетки конечных элементов: а – стартовая; б – результирующая

Допустимо указать некоторые полезные для вычислений нюансы, приводящие к трансформации стартовой сетки конечных элементов (рис. 7, 8). Если обозначить начальные размеры КЭ вдоль соответствующих осей декартовой системы XYZ через λ_x ; λ_y ; λ_z (для других систем координат рассуждения остаются в силе), то после выполнения процедуры (18) они станут равными [13]:

$$\begin{aligned} \lambda'_x &= \lambda_x(1 + \varepsilon_x); \\ \lambda'_y &= \lambda_y(1 + \varepsilon_y); \\ \lambda'_z &= \lambda_z(1 + \varepsilon_z). \end{aligned} \quad (19)$$

где ε_x ; ε_y ; ε_z – компоненты тензора деформаций.

Относительное изменение объема КЭ при этом составит

$$\Delta \bar{V} = I_1(T_\varepsilon), \quad (20)$$

где $\Delta \bar{V}$ – относительное изменение объема КЭ.

В случае отказа принятия концепции о равномерном распределении энергии по степеням свободы рассматривается

возможность замены выражений (19) на следующие [6]:

$$\begin{aligned} \lambda'_x &= \varphi_1 \lambda_x(1 + \varepsilon_x); \\ \lambda'_y &= \varphi_2 \lambda_y(1 + \varepsilon_y); \\ \lambda'_z &= \varphi_3 \lambda_z(1 + \varepsilon_z). \end{aligned} \quad (21)$$

где $\varphi_m = [e_L \cdot e_n^{-1}]^{\psi_m}$, $m = 1, 2, 3$,
 $\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 = 1$; $\psi_m \in (0;1)$;

$$\psi_m = \frac{|\sigma_m|}{\sum_{m=1}^3 |\sigma_m|},$$

σ_m – главные напряжения.

Как следует из (21), изменение геометрии КЭ будет происходить пропорционально величинам главных напряжений, что логически оправдано.

Как отмечалось выше, выполнение критерия (1) предопределяет возможность использования всего, допустимого для конкретных условий, спектра конструктивных решений (изменений способов и мест приложения нагрузки, изменений координат и характера связей, использования предварительного натяжения, изменения жесткостей

отдельных элементов и др.). То есть подобный подход является альтернативой концепции А. Пуанкаре о том, что «посредством интуиции изобретают, а

посредством логики доказывают». Здесь форма и содержание конструкции могут быть получены расчетным путем (рис. 9).

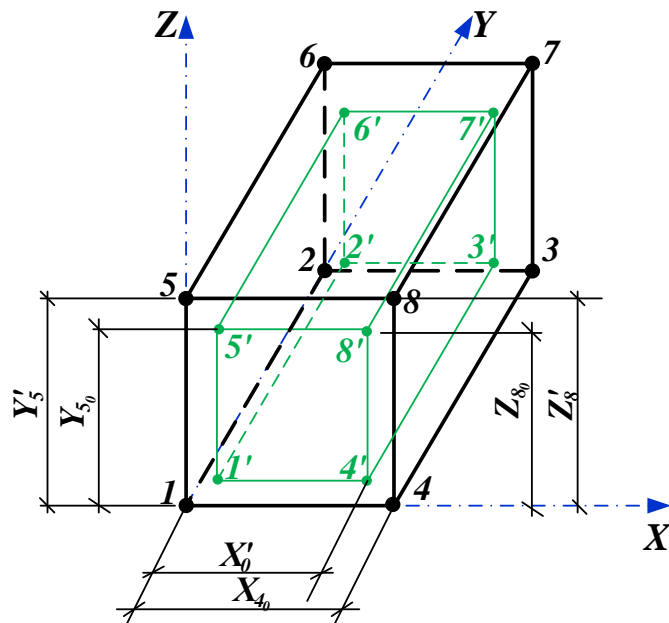


Рис. 8. Виртуальное изменение координат узлов конечного элемента в локальной системе координат (начальные координаты обозначены нулем, полученные в результате расчета – штрихом, цифрами обозначены узлы КЭ)

Окончательное решение и выводы.

При наличии в задаче каких-либо дополнительных ограничений (кроме (2)) эталонное решение следует принять за начальное приближение. Далее «новые» ограничения должны быть предоставлены в виде равенств. Затем следует эксплуатация метода Киффера-Джонсона выхода на границу области по заданным дополнительным ограничениям [16]. В этом случае вычислительная процедура выглядит следующим образом. Последовательно для каждого КЭ проверяется выполнение «новых» ограничений. В случае их строгого выполнения модули E_i^L остаются без изменений. При невыполнении ограничений производится увеличение этих параметров до выполнения всех

ограничений. Подобный алгоритм обеспечивает строгое выполнение всех неравенств и, как минимум, одного как равенства (выход на границу области).

Обозначенная итерационная процедура реализует решение нелинейных задач рационализации параметров конструкций. Основой ее применения служит модель деформируемого тела А.А. Ильюшина – И.А. Биргера. Суть ее сводится к условно эквивалентной замене исходной нелинейно и в общем случае неупруго деформируемой среды линейной, но неоднородной. Неоднородность здесь определяется изменчивостью параметров, описывающих физико-геометрические атрибуты системы и являющихся функциями компонент, обозначающих напряженно-деформированное состояние.

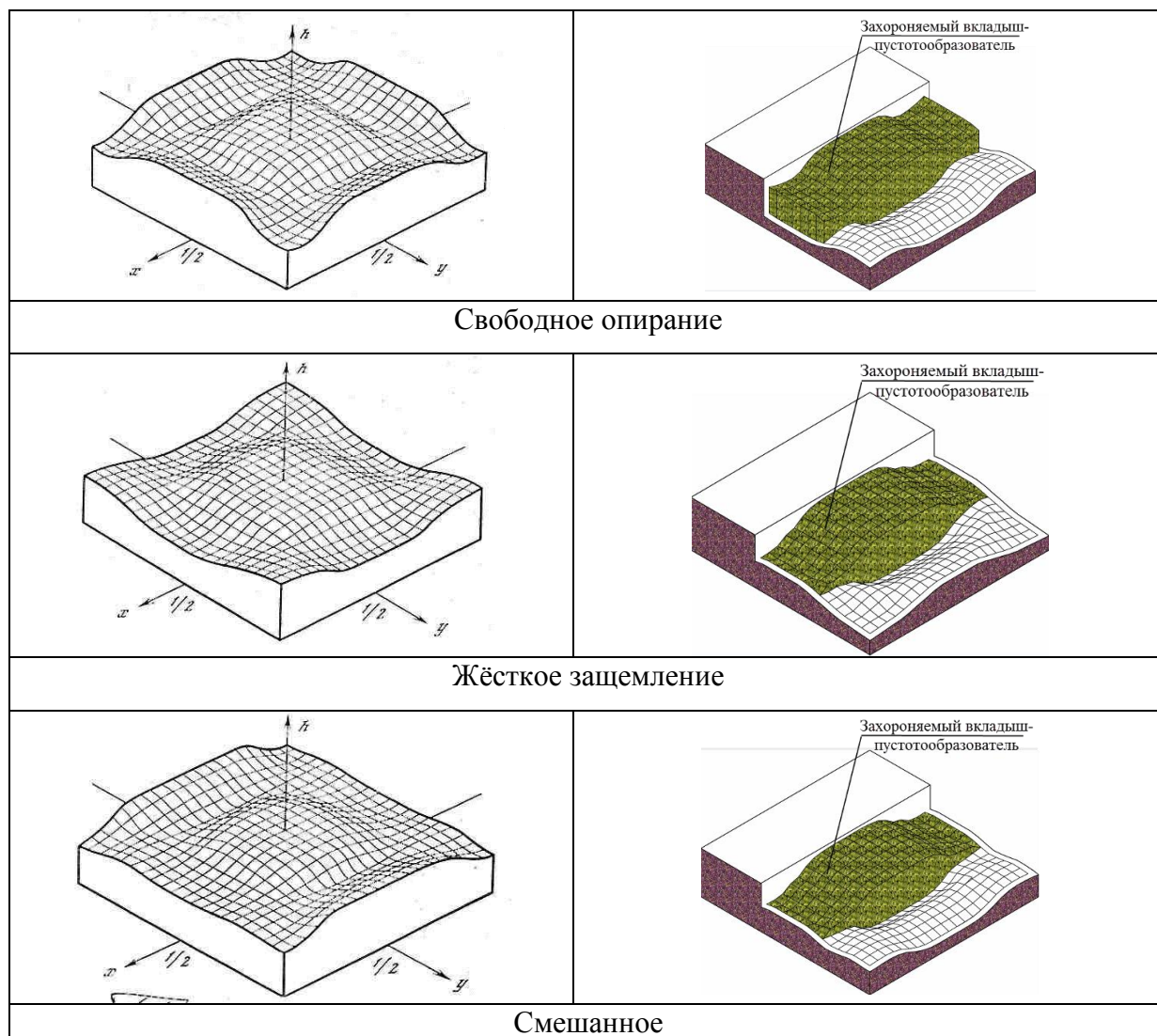


Рис. 9. Равнопрочные пластины по [2] слева и плиты со сложной внутренней геометрией справа

К достоинствам этой модели в первую очередь следует отнести её физическую прозрачность, стандартность алгоритмов учёта нелинейностей разных видов (физической, геометрической, конструкционной и т.д.), пригодность для решения как обратных, так и прямых задач [19]. В целом данная модель имеет сугубо рациональный характер и полностью коррелирует с общей формулировкой, данной Н. Бейли: «..... объект М является моделью объекта А относительно некоторой системы S характеристик (свойств), если М строится (или выбирается) для имитации А

по этим характеристикам» [4]. В рассматриваемой ситуации в роли А выступает нелинейно деформируемое тело, а в роли М – некоторая линейно деформируемая неоднородная среда, параметры неоднородности S которой уточняются итерационно в зависимости от характера и особенностей напряженно-деформируемого состояния, а также процессов, учёт которых предусмотрен конкретной задачей. Так как компоненты напряженно-деформированного состояния в общем случае меняются от точки к точке, параметры, описывающие среду, будут

являться в конечном итоге функциями координат. Как показывает опыт эксплуатации этой модели её качественная и количественная адекватность существенным образом зависит от видов нелинейностей, вводимых в рассмотрение. Остановимся на одном из нюансов применения данной модели, остающимся, как правило, в стороне от проблемы, обозначающей упомянутую адекватность. Как отмечалось выше, на каждом шаге рассмотренного итерационного процесса используется метод

конечных элементов, представленный, в основном, в форме метода перемещений. При этом для трёхмерного континуума конечно-элементная дискретизация тела предполагает неоднородность среды. Другими словами, физико-геометрические параметры каждого конечного элемента могут быть различными. Тогда в синтезирующие уравнения, записанные, например, для изотропных твёрдых тел, должны входить не только собственно упомянутые параметры, но и производные от них [3,5]:

$$\begin{aligned} & \left[\lambda \delta_{ik} \delta_{Lm} + \mu (\delta_{iL} \delta_{km} + \delta_{im} \delta_{kL}) \right] \frac{\partial^2 u_L}{\partial x_k \partial x_m} + \\ & + \left[\frac{\partial \lambda}{\partial x_K} \delta_{ik} \delta_{Lm} + \frac{\partial \mu}{\partial x_k} (\delta_{iL} \delta_{km} + \delta_{im} \delta_{Lk}) \right] : \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_L}{\partial x_m} + \frac{\partial u_m}{\partial x_L} \right) + x_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} \right), \end{aligned} \quad (22)$$

где $\rho = const$ – плотность материала; $u_i; u_L; u_m$ – компоненты вектора перемещений; δ_{ik} – тензор Кронекера; t – время; $\lambda(x_1; x_2; x_3); \mu(x_1; x_2; x_3)$ – аналоги коэффициентов Ляме, являющиеся функциями координат $x_1; x_2; x_3$.

Однако библиотеки практически всех известных программных средств, фундированных методом конечных элементов, как правило, не содержат элементов, определяемых (22). Их (библиотек) содержимое сводится к ситуации $\lambda_i = const, \mu_i = const$ (i – номер конечного элемента), соответствующей известным уравнениям теории упругости и получаемой из (22) как частный случай [11]. Как следствие, и в

особенности когда $\lambda(\vec{x})$ и $\mu(\vec{x})$ имеют разрывный характера, погрешность обсуждаемой модели может быть значительной. Тем не менее линейность модели, её простота и наглядность, возможность управления размерностью пространства переменных, включая оптимизацию учитываемых параметров, доступные средства контроля обычных и экстремальных ситуаций обеспечивают её интегральную адекватность для значительного количества практически важных случаев. Перечисленное предопределяет эффективность использования данной модели в совокупности с алгоритмами итерационного решения сложных нелинейных задач.

Список использованных источников

1. Бабаев, В. Н. Эффективная система облегченных железобетонных элементов [Текст] / В.Н. Бабаев, В.С. Шмуклер // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону. – М.: МГСУ, 2014. – Т. 2. – С. 346-356.
2. Баничук, Н. В. Оптимизация форм упругих тел [Текст] / Н.В. Баничук. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

3. К описанию деформирования бетонной среды [Текст] / П.Я. Бернштейн, И.А. Тимко, А.Л. Шагин, В.С. Шмуклер // Сборник сообщений о научно-исследовательских и экспериментально-конструкторских работах. – Харьков: ХГУ, 1971. – Вып. 2. – С. 85-91.
4. Блехман, И. И. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов [Текст] / И.И. Блехман, А.Д. Мышкис, Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1976. – 269 с.
5. Бондаренко, В. М. Комплекс программ для расчёта опёртых по контуру пологих оболочек с учётом физической и геометрической нелинейности [Текст] / В.М. Бондаренко, А.Л. Шагин, В.С. Шмуклер. – М.: ОФАП Госстрой СССР, 1975. – 109 с.
6. Васильков, Г. В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма [Текст] / Г. В. Васильков. – Ростов-н/Д: Инфосервис, 2003. – 179 с.
7. Васильков, Г. В. Эволюционная теория жизненного цикла механических систем. Теория сооружений [Текст] / Г. В. Васильков. – М.: ЛКИ, 2008. – 320 с.
8. Городецкий, А. С. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций [Текст] / А.С. Городецкий, В.С. Шмуклер, А.В. Бондарев. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.
9. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]: ГОСТ 27.002-89. – [Введ. 1990-07-01]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1990. – 32 с. – (Межгосударственный стандарт).
10. Данилов, А. А. Способы построения трехмерных поверхностных триангуляций и тетраэдральных сеток [Текст] / А. А. Данилов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – СПб: ИТМО, 2010. – Вып. 1(65). – С. 87-92.
11. Ландау, Л. Д. Теория упругости [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1965. – 202 с.
12. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст]: учеб. для студентов ВУЗов / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
13. Филин, А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела [Текст] / А. П. Филин. – М.: Наука, 1975. – Т. I. – 832 с.
14. Фридкин, В. М. Формообразование строительных конструкций [Текст] / В.М. Фридкин. – М.: МГСУ, 2011. – 171 с.
15. Пролетное строение открытого несимметричного профиля для грузоподъемного крана [Текст]: а.с. 1541179 СССР, МКИ5 В 66 С 17/00 / В.С. Шмуклер, А.И. Белопольский, Г.Ф. Скала, М.И. Ягудин. – №4294275; заявл. 03.08.87 ; опубл. 07.02.90, Бюл. №5.
16. Шмуклер, В. С. Каркасные системы облегченного типа [Текст] / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Бурак. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.
17. Shmukler, V.S. About One Possibility of Compromise-Criterion Construction in Structure Parameter Rationalization Task Dundee / V.S. Shmukler // Proceedings of the International conference – Scotland, 2008. – pp.183-190.
18. Shmukler, V.S. Evolutionist approach in rationalization of building structures / V.S. Shmukler // ISEC-03 Third International Structural Engineering and construction Conference – Shunan, Japan, 2005. – pp.539-545.
19. Shmukler, V.S. Nonlinear analysis of reinforced concrete structures strength. / V.S. Shmukler, I. Luchkovsky // IABS symposium – Shanghai, China, 2004. – Vol. 88. – pp.374-382.

Шмуклер Валерій Самуїлович, д-р техн. наук, професор, завідуючий кафедрою будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-33-77. E-mail: konstruktzii@gmail.com.

Shmukler Valery Samuilovich, D. Sc. (Tech.), prof., Head of Building Structures Department by O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: (057) 707-33-77. E-mail: konstruktzii@gmail.com.

Стаття прийнята 15.02.2017 р.

УДК 625.143:625.42

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РЕЙОК МЕТРОПОЛІТЕНУ ШЛЯХОМ ВИКОНАННЯ ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНОГО ШЛІФУВАННЯ

Д-р техн. наук С. В. Воронін, канд. техн. наук О. О. Скорик, асп. Є. М. Коростельов

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РЕЛЬСОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ПУТЁМ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Д-р техн. наук С. В. Воронин, канд. техн. наук А. А. Скорик, асп. Е. Н. Коростелёв

IMPROVING RESOURCE PERFORMANCE BY METRO RAIL WARNING GRINDING

Dr. sc. sciences S. Voronin, phd. tehn. O. Skoryk, sciences, pg. Ye. Korostelov

На основі проведених стендових досліджень впливу параметрів шліфування та мащення контактуючих поверхонь модельного контакту «колесо - рейка» на розвиток дефектів контактної-втомного походження та експериментальних досліджень в умовах експлуатації рейок колій Харківського метрополітену розроблено методичку визначення ресурсу рейок зовнішньої рейкової нитки кривих ділянок колій метрополітену.

Ключові слова: попереджувальне шліфування, рейки метрополітену, шорсткість контактуючих поверхонь, мащення.

На основании проведенных стендовых исследований влияния параметров шлифования и смазки контактирующих поверхностей модельного контакта «колесо - рельс» на развитие дефектов контактно-усталостного происхождения и экспериментальных исследований в условиях эксплуатации рельсов путей Харьковского метрополитена разработана методика определения ресурса рельсов наружной рельсовой нити кривых участков путей метрополитена.

Ключевые слова: предупредительная шлифовка, рельсы метрополитена, шероховатость контактирующих поверхностей, смазка.

In this work the influence of preventive grinding rails and lubrication treated surfaces on rails underground resource that is determined by the intensity of contact-fatigue defects origin side of the working surface rail head curve plots lines underground.

On the basis of studies of the influence of parameters grinding and lubricating the contacting surfaces of the model of contact "wheel-rail" on the development of defects contact-fatigue origin and experimental research in service of rail ways Kharkiv subway developed methods of measuring resource outer rails of the rail curves thread subway tracks sites.

Comparison of the current version of the resource exploitation and external curves metro rail routes to the proposed sites, which include the performance of grinding contact surfaces and grease. Due to this defect is made forecasting the development of contact fatigue life and the origin of experimental plots underground ways to determine a rational frequency of preventive grinding rails.

Keywords: preventive grinding, metro rails, the roughness of the contact surfaces, lubrication.

Вступ. Проведені в [1, 2] дослідження впливу параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь у контакті «колесо - рейка» кривих ділянок колії метрополітену дали змогу встановити раціональне значення шорсткості бокової робочої поверхні головки рейки на рівні $R_a = 2$ мкм. В [1-3] встановлено, що виконання попереджувального шліфування рейок з мащенням оброблених поверхонь може підвищити ресурс рейок зовнішньої рейкової нитки кривих ділянок колії метрополітену. Визначенню раціонального варіанта експлуатації рейок кривих ділянок колій метрополітену та періодичності виконання попереджувального шліфування з метою підвищення ресурсу рейок колій метрополітену присвячена ця стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З огляду на складність процесів та явищ, які відбуваються в контакті «колесо - рейка», питання зменшення інтенсивності розвитку дефектів рейок контактено-втомного походження, як домінуючих для колій метрополітену наразі залишається маловивченим [3, 4]. Слід зауважити, що це питання може досліджуватися лише для конкретних умов контактування [5-7]. При цьому мають враховуватися особливості матеріалів контактуючих поверхонь, діючі на контакт навантаження, умови контактування і т. п.

Розглядаючи питання зменшення інтенсивності розвитку дефектів рейок контактено-втомного походження для умов метрополітену [4], було визначено найбільш ефективні методи боротьби з дефектами означеного виду [8]. Відповідно до цих досліджень саме трибологічні методи є найбільш ефективними з огляду на неможливість зміни конструкційних або ж експлуатаційних параметрів контактування в умовах метрополітену [4].

Для умов магістральних залізниць у роботах [9, 10] було визначено вплив швидкості руху та шорсткості контактуючих поверхонь на величину

напружень у контакті «колесо - рейка». Проте використання результатів цих досліджень для умов метрополітену не є коректним з огляду на специфічні особливості експлуатації рейок у коліях метрополітену [9, 10].

Для створення раціональних параметрів мікрогеометрії поверхонь контакту в [11] пропонується виконання шліфування рейок. Проте при виконанні шліфування необхідно враховувати особливості умов контактування та матеріалу тіл контакту. Для умов метрополітену це є можливим, враховуючи однотипність рухомого складу та елементів верхньої будови колії.

Для умов кар'єрного залізничного транспорту в [11], з метою збільшення коефіцієнта тертя та пришвидшення припрацювання контактуючих поверхонь, було визначено значення раціональної шорсткості головки рейки після шліфування. Ці дослідження проводилися задля збільшення коефіцієнта тертя шляхом надання контактуючим поверхням певної шорсткості за умов контактування в складних умовах важковагового кар'єрного залізничного транспорту. Використання їх для визначення раціонального, з точки зору мінімуму, коефіцієнта тертя в контакті «колесо - рейка» кривих ділянок колії метрополітену не є коректним, хоча і вказують на зв'язок між шорсткістю контактуючих поверхонь та коефіцієнтом тертя.

Перспективними є дослідження, що присвячені вивченню впливу параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь колеса та рейки в умовах метрополітену [1]. Для проведення таких досліджень у [12] було змодельовано контакт «колесо - рейка» по боковій робочій поверхні головки зовнішньої рейки кривої метрополітену на машині тертя. У [2] проведено ряд експериментальних досліджень впливу параметрів шорсткості бокової робочої поверхні головки зовнішньої рейки кривих ділянок колій

метрополітену на сили тертя в модельному контакті «колесо - рейка». У результаті цих досліджень отримано значення раціональної шорсткості бокової робочої поверхні головки зовнішньої рейки в кривих ділянках колії метрополітену. Проте результати стендових досліджень [2] у цій роботі будуть підтверджуватись шляхом проведення досліджень за умов експлуатації в коліях КП «Харківський метрополітен» з огляду на необхідність підтвердження отриманих результатів в умовах експлуатації колій метрополітену.

Визначення мети та задачі дослідження. Мета досліджень – розроблення методу визначення ресурсу рейок метрополітену за умов виконання попереджувального шліфування та мащення, а також вибору раціональної періодичності виконання попереджувального шліфування на основі раніше отриманих результатів.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

- розроблення аналітичного методу визначення ресурсу рейок метрополітену за умов виконання попереджувального шліфування та мащення на основі раніше проведених стендових досліджень;

- розроблення методу визначення ресурсу рейок метрополітену за умов виконання попереджувального шліфування та мащення на основі раніше отриманих експериментальних досліджень в умовах експлуатації рейок колій метрополітену;

- визначення раціональної періодичності виконання попереджувального шліфування рейок метрополітену.

Основна частина дослідження.

Експлуатаційний ресурс рейок (напрацьований тоннаж T_p до моменту настання критичного значення розвитку дефектів бокової робочої поверхні головки рейки контактнo-втомного походження ($I_{cp}^{ep} = 15$ мм) метрополітену можна визначити користуючись раніше отриманими в [1] значеннями за такою формулою:

$$T_p = \frac{I_{cp}^{ep}}{V_{I_{cp}}}, \quad (1)$$

де I_{cp}^{ep} – граничне значення середнього розміру дефектів головки рейки контактнo-втомного походження в кривій ділянці колії метрополітену (значення, при перевищенні якого виконання попереджувального шліфування не матиме позитивного ефекту [1], $I_{cp}^{ep} = 15$ мм);

$V_{I_{cp}}$ – швидкість розвитку дефектів контактнo-втомного походження, яка розраховується за такою формулою:

$$V_{I_{cp}} = \frac{I_{cp}}{T_p}, \quad (2)$$

де I_{cp} – середній розмір дефектів бокової робочої поверхні головки рейки контактнo-втомного походження кривих ділянок колії метрополітену.

З урахуванням інтенсивності зношування рівняння (2) має вигляд

$$T_p = \frac{I_{cp}^{ep} \cdot T}{I_h \cdot L_{mp}}, \quad (3)$$

де I_h – лінійна інтенсивність зношування;

L_{mp} – довжина шляху тертя, яка розраховується за формулою

$$L_{mp} = \pi \cdot d_k \cdot n_k, \quad (4)$$

де d_k – діаметр колеса вагона метрополітену ($d_k = 870$ мм);

n_k – кількість колісних пар, пропущених по визначеній ділянці колії за період напрацювання тоннажу T_p до граничного середнього значення розмірів дефектів контактнo-втомного походження $I_{cp}^{ep} = 15$ мм.

За (3) отримано залежності лінійної інтенсивності зношування бокової робочої поверхні головки рейки зовнішньої

рейкової нитки в кривих ділянках колії від шорсткості контактуючих поверхонь дослідних ділянок колії (рис. 1, 2).

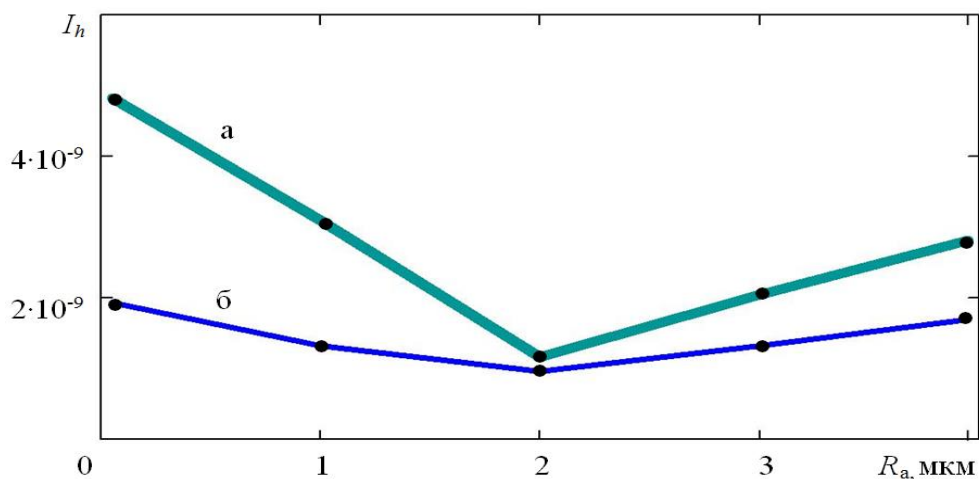


Рис. 1. Інтенсивність лінійного зношування рейки метрополітену дослідної ділянки колії на перегоні «Захисників України» - «Архітектора Бекетова»: а – за результатами стендових досліджень; б – за результатами експериментальних досліджень в умовах експлуатації

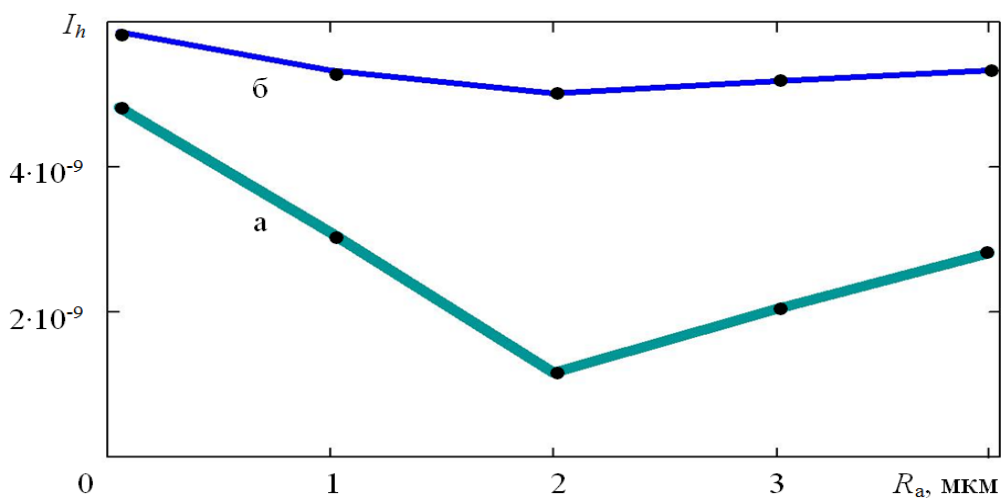


Рис. 2. Інтенсивність лінійного зношування рейки метрополітену дослідної ділянки колії на перегоні «Майдан Конституції» - «Проспект Гагаріна»: а – за результатами стендових досліджень; б – за результатами експериментальних досліджень в умовах експлуатації

За результатами (3) ресурс (для рейок може виражатись у значенні напрацьованого тоннажу T_p) рейок колій метрополітену наведено у табл. 1.

Слід зауважити, що користуючись методом визначення ресурсу рейок

метрополітену за умов виконання попереджувального шліфування за умов сухого контакту на основі раніше проведених стендових досліджень можливо грубо визначити значення напрацьованого тоннажу рейками дослідних ділянок до

моменту наставання критичного значення розвитку дефектів бокової робочої поверхні головки рейки контактно-втомного походження $I_{cp}^{zp} = 15$ мм. При цьому

використання аналітичного методу для умов мащення не є коректним з огляду на властивості мастильної плівки.

Таблиця 1

Результати проведених досліджень з визначення ресурсу рейок метрополітену

Шліфування до шорсткості	Напрацьований тоннаж T_p , млн т бруто до $I_{cp}^{zp} = 15$ мм	
	Дослідна ділянка на перегоні «Майдан Конституції» - «Проспект Гагаріна» (ПК 58+54,970-ПК 58+78,970)	Дослідна ділянка на перегоні «Захисників України» - «Архітектора Бекетова» (ПК 102+36,970-ПК 102+60,970)
$R_a = 4$ мкм	40,4	13,2
$R_a = 3$ мкм	42,8	13,5
$R_a = 2$ мкм	46,9	14,1
$R_a = 1$ мкм	36,7	13,0
$R_a = 0,08$ мкм	32,5	12,3

Саме тому було розроблено [1] метод визначення ресурсу рейок метрополітену за умов виконання попереджувального шліфування та мащення на основі раніше отриманих експериментальних досліджень в умовах експлуатації рейок колій метрополітену.

Порівнюючи графіки залежності інтенсивності розвитку дефектів контактно-втомного походження від пропущеного тоннажу по ділянці в [1], отримано значення напрацьованого тоннажу в момент досягнення поверхневими похилими тріщинами дослідної ділянки середнього значення в $I_{cp}^{zp} = 15$ мм. Значення середньої довжини похилих поверхневих тріщин в 15 мм приймається за критичне значення розвитку таких тріщин, при перевищенні якого необхідним є виконання коригуючого шліфування рейки, завданням якого є видалення поверхневого шару металу контактуючих поверхонь головки рейки з наявними дефектами. Тобто в такому випадку

подальше періодичне виконання попереджувального шліфування без виконання коригуючого шліфування рейок не є ефективним.

Для визначення найбільш ефективного у цій статті розглядаються такі варіанти експлуатації рейок кривих ділянок колії:

варіант 1 – експлуатація рейок без виконання шліфування та мащення контактуючих поверхонь (існуючий варіант експлуатації рейок у кривих ділянках колії метрополітену);

варіант 2 – експлуатація зі шліфуванням до $R_a = 2$ мкм без мащення контактуючих поверхонь (запропонований в [1] варіант експлуатації рейок у кривих ділянках колії метрополітену);

варіант 3 – експлуатація зі шліфуванням до $R_a = 2$ мкм та мащенням контактуючих поверхонь (запропонований в [1] варіант експлуатації рейок у кривих ділянках колії метрополітену).

Збільшення напрацювання тоннажу другого варіанта експлуатації рейок порівняно з першим визначається за такою формулою:

$$\Delta T_2 = T_2 - T_1. \quad (5)$$

Збільшення напрацювання тоннажу за третім варіантом експлуатації рейок порівняно з першим визначається за такою формулою:

$$\Delta T_3 = T_3 - T_1. \quad (6)$$

Для дослідних ділянок колії збільшення ресурсу рейок метрополітену за рахунок виконання їх попереджувального шліфування з метою доведення бокової поверхні головки рейки до шорсткості $R_a = 2$ мкм, в т. ч. за умов мащення, має вигляд, поданий на рис. 3.

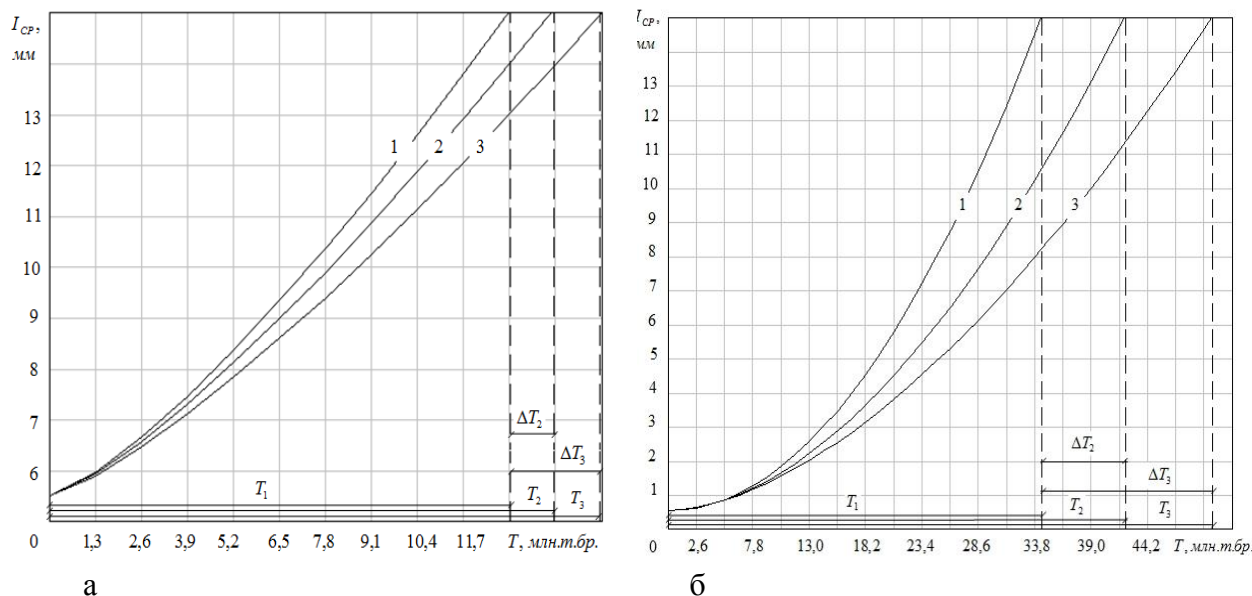


Рис. 3. Визначення впливу попереджувального шліфування рейок та мащення на інтенсивність розвитку дефектів контактної-втомного походження рейок метрополітену в залежності від пропущеного тоннажу:

а – дослідної ділянки колії на перегоні «Майдан Конституції» - «Проспект Гагаріна» (ПК 58+54,970-ПК 58+78,970); б – дослідної ділянки колії на перегоні «Захисників України» - «Архітектора Бекетова» (ПК 102+36,970-ПК 102+60,970); 1 – без виконання шліфування та мащення; 2 – при шліфуванні до $R_a = 2$ мкм, без мащення; 3 – при шліфуванні до $R_a = 2$ мкм та мащенням оброблених поверхонь

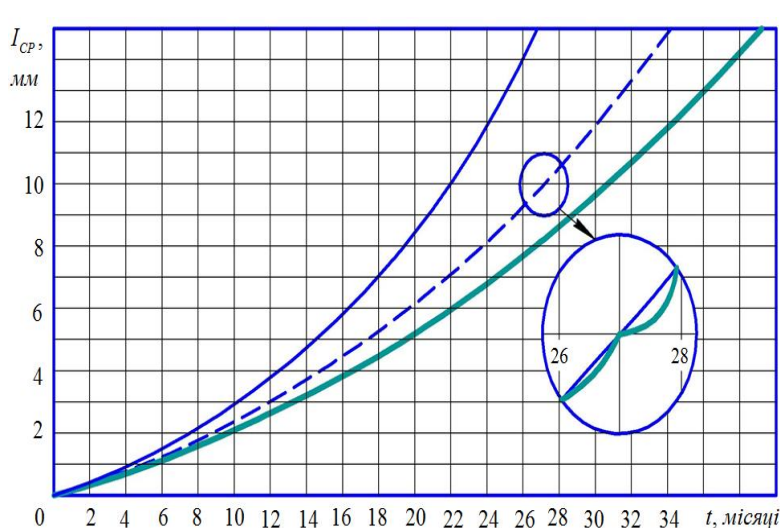
Значення напрацьованого тоннажу T та збільшення напрацьованого тоннажу ΔT за відповідних умов обробки поверхонь рейок дослідної ділянки на перегоні «Майдан Конституції» - «Проспект Гагаріна» (ПК 58+54,970-ПК 58+78,970) та ділянки на перегоні «Захисників України» -

«Архітектора Бекетова» (ПК 102+36,970-ПК 102+60,970) наведено в табл. 2.

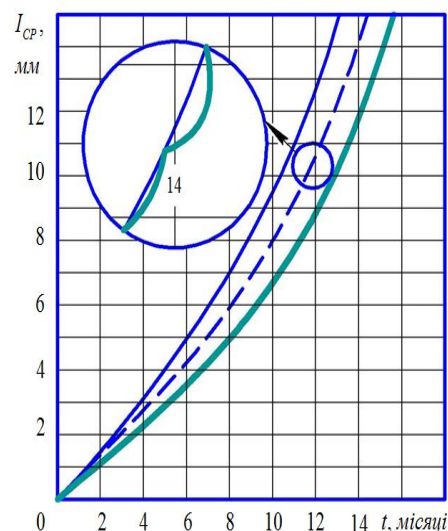
Для визначення раціональної періодичності виконання попереджувального шліфування рейок кривих ділянок колій Харківського метрополітену було виконано прогнозування розвитку дефектів контактної-втомного походження (рис. 4).

Результати порівняння варіантів експлуатації рейок дослідних ділянок колії Харківського метрополітену

Дослідна ділянка на перегоні «Майдан Конституції» - «Проспект Гагаріна» (ПК 58+54,970-ПК 58+78,970)					Дослідна ділянка на перегоні «Захисників України» - «Архітектора Бекетова» (ПК 102+36,970-ПК 102+60,970)				
Напрацьований тоннаж T , млн т бруutto			Збільшення напрацьованого тоннажу ΔT , млн т бруutto		Напрацьований тоннаж T , млн т бруutto			Збільшення напрацьованого тоннажу ΔT , млн т бруutto	
T_1	T_2	T_3	ΔT_2	ΔT_3	T_1	T_2	T_3	ΔT_2	ΔT_3
13,019	14,224	15,546	1,205	2,527	34,412	42,184	50,129	7,772	15,717



а



б

Рис. 4. Прогнозування розвитку дефектів контактнo-втомного походження рейок колії метрополітену: а – дослідної ділянки на перегоні «Майдан Конституції» - «Проспект Гагаріна» (ПК 58+54,970-ПК 58+78,970); б – дослідної ділянки на перегоні «Захисників України» - «Архітектора Бекетова» (ПК 102+36,970-ПК 102+60,970); — – без шліфування та мащення; — – при шліфуванні до $R_a = 2$ мкм з мащенням, періодичністю в 1 міс; - - - при шліфуванні до $R_a = 2$ мкм з мащенням, періодичністю у 2 міс

Запропонована в [1] методика прогнозування ресурсу рейок метрополітену дає змогу керувати розвитком основних дефектів рейок

зовнішньої рейкової нитки кривих ділянок колії метрополітену в залежності від повторності та режимів виконання попереджувального шліфування з

машенням. За умови зміни періодичності шліфування та мащення оброблених поверхонь до 2 міс відбудеться зменшення експлуатаційного ресурсу рейок метрополітену на перегоні «Майдан Конституції» - «Проспект Гагаріна» (ПК 58+54,970-ПК 58+78,970) (рис. 4, б) з 16,254 % до 8,471 %; для кривої ділянки колії на перегоні «Захисників України» - «Архітектора Бекетова» (ПК 102+36,970-ПК 102+60,970) (рис. 4, а) – з 31,35 до 18,424 %.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Розроблено аналітичний метод визначення ресурсу рейок метрополітену за умов виконання попереджувального шліфування та мащення на основі раніше проведених стендових досліджень. Проте використання цього методу можливе лише для умов сухого контакту. Використання аналітичного методу для умов мащення не є коректним урахувавши властивості мастильної плівки.

Розроблено метод визначення ресурсу рейок метрополітену за умов виконання

попереджувального шліфування та мащення на основі раніше отриманих експериментальних досліджень в умовах експлуатації рейок колій метрополітену. Запропонована методика прогнозування ресурсу рейок метрополітену дає змогу керувати розвитком їх основних дефектів у залежності від повторності та режимів виконання попереджувального шліфування рейок бокової робочої поверхні головки рейки зовнішньої рейкової нитки в кривих ділянках колії метрополітену з мащенням.

Визначено раціональне значення періодичності виконання попереджувального шліфування рейок метрополітену, яке склало $t = 1$ міс, або ж $T = 1,3$ млн т бруто пропущеного поїзного навантаження. За умови зміни періодичності шліфування та мащення оброблених поверхонь до 2 міс відбудеться зменшення експлуатаційного ресурсу рейок метрополітену на перегоні «Захисників України» - «Архітектора Бекетова» (ПК 102+36,970-ПК 102+60,970) зменшиться з 31,35 до 18,424 %.

Список використаних джерел

1. Дослідження впливу параметрів фінішного рейкошліфування на розвиток домінуючих дефектів рейок метрополітену [Текст]: звіт про науково-дослідну роботу. – Харків, 2016. – 60 с.
2. Voronin, S. Determination of rational roughness of the side surface of the rail top in curved sections of the underground railway track [Text] / S. Voronin, O. Skoryk, Ye. Korostelov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. Vol. 4, Issue 1(80). – P. 11-17. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75707.
3. Коростельов, Є. М. Визначення найбільш ефективних методів боротьби з домінуючими дефектами рейок колій метрополітену [Текст] / Є. М. Коростельов // Научные труды SWorld. – Иваново: Научный мир, 2016. Вып. №3 (44), Т.1. – С. 25-30. DOI: 10.21893/2410-6720-2016-44-1-068
4. Воронин, С. В. Анализ существующих способов уменьшения бокового износа рельсов в паре трения «колесо-рельс» в кривых участках пути [Текст] / С.В. Воронин, Е.Н. Коростелёв // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – №. 3. – С. 22-27.
5. Alonso, A. Wheel-rail contact: roughness, heat generation and conforming contact influence [Text] / A. Alonso, J.G. Gimenez // Tribology International Volume 41. – 8. 2008. P. 755-768. Doi: 10.1016/j.triboint. 2008.01.004.

6. Remington, P. Estimation of wheel/rail interaction forces in the contact area due to roughness [Text] / P. Remington, J. Webb // Journal of sound and vibration volume 193. – 5-6. 1996. P. 83-102. DOI: 10.1006/jsvi/1996.0249.

7. Rovira, A. Experimental and numerical modelling of wheel–rail contact and wear [Text] / A. Rovira, A. Roda, M.B. Marshall, H. Brunskill, R. Lewis // Original Research Article Wear 271. – 5-6. 2011. P. 911-924. DOI: 10.1016/j.wear.2011.03.024

8. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України [Текст]. – К.: ТОВ «Інпрес», 2013. – 194 с.

9. Chen, H. Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness [Text] / H. Chen, A. Namura, M. Ishida, T. Nakahara // Original Research Article Wear, 2016. DOI: 10.1016/j.wear.2016.05.012.

10. Wang, W.J. Wear and damage transitions of wheel and rail materials under various contact conditions Wear [Text] / W.J. Wang, R. Lewis, B. Yang, L.C. Guo, Q.Y. Liu, M.H. Zhu // Original Research Article Wear. – 15. 2016. – P. 146-152. DOI: 10/1016/j.wear.2016.05.021.

11. Keropyan, A. Impact of Roughness of Interacting Surfaces of the Wheel-Rail Pair on the Coefficient Of Friction in Their Contact Area [Text] / A. Keropyan, S. Gorbatyuk // Procedia Engineering. – 150. 2016. P. 406-410. DOI: 10/1016/j.proeng.2016.06.753.

12. Воронин, С. В. Моделирование контакта «колесо-рельс» по боковой поверхности пути на машине трения [Текст] / С. В. Воронин, С. С. Карпенко, Е. Н. Коростёлев // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 148. – Ч. 2. – С. 201-204.

Воронин Сергій Володимирович, д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: +380 (057) 730-10-66. E-mail: voronin.sergey@inbox.ru.

Скорик Олексій Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +380 (057) 730-10-10. E-mail: dek_srt@ukr.net.

Коростельов Євген Миколайович, аспірант кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +380 (057) 730-10-25. E-mail: kostya__90@mail.ru.

Voronin Serhii, Doctor of Science in Technology, associate professor Department of Construction, track and handling machines Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +380 (057) 730-10-66.

E-mail: voronin.sergey@inbox.ru.

Skoryk Oleksii, Candidate of Technical Sciences, associate professor Department of Track and track facilities Ukrainian State University of Railway Transport Tel.: +380 (057) 730-10-10. E-mail: dek_srt@ukr.net.

Korostelov Yevhen, PhD student, Department of Track and track facilities Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +380 (057) 730-10-25. E-mail: kostya__90@mail.ru.

Стаття прийнята 20.02.2017 р.

УДК 629.113+656.3.44.083

ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ В СИСТЕМІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ В УМОВАХ ITS

Доктори техн. наук В. П. Волков, І. В. Грицук (ХНАДУ),
кандидати техн. наук А. О. Каграманян (УкрДУЗТ), Ю. В. Грицук (ДНАБА),
асп. Ю. В. Волков (ХНАДУ)

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В СИСТЕМЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА В УСЛОВИЯХ ITS

Доктора техн. наук В. П. Волков, И. В. Грицук (ХНАДУ),
кандидаты техн. наук А. А. Каграманян (УкрГУЖТ), Ю. В. Грицук (ДНАСА),
асп. Ю. В. Волков (ХНАДУ)

FEATURES OF THE REMOTE IDENTIFICATION OF THE VEHICLE IN THE LIFE CYCLE OF INFORMATION SECURITY UNDER ITS

Dr. sc. sciences V.P. Volkov, I.V. Gritsuk, phd. tehn. A.A.Kagramanian, Yu.V. Gritsuk,
sciences pg. Yu.V.Volkov

У статті наведено результати дослідження інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів в умовах експлуатації. Показані особливості проведення дистанційної ідентифікації транспортного засобу в системі інформаційного забезпечення життєвого циклу в умовах ITS. Наведено алгоритм дистанційного отримання в інформаційно-програмному комплексі інформації, що забезпечує ідентифікацію транспортного засобу в процесах експлуатації в умовах ITS.

Ключові слова: транспортний засіб, дистанційний моніторинг, код, технічний стан, блок керування, умови експлуатації, алгоритм.

В статье представлены результаты исследования информационной системы мониторинга параметров технического состояния транспортных средств в условиях эксплуатации. Показаны особенности проведения дистанционной идентификации транспортного средства в системе информационного обеспечения жизненного цикла в условиях ITS. Представлен алгоритм дистанционного получения в информационно-программном комплексе информации, обеспечивающей идентификацию транспортного средства в процессах эксплуатации в условиях ITS.

Ключевые слова: транспортное средство, дистанционный мониторинг, код, техническое состояние, блок управления, условия эксплуатации, алгоритм.

The article presents the results of the study information system for monitoring the technical condition of vehicles in operation parameters. To perform remote monitoring of technical condition parameters and diagnosing the technical condition of vehicles in the complex equipment should be combined navigation and coherent and diagnostic blocks that are technologically connected with an extensive network of staff and additional sensors monitoring the technical condition of individual components and vehicle systems. At the same time, the interaction of complex airborne

monitoring the technical condition of the vehicle and the diagnosis should be carried out within the framework of a single ideology mobile information-diagnostic system of the vehicle. The features of the identification of the vehicle using the VIN-code and firmware diagnostic complex for monitoring of technical condition. The technology is based on the combined action of existing standards and identify features of vehicle manufacturers. The features of the remote identification of the vehicle in the system of information support lifecycle ITS conditions. The algorithm to obtain remote information and software system information, providing identification of the vehicle in service processes ITS conditions.

Keywords: *vehicle, remote monitoring, code, technical condition, the control unit, the operating conditions, the algorithm.*

Вступ. Сучасні бортові системи і комплекси моніторингу параметрів технічного стану в умовах інтелектуальних транспортних систем (ITS) дають змогу здійснювати ідентифікацію транспортних засобів (ТЗ), безперервне автоматичне вимірювання параметрів, що характеризують технічний стан ТЗ, діагностування, а саме: контроль справності ТЗ і його складових елементів, розпізнавання і запобігання розвитку відмов у його роботі і з рештою – забезпечення функціонування системи технічного обслуговування (ТО) і ремонту ТЗ за технічним станом [1-4]. Означені системи являють собою складний комплекс бортових і стаціонарних технічних та програмних засобів, які повинні бути об'єднані за допомогою навігаційно-зв'язкових і діагностичних блоків системи керування, що технологічно пов'язані з розгалуженою мережею штатних і додаткових датчиків контролю технічного стану окремих вузлів і систем ТЗ. При цьому системна взаємодія бортового комплексу моніторингу технічного стану ТЗ, ідентифікації і діагностування повинна здійснюватись у рамках єдиної ідеології мобільної інформаційно-діагностичної системи ТЗ [1-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі виробники і розробники систем моніторингу, ідентифікації і діагностування ТЗ реалізують системи комунікацій між транспортним засобом і віддаленим засобом контролю за різним призначенням [3, 5-8], а також розробляють

системи визначення несправностей у телематичній системі контролю технічного стану ТЗ в реальному часі [2-4]. Також відомі інтелектуальні комплекси для управління експлуатацією ТЗ [3, 8-10], які містять у собі програмне забезпечення інформаційних програмних комплексів (ІПК) [11-13]. Проведеними дослідженнями [3, 8-13] були забезпечені можливості дистанційного використання моніторингу параметрів технічного стану ТЗ у складі бортових інформаційно-діагностичних комплексів (ІДК), а також можливість ідентифікації параметрів ТЗ та визначення працездатності в процесах експлуатації ТЗ в умовах ITS. Питання ідентифікації ТЗ в умовах експлуатації за допомогою бортового ІДК в умовах віртуального підприємства з експлуатації автомобільного транспорту в попередніх дослідженнях не були розкриті на достатньому рівні. Тому висвітлення цього питання при дистанційному визначенні умов експлуатації і технічного стану ТЗ в умовах ITS можливо вважати доцільним.

Для здійснення моніторингу й ідентифікації ТЗ, у складі бортового інформаційного комплексу, доцільно визначити, узагальнити наявні відомості, а також створити алгоритм, що використовує інформаційний обмін у процесі дистанційного моніторингу й ідентифікації ТЗ, що працюють в умовах ITS.

Визначення мети та задачі дослідження. Завдання проведення дистанційної ідентифікації транспортного засобу в умовах ITS може бути вирішено

використанням програмно-діагностичного комплексу, для чого необхідно обґрунтувати особливості, функції і зв'язки основних елементів для здійснення інформаційного обміну при виконанні моніторингу й ідентифікації транспортних засобів на всіх етапах виконання робіт у відповідності до розробленого алгоритму в системі забезпечення життєвого циклу.

Основний матеріал. У ХНАДУ на кафедрі ТЕСА проводяться роботи щодо дослідження можливості дистанційного отримання інформації про умови експлуатації ТЗ в умовах ITS. Однією із складових цієї роботи є формування й дослідження можливості дистанційної ідентифікації ТЗ за параметрами стану в пам'яті запам'ятовуючого пристрою ТЗ за допомогою засобів комунікацій в інформаційних умовах ITS [14] і розробленого у ХНАДУ ІПК "IdenMonDiaOperCon "HNADU-16".

Основна частина дослідження. Початковим етапом інформаційної моделі ІПК "IdenMonDiaOperCon "HNADU-16"" є отримання даних про ТЗ в процесі його ідентифікації. Крім цього, одночасно відбувається ідентифікація і самого діагностичного (ідентифікаційного) обладнання. Важливість даного етапу інформаційної моделі ІПК пояснюється якістю розпізнавання обладнання, що необхідно для ідентифікації і самого ТЗ [10, 15, 16], для параметрів технічного стану якого можливо здійснювати прогнозування.

Ідентифікацію ТЗ в системах дистанційного моніторингу можливо проводити за VIN-кодом (Vehicle Identification Number) або ідентифікаційним номером ТЗ [16]. VIN-код – це оригінальний код ТЗ, що складається з комбінації сімнадцяти (цифрових і літерних) знаків, яка властива тільки одному ТЗ та є обов'язковим елементом маркування й індивідуальності кожного ТЗ (протягом 30 років) [17]. Єдиних світових стандартів для складання ідентифікаційного номера для ТЗ немає і кожен виробник може формувати захисний

код довільно, але при експорті продукції прийнято дотримуватися певних стандартів. За основу взяті стандарти, що діють у 24 країнах, що є членами Міжнародної організації стандартів ISO.

Розшифровування VIN-коду можливо проводити вручну або використовуючи для цього VIN-декодер – спеціальну програму, або використовуючи послуги сервісів, що пропонуються в Інтернеті [18], за допомогою гаджетів тестових систем з бездротовим пристроєм зв'язку на борту ТЗ, які отримують необхідну інформацію за допомогою бортових систем моніторингу технічного стану ТЗ через OBD-сканер (ТЗ після 2004 р. випуску).

VIN містить інформацію про виробника ТЗ, сам ТЗ, рік його випуску і тому є простим і надійним способом ідентифікації автомобіля та захисту його від викрадення. Сучасна структура VIN основана на спільній дії стандартів ISO 3779-1983 - Road vehicles. Vehicle identification number (VIN). Content and structure «Дорожні транспортні засоби. Ідентифікаційний номер транспортного засобу. Зміст і структура» та ISO 3780-1983 - Roadvehicles. Worldmanufactureridentifier (WMI) code. «Дорожні транспортні засоби. Ідентифікаційний номер світового виробника», прийнятих Міжнародною організацією зі стандартизації ISO відповідно в 1979 і 1980 роках. Сумісні, але з деякими відмінностями, версії цих стандартів були прийняті Європейським Союзом і Сполученими Штатами Америки [16-18].

З 1981 року VIN складається з 17 символів, літер латинського алфавіту і цифр, які не містять у собі літери I(i), O(o) та Q(q) (щоб усунути непорозуміння з цифрами) [16-18]. VIN ТЗ складається з трьох частин: WMI, VDI і VIS, де WMI (World Manufacturers Identification) – загально-світовий індекс виготовлювача; VDS (Vehicle Description Section) – описова частина; VIS (Vehicle Identification Section) – відмітна частина. Детальний опис процесу ідентифікації ТЗ, розшифровування VIN-коду ТЗ описані в [10].

На рис. 1 показаний алгоритм ідентифікації ТЗ в межах ІПК

«IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» в умовах ITS.

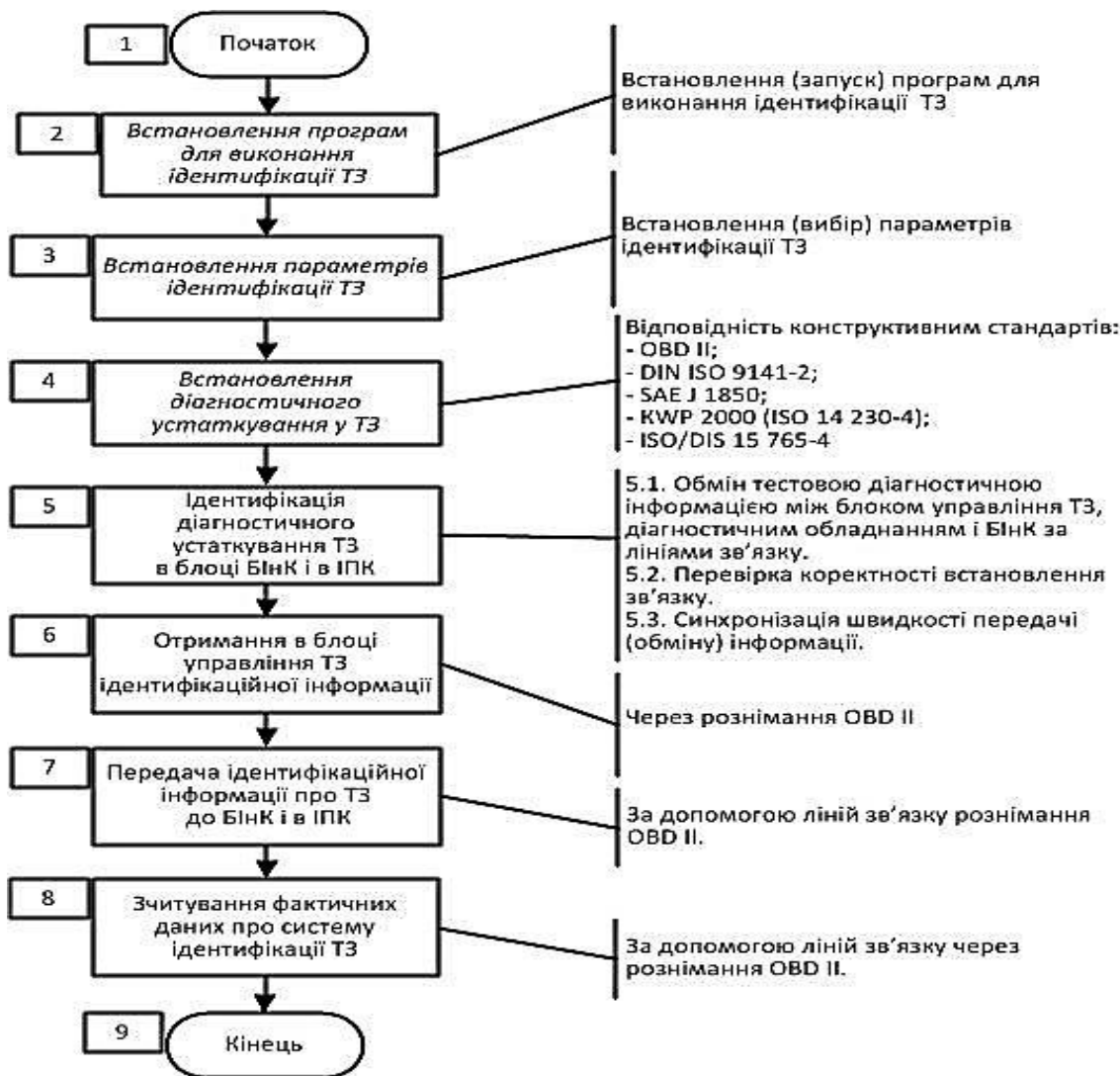


Рис. 1. Алгоритм ідентифікації ТЗ в межах ІПК «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16»» в умовах ITS

Для забезпечення дії розробленого алгоритму (блок 1) на початку роботи потрібно в блоці 2 встановити (запустити) програми діагностування стану ТЗ в бортове обладнання забезпечення моніторингу і діагностування стану ТЗ. Після цього в блоці 3 здійснюється встановлення (вибір) параметрів моніторингу і діагностування технічного стану ТЗ. На наступному кроці алгоритму, в блоці 4, відбувається встановлення діагностичного устаткування в ТЗ. Для

з'єднання ТЗ і діагностичного обладнання необхідно сполучити діагностичне обладнання або засіб моніторингу та рознімання OBD ТЗ [1-19]. Використовуючи перехідник (рис. 2), здійснюється під'єднання через клеми 7 і 15 або 2 і 10 діагностичного рознімання тільки до блока керування системою випуску ВГ (приготування паливної суміші і запалення) ТЗ. Деякі автовиробники виводять на ці клеми також дроти К і L інших блоків керування.

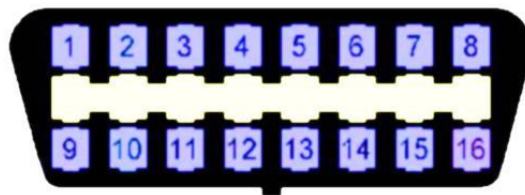


Рис. 2. Діагностичне рознімання [6, 19]:

клема 7 і 15: передача інформації за стандартом DIN ISO 9141; клема 2 і 10: передача інформації за стандартом SAE J 1850; клеми 1, 3, 8, 9, 11-13 не задіяні у системі самодіагностування OBD (розпорядження з управління передачею даних за стандартом OBD II, розділ "OBD IIDV"); клема 4: маса транспортного засобу (кузова); клема 5: сигнал «-»; клема 6: сигнал CAN HIGH; клема 14: сигнал CAN LOW; клема 16: "+" від АКБ

Автовиробник може розташувати дроти К і L інших блоків керування (наприклад, системи АБС, коробки передач, надувної подушки безпеки і т. д.) в розніманні на свій розсуд (наприклад вивести їх на клеми 1, 8, 9, 13).

Кінці перехідникової коробки вставляються у гнізда, у які вставляються рознімання універсального кабелю.

Клеми 3, 11 і 12 також не задіяні при діагностиці автомобіля. На цих клемах робочий контур OBD II-DV визначає шину автомобіля (шина є проводкою, до якої можуть підключатися різні блоки керування).

Діагностичні рознімання можуть бути встановлені на автомобілях, не обладнаних блоками керування з можливістю діагностування. Наявність діагностичного рознімання на автомобілі, таким чином, не може гарантувати можливість діагностування транспортного засобу, використовуючи спеціальне програмне забезпечення.

На цьому ж етапі дії алгоритму, у блоці 4, відбувається забезпечення зв'язку між блоком керування ТЗ і діагностичним (скануючим пристроєм) у відповідності до стандарту ISO 9141-2. Цей стандарт, який узгоджується з американським стандартом OBD II, закріплює правила здійснення зв'язку між блоками керування автомобіля і діагностичним устаткуванням. Стандартом ISO 9141-2 визначено порядок здійснення контролю, перевірки, налаштування систем автомобіля з можливістю самодіагносту-

вання. Стандарт ISO 9141-2 відрізняється тільки способом здійснення зв'язку.

У стандарті OBD II також установлений порядок здійснення зв'язку за стандартом ISO 9141-2 як альтернатива стандарту SAE J 1850. Тим часом, також допускається до застосування стандарт KWP 2000 (ISO 14 230-4). Для стандартів OBD II і EOBD зараз діють такі способи передачі інформації:

1) за стандартом ISO 9141-2 [6, 19]: застосовується європейськими автовиробниками; з низькою швидкістю (5 бод);

2) за стандартом ISO 14 230-4 (KWP 2000): застосовується європейськими автовиробниками; можливо з високою і низькою швидкістю;

3) за стандартом SAE J 1850 (американські автовиробники);

4) за стандартом ISO/DIS 15 765-4: діагностування бортового контролера зв'язку CAN та систем випуску відпрацьованих газів.

У блоці 5 відбувається ідентифікація (ініціалізація) діагностичного устаткування ТЗ в блоці бортового інформаційного комплексу (БІНК) моніторингу і діагностування в ІПК через лінії зв'язку. При діагностиці блоків керування використовуються різні варіанти ідентифікації (ініціалізації) діагностичного устаткування. Вони описані у відповідних стандартах. Ініціалізація здійснюється через діагностичне устаткування, наприклад

через 5-бодовий генератор адресації (стандарт ISO 9141-2). Ініціалізація при встановленні зв'язку між діагностичним приладом і блоком керування систем, пов'язаних з утворенням ВГ (запалення, сумішоутворення), здійснюється через передачу адреси 33H (де H-гексадецимальна система) із швидкістю 5 біт/с. Потім діагностичний прилад отримує від блока підтвердження на ініціалізацію. Він складається зі зразка синхронізації за швидкістю бод [6, 19] і двох ключових слів.

Для перевірки коректності встановленого зв'язку діагностичний прилад відправляє друге закодоване слово, записане у зворотному порядку (замість логічного елемента "0" пишеться "1", і навпаки). Після цього блок керування відправляє записану у зворотному порядку адресу 33H.

Зразок синхронізації за швидкістю бод: вона складається із записаних чотири рази в одному ряду логічних рівнів "1" і "0" (прямокутний сигнал). Ці 8 біт інформації починаються і закінчуються стартовим і кінцевим бітом відповідно. Вона закінчується логічним елементом "1". Цей процес може тривати мінімум 2 мс або стільки, скільки потрібно для передачі одного біта зразка синхронізації, залежно від того, який біт довший. Зразок синхронізації швидкості передачі даних дає змогу "встановити контакт" між діагностичним приладом і блоком керування.

Кодові слова. Комітет зі стандартизації автомобілів FAKRA надає автовиробникам і виробникам комплектуючих кодові слова. Кодові слова завжди передаються парами. Для забезпечення надійного зв'язку між блоком керування і перевірним приладом використовуються логічні стани "0" і "1" як для передачі від перевірного устаткування до блока керування, так і від блока керування до перевірного приладу [6]. У пов'язаних системах, наприклад у сепаратних системах запалювання та сумішоутворення, проводи з позначкою K і L поєднані між собою. Розрізняють системи, у яких здійснюється:

- унідирекціональна передача даних (тільки в одному напрямі) по K- або L-проводах;

- бідирекціональна передача даних (в обох напрямках) по K-проводу.

Після сигналу ініціалізації не допускаються збої в обміні даними між системами. За це несе відповідальність виробник ТЗ [6, 19].

При виконанні робіт у блоках 4-5 потрібно виходити з того, що описаний у стандарті ISO 15 031-4 діагностичний прилад повинен автоматично розпізнавати тип обміну інформацією із системою керування двигуном, що перевіряється. Крім того, діагностичний прилад повинен: відобразити оригінальний VIN-код ТЗ або ідентифікаційний номер ТЗ, відобразити додаткову інформацію про ТЗ в процесі його ідентифікації.

У блоці 6 відбувається зчитування з блока керування ТЗ через рознімання OBD II ідентифікаційної інформації про ТЗ, що задіяний у моніторингу технічного стану.

У блоці 7 відбувається передача ідентифікаційної інформації про ТЗ, що задіяний у моніторингу технічного стану, до БІНК і в ІПК за допомогою ліній зв'язку ТЗ (системи моніторингу) через рознімання OBD II [6].

У блоці 8 відбувається зчитування фактичних даних про систему ідентифікації ТЗ за допомогою ліній зв'язку [6] ТЗ (системи моніторингу) через рознімання OBD II.

Результати процесу ідентифікації ТЗ в умовах ITS за допомогою програмного модуля carlife (<http://carlife.in.ua/vin-kod>) і програмного модуля програмного модуля Torque і ІПК «IденMonDiaOperCon «HNADU-16»» показані на рис. 3.

Висновок. Виконано складання і детально описаний алгоритм проведення дистанційної ідентифікації транспортних засобів у процесах експлуатації в умовах ITS у складі бортового інформаційного комплексу за допомогою VIN-коду транспортного засобу.

Общая информация

Предоставляется на основе универсального алгоритма по расшифровке VIN-кода. В некоторых случаях данный алгоритм может расшифровывать информацию с незначительной погрешностью.
[Узнать подробнее...](#)

Идентификационный номер :	WWZZZAUZEP019956
Марка :	VOLKSWAGEN
Модель :	Golf
Код модели :	Тип 5G1
Тип кузова :	хэтчбек
Количество дверей :	5
Модельный год :	2014
Рынок сбыта :	Европа
Страна сборки :	данные отсутствуют

Не устраивает предварительный отчет? Отчет содержит неточности и ошибки?
[Узнать подробнее...](#)

Общая информация

Предоставляется на основе универсального алгоритма по расшифровке VIN-кода. В некоторых случаях данный алгоритм может расшифровывать информацию с незначительной погрешностью.
[Узнать подробнее...](#)

Идентификационный номер :	TMAD231AAEJ003524
Марка :	HYUNDAI
Модель :	I30
Код модели :	GD
Тип кузова :	хэтчбек
Количество дверей :	3
Модельный год :	2014
Рынок сбыта :	кроме Северной Америки
Страна сборки :	Чехия

Не устраивает предварительный отчет? Отчет содержит неточности и ошибки?
[Узнать подробнее...](#)

а

б

Результаты идентификации транспортного средства	
Начало интервала	2017-01-17 17:06:32
Конец интервала	2017-01-18 12:02:19
VIN код автомобиля	WWZZZAUZEP019956
Производитель	данные отсутствуют
Объем двигателя, см ³	1968
Марка	VOLKSWAGEN
Модель	GOLF
Тип	Легковой хэтчбек-В
Регистрационный номер	AH2214IX
ID калибровки авто:	E7FCMS1A----

в

Результаты идентификации транспортного средства	
Начало интервала	2017-01-20 16:09:40
Конец интервала	2017-01-21 08:05:29
VIN код автомобиля	TMAD231AAEJ003524
Производитель	Чехия
Объем двигателя, см ³	1396
Марка	HYUNDAI
Модель	I30
Тип	Легковой хэтчбек-В
Регистрационный номер	AH0539IH
ID калибровки авто:	E7FCMS1A----

г

Рис. 3. Підсумковий звіт про результати ідентифікації транспортного засобу в умовах експлуатації: *а, б* – з використанням програмного модуля Carlife (<http://carlife.in.ua/vin-kod>); *в, г* – з використанням програмного модуля Torque і ПІК «IденMonDiaOperCon «HNADU-16»»

Список використаних джерел

1. Особливості моніторингу і визначення статусу несправностей транспортного засобу у складі бортового інформаційно-діагностичного комплексу [Текст] / В.П. Волков, І.В. Грицук, А.П. Комов, Ю.В. Волков // Вісник Національного транспортного університету. – 2014. – Вип. 30. – С. 51–62.
2. Ахмедов, Т. Н. Основы системы контроля состояния транспортного средства в процессе выполнения перевозок [Текст] / Т.Н. Ахмедов, С.В. Жанказиев, А.Е. Финкель // Научные аспекты развития транспортно-телематических систем. – М.: МАДИ, 2010. – С. 138-164.
3. Интеграция технической эксплуатации автомобилей в структуры и процессы интеллектуальных транспортных систем [Текст]: монография / В.П. Волков, В.П. Матейчик, О.Я. Никонов [и др.]; под ред. В.П. Волкова. – Донецк: Изд-во «Ноулидж», 2013. – 398 с.
4. Ахмедов, Т. Н. Принципы определения статусов неисправностей в телематической системе контроля технического состояния автомобиля в реальном времени [Текст] / Т.Н. Ахмедов // Научные аспекты развития транспортно-телематических систем. – М.: МАДИ, 2010. – С. 165-180.
5. Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем [Текст] / В.П. Волков, В.П. Матейчик, П.Б. Комов [та ін.] // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. Сер. Автомобіле- та тракторобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 29 (1002). – С.138-144.
6. Загальні принципи діагностування електронних систем керування автомобіля [Текст]: навч. посібник / О.Ф. Дашенко, В.Г. Максимов, О.Н. Ніцевич [та ін.]; за ред. М.Б. Копитчука. – Одеса: Наука і техніка, 2012. – 392 с.
7. Hansen P., Wolfe V. Remote Diagnostics - the Next OEM Frontier [Text] // The Hansen Report on Automotive Electronics. Dec. 2003/Jan. 2004. Vol. 16, № 10. P. 1-3.
8. Расширенный модельный ряд бортовых систем «ДЕЛЬТА» для комплексного дистанционного контроля подвижного состава в эксплуатации [Текст] / А.А. Каграманян, С.В. Мямлин, А.В. Шелковый [и др.]. // Локомотив-информ: Международный информационный научно-технический журнал. – 2006. – №5. – С. 37-39.
9. Головин, С. Ф. Технический сервис транспортных машин и оборудования [Текст] / С.Ф. Головин. – М.: Альфа-М: ИНФРА-М, 2008. – 288 с.
10. Технічний регламент віртуального підприємства з експлуатації автомобільного транспорту «ХНАДУ ТЕСА» (основні положення) [Текст]: твір науково-практ. характеру / В.П. Волков, В.П. Матейчик, П.Б. Комов, О.Б. Комов, І.В. Грицук, Л.О. Македонська, З.І. Краснокутська, С.В. Коломієць, А.П. Комов, Є.О. Комов, О.В. Предко; заявник і патентовласник Волков В. П і ХНАДУ; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53291 від 24.01.2014; заявка від 22.11.2013 р. № 53603.
11. Інтелектуальні системи моніторингу транспорту [Текст]: монографія / В.П. Волков, В.П. Матейчик, П.Б. Комов [та ін.]. – Харків: Вид-во НТМТ, 2015. – 246 с.
12. Технічний регламент програмного продукту «Віртуальний механік «HADI-12»» при реєстрації в ньому нового транспортного засобу (Науковий твір) / В.П.Волков, П.Б. Комов, О.Б. Комов, І.В. Грицук, Л.О. Македонська, З.І. Краснокутська, А.П. Комов, Є.О. Комов // Заявник і патентовласник Волков В. П. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 47233 от 15.01.2013. Заявка від 15.11.2012 №47525.
13. Технічний регламент програмного продукту «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12»» при звичайній роботі [Текст]: твір науково-практ. характеру) / В.П. Волков, В.П. Матейчик, П.Б. Комов, О.Б. Комов, І.В. Грицук, Л.О. Македонська, З.І. Краснокутська, С.В. Коломієць, А.П. Комов, Є.О. Комов, О.В. Предко; заявник і патентовласник Волков В. П і ХНАДУ; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53292 від 24.01.2014 р.; заявка від 22.11.2013 р. № 53604.

14. Технічний регламент і результати роботи інформаційного програмного комплексу (продукту) «MonDiaFor «HADI-15»» (monitoring, diagnosis, forecasting technical condition of the vehicle under ITS) при здійсненні моніторингу, діагностування, прогнозування параметрів технічного стану транспортного засобу в умовах інтелектуальних транспортних систем [Текст]: твір науково-практ. характеру / В.П. Волков, І.В. Грицук, О.В. Предко, Ю.В. Грицук, З.І. Краснокутська, Ю.В. Волков, А.І. Грицук, Т.В. Волкова, В.С. Вербовський, В.Ю. Грицук, В.В. Вербовська, А.В. Ченцов; заявка від 04.04.2016 р. № 64765.

15. Gritsuk, I., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., and Volkov, V., "Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator," SAE Technical Paper 2016-01-0204, 2016, doi:10.4271/2016-01-0204.

16. Власов, В. М. Информационные технологии на автомобильном транспорте [Текст] / В. М. Власов, А. Б. Николаев, А. В. Постолиг, В. М. Приходько; под общ. ред. В. М. Приходько ; МАДИ (Гос. техн. ун-т). – М.: Наука, 2006. – 283 с.

17. Что означает идентификационный номер автомобиля [Электронный ресурс] / АвтоМотоСпец. – Режим доступа: <http://avtomotospec.ru/raznoe/chto-takoe-vin-kod-ili-identifikacionnyj-nomer-avtomobilya.html>.

18. Как читать VIN-код автомобиля / Автопортал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://autoportal.ua/articles/encyclopaedia/21797.html>.

19. CAR-VINВсе о ВИН кодах. VIN [Vehicle Identification Number] Вин-код [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.car-vin.ru/probit-vin/106-probit-vin>.

20. Хендерсон, Б. OBD-II и электронные системы управления двигателем [Текст]: Руководство / Б.Хендерсон, Дж. Хейнес. – СПб.: Алфамер Паблишинг, 2011. – 248 с.

Волков Володимир Петрович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел.: (067) 747-21-77. E-mail: volf949@mail.ru.

Грицук Ігор Валерійович, д-р техн. наук, доцент кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел.: (066) 698-37-39. E-mail: gritsuk_iv@ukr.net.

Каграманян Артур Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри теплотехніки та теплових двигунів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 771-431-00.

Грицук Юрій Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри загальної інженерної підготовки Донбаської національної академії будівництва і архітектури, м. Краматорськ. Тел.: (050) 620-47-02. E-mail: yuri.gritsuk@gmail.com.

Волков Юрій Володимирович, аспірант кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел.: (098) 853-99-52. E-mail: yura_volkov_88@mail.ua.

Volkov Volodymyr Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of "Technical operation and service vehicles", Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU), Kharkiv. Tel.: (067) 747-21-77. E-mail: volf949@mail.ru.

Grytsuk Igor Valeriyovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of "Technical operation and service vehicles", Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU), Kharkiv. Tel.: (066) 698-37-39. E-mail: gritsuk_iv@ukr.net.

Kagramanian Artur Aleksadrovich, Candidate of Technical Sciences (PhD) Associate Professor at the Department of heat engineering and heat engines, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел. (057) 771-431-00.

Grytsuk Yuri Valeriyovich, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor at the Department of general engineering training, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Kramators'k. Tel.: (050) 620-47-02. E-mail: yuri.gritsuk@gmail.com.

Volkov Yurii Volodymyrovich, Postgraduate Student at the Department of "Technical operation and service vehicles", Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU). Tel.: (098)853-99-52. E-mail: yura_volkov_88@mail.ua.

Стаття прийнята 25.02.2017 р.

УДК 624.21

ФУНКЦІЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ СПОРУД

Асп. О. О. Давиденко (НТУ)

ФУНКЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ СООРУЖЕНИЙ

Асп. А. А. Давыденко (НТУ)

THE HAZARD RATE FUNCTION OF ELEMENTS STRUCTURES

Graduate student A. A. Davydenko

Стаття присвячена аналізу теоретичних засад оцінки інтенсивності відмов елементів споруд протягом часу життєвого циклу експлуатації. Аналізуються функції розподілу часу служби, якими можливо подати функцію інтенсивності відмов, адекватну історичним даним експлуатації залізобетонних мостів України. Пропонуються моделі, основані на прийнятих у теорії споруд розподілах випадкових змінних.

Ключові слова: інтенсивність відмов, імовірність відмови, надійність у функції часу, U-подібна крива.

Статья посвящена анализу теоретических основ оценки интенсивности отказов элементов сооружений в течение времени жизненного цикла эксплуатации. Анализируются функции распределения времени службы, которыми возможно представить функцию интенсивности отказов, адекватную историческим данным эксплуатации железобетонных мостов Украины. Предлагаются модели, основанные на принятых в теории сооружений распределениях случайных переменных.

Ключевые слова: интенсивность отказов, вероятность отказа, надежность в функции времени, U-подобная кривая.

The article analyzes the theoretical basis assess the hazard rate of elements constructions during the time of life cycle exploitation. The problem became especially actual for Ukraine in the last 20-25 years. Today we must note a rapid growth physically obsolete structures, excessive increase in the number of bridges in need of repair, lack of survey data. In these circumstances, for trouble-free operation and life extension works, we need new scientific approaches to assess and prediction their technical condition lifecycle. Looking realistic efficient algorithms that would give the quantitative criteria of reliability and prediction resource elements in the function of time. Analyzes the distribution function of the time life may present function hazard rate adequate historical data maintenance service Ukraine reinforced concrete bridges. We offer models based on accepted theory works distributed random variables.

Keywords: hazard rate, failure rate, time-dependent reliability, bathtub curve.

Вступ. Статтю присвячено проблемі ймовірного моделювання відмови елементів споруд, в інших термінах – оцінці залишкового ресурсу споруд. Проблема стала особливо актуальною для України в останні 20-25 років. Сьогодні

доводиться констатувати стрімке збільшення кількості фізично застарілих споруд, непомірне зростання кількості мостів, що потребують ремонту, брак даних обстежень. У цих умовах для безаварійної експлуатації та продовження ресурсу

споруд потрібні нові наукові підходи з оцінки і прогнозу їх технічного стану протягом життєвого циклу експлуатації. Потрібні ефективні реалістичні алгоритми, котрі дали б кількісні критерії рівня надійності та прогнозу ресурсу елементів у функції часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній теорії надійності поняття «функція інтенсивності відмов» сьогодні є класичним і вводиться як ще одна *міра надійності* у функції часу [8, 12]. Тут кількісною мірою надійності, параметром надійності, виступає ймовірність того, що відмова елемента споруди не відбудеться *протягом часу експлуатації* [5, 7, 9-11]. В інших термінах – це функція часу, яка дає аналітичну залежність зростання ймовірності відмови протягом життєвого циклу експлуатації.

Поняття «функція інтенсивності відмов» відоме давно, застосовувалось уже на початку минулого сторіччя в багатьох сферах, починаючи з електротехнічних пристроїв або медичних прогнозів до соціальних проблем, наприклад у такій екзотичній задачі, як «прогноз часу

повернення рецидивіста до тюрми». Проте в оцінці надійності конструкцій термін уперше з'являється в авіонавтиці США тільки в 50-х роках [6].

У російській технічній літературі поняття «функція інтенсивності відмов» фігурує в монографіях В. В. Болотіна [1] (1971 р.) та [2] (1982 р.), Є. С. Вентцель [3] (1972 р.). Типовий графік функції інтенсивності відмов наведено в монографіях Болотіна В. В. [1, 2]. Цей символічний графік (рис. 1) має три характерних відтинки:

- відносно невеликий відтинок часу t_0 , так званий період «*пристосування*» системи, коли інтенсивність відмов зменшується до приблизно постійного значення;
- центральний великий відтинок часу $t_1 - t_0$, що відповідає практично всьому життєвому циклу безпечної експлуатації, характерний приблизно постійним значенням функції інтенсивності відмов;
- нарешті, невеликий кінцевий відтинок часу $t_2 - t_1$ різкого збільшення значення функції інтенсивності відмов, тобто збільшення ризику відмови системи.

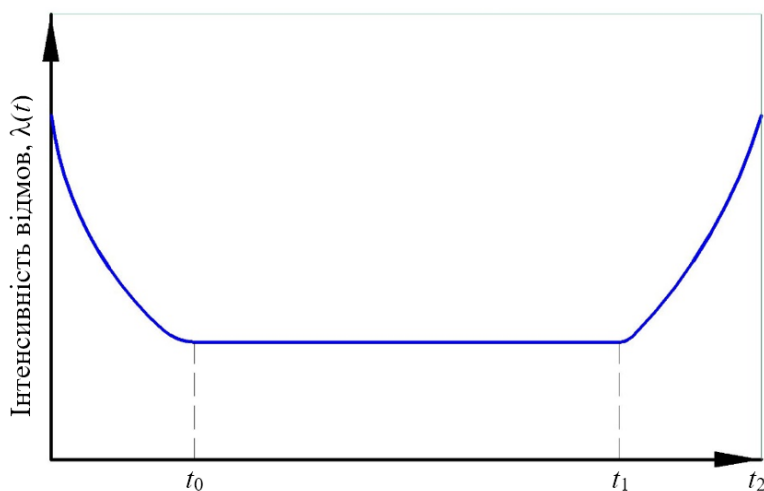


Рис. 1. Типова крива функції інтенсивності відмов [1,2]

Подібний вид мають криві функції інтенсивності відмов у класичних зарубіжних монографіях з надійності

систем [5, 9, 10, 12]. В англійській літературі крива має усталену назву – «*U-подібна крива*» (*bathtub curve*).

Виконаний аналіз великої кількості публікацій з проблеми дає підстави стверджувати, що U-подібна крива функції інтенсивності відмов, наведена В. В. Болотіним, характерна для технічних систем механічних, електричних, електронних тощо. Що стосується кривої для елементів будівельних конструкцій, то вона має дещо іншу форму, визначити яку саме і є завданням цього дослідження.

У літературі англійською, французькою, російською мовами ми не знайшли прикладу кривої функції інтенсивності відмов елементів споруд. Показово, що навіть у монографії В. В. Болотіна [1], яка

має назву «Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений», не наведено ні одного прикладу кривої з числовими параметрами для елементів будівельних конструкцій.

Натомість є публікації, у яких узагалі виключається з розгляду період пристосування, а сама крива апроксимується ламаною лінією з двох відтинків, як наприклад у монографіях [5, 10] (рис. 2), де показані графіки функції інтенсивності відмов для електричних та механічних систем.

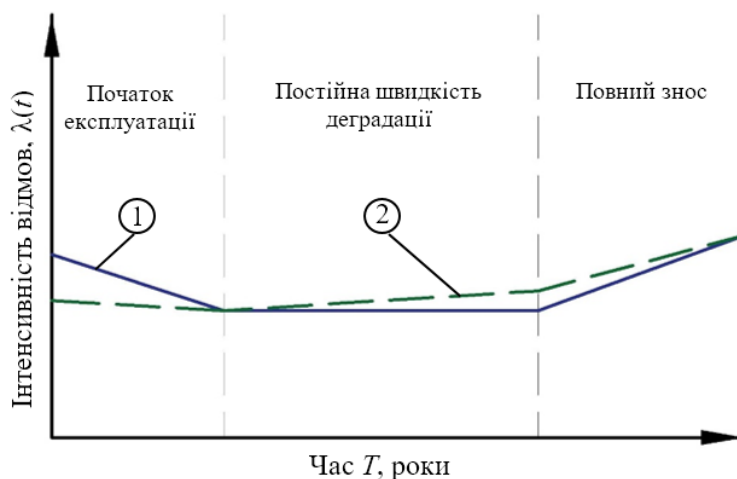


Рис. 2. Функції інтенсивності відмов для електричних та механічних систем [10]:

- 1 – функція інтенсивності відмов для електричних систем;
2 – функція інтенсивності відмов для механічних систем

Очевидно, що параметричні характеристики функції інтенсивності відмов є ключом для коректного реалістичного прогнозу залишкового ресурсу елементів споруд. Нам необхідні теоретичні знання не тільки середньої інтенсивності відмов, а й визначення часу (періоду) життєвого циклу експлуатації, протягом якого інтенсивність відмов є постійною. Для цього є потреба у визначенні не тільки виду функції інтенсивності відмов, а також її числових параметрів. Ці і деякі супутні завдання

дослідження вирішуються за моделлю, наведеною нижче.

Визначення мети та задачі досліджень. Метою роботи, поданої нижче, є теоретичне дослідження інтенсивності відмов (швидкості деградації) у функції часу марковської моделі накопичення пошкоджень. Мотивацією дослідження є принципова важливість цього єдиного керуючого параметра моделі в оцінці ресурсу елемента. З іншого боку, маємо констатувати, що в літературі бракує досліджень зміни параметра інтенсивності

відмов у функції часу експлуатації елементів будівельних конструкцій. Для дослідження скористаємося сучасним підходом у теорії надійності у функції часу (*time-dependent reliability*), так звану «функцією інтенсивності відмов» (*hazard function*) [1-3, 5-12]. Дослідження обмежується залізобетонними елементами мостів.

Основна частина дослідження.

Скористаємося достатньо відомою сьогодні моделлю, теоретичні принципи якої наведено в монографіях [1-3, 8]. Тут ми наведемо детальний виклад отримання формули функції. Введемо необхідні змінні та функції розподілу:

- t – значення випадкової змінної часу;
- $f(t)$ – щільність розподілу часу;
- $f(t)dt$ – ймовірність відмови на відтинку $[t, t + dt]$;
- $F_T(t)$ – інтегральна функція часу на відтинку $[0, t]$

$$F_T = \int_0^t f(\tau)d\tau = P(T \leq t), \quad (1)$$

де T – очікуваний час життєвого циклу експлуатації; P – імовірність;

- $R(t)$ – функція надійності – імовірність того, що *не відбудеться відмова* на відтинку $[0, t]$:

$$R_T = \int_t^\infty f(\tau)d\tau = P(T > t). \quad (2)$$

Визначення надійності протягом життєвого циклу експлуатації обертається навколо ідеї, що час служби елемента, тобто час до відмови (це еквівалентні поняття), є випадковою величиною і її значення описується інтегральною функцією розподілу (1) та щільністю ймовірності життєвого циклу експлуатації в термінах часу:

$$f(t) = \frac{d}{dt}[F_T(t)]. \quad (3)$$

Очікуваний час життєвого циклу T виражається як інтеграл від функції надійності [3, 12]:

$$T = \int_0^\infty \tau f(\tau)d\tau = \int_0^\infty R(t)dt. \quad (4)$$

Тут, у залежності (4), другий інтеграл отримано шляхом інтегрування першого по частинах.

Інтенсивність відмов є мірою того, як імовірність відмови змінюється в залежності від часу. Імовірність відмови в будь-якому заданому інтервалі $[t, t+\delta t]$ є ймовірність того, що час життєвого циклу T міститься в заданому інтервалі

$$P(t < T \leq t + \delta t) = F(t + \delta t) - F(t) = R(t) - R(t + \delta t). \quad (5)$$

Зауважимо, що вираз $[R(t_1) - R(t_2)]$ є еквівалентом $[F(t_2) - F(t_1)]$.

Аналітично параметр умовної ймовірності $\lambda(t)$ відмови може бути інтерпретованим як миттєва частота відмов

$$\lambda(t) \cdot \delta t \approx P(T \leq t + \delta t | T > t). \quad (6)$$

Таким чином, функція інтенсивності відмов подається як відношення ймовірності відмови на відтинку $[t, t+\delta t]$ до ймовірності того, що *не відбудеться відмова* на відтинку $[0, t]$:

$$\lambda(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \delta t) + \delta t}{\delta t P(T > t)} = \frac{f(t)}{R_T(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (7)$$

З викладеного можна бачити, що чотири функції $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ та $\lambda(t)$, які залучаються до визначення інтенсивності відмов, аналітично зв'язані між собою. Три з цих типових співвідношень наводяться нижче.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R_T(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (8)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d[1 - R(t)]}{dt} = -R'(t). \quad (9)$$

$$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d \ln R(t)}{dt}. \quad (10)$$

Аналізуються функції розподілу часу служби, якими можливо подати функцію інтенсивності відмов, адекватну історичним даним експлуатації залізобетонних мостів України. Для аналізу прийнято три типи розподілів: нормальний, логістичний та Вейбулла (табл. 1). Нормальний та логістичний закони розподілу добре відомі в теорії споруд, традиційно застосовуються в аналізі надійності будівельних конструкцій. Що стосується закону розподілу Вейбулла, то він, як правило,

застосовується для специфічних задач теорії ризиків – задачі розбудови функції інтенсивності відмов у тому числі [3, 7].

Вважається, що найбільш адекватним розподілом часу очікування в кожному стані, який дає можливість включити до розгляду ефекти природного старіння елемента, є саме розподіл Вейбулла. Інтегральна функція двопараметричного розподілу Вейбулла задається виразом

$$F(t) = 1 - \exp[-(\Psi t)^\varphi] \quad (11)$$

і щільність імовірності (диференціальна функція розподілу) – виразом

$$f(t) = \Psi \varphi (\Psi t)^{\varphi-1} \exp[-(\Psi t)^\varphi], \quad (12)$$

де Ψ – коефіцієнт масштабу, $\Psi > 0$;

φ – коефіцієнт форми; $\varphi > 1$ – випадок зростання інтенсивності відмов з часом.

Коефіцієнти визначаються через середні значення μ та середньоквадратичне відхилення σ .

Внесемо залежності (11) та (12) у формулу (7) і отримаємо функцію інтенсивності відмов, у якій час очікування подано розподілом Вейбулла

$$\lambda_w(t) = \frac{\Psi \varphi (\Psi t)^{\varphi-1} \exp(-\Psi t)^\varphi}{\exp(-\Psi t)^\varphi} = \Psi \varphi (\Psi t)^{\varphi-1}. \quad (13)$$

Звід моделей, що розглядаються, наведено в табл. 1.

Порівняльний аналіз моделей (14) – (16) показав, що дві з них – з нормальним розподілом часу (формула (14)) та розподілом Вейбулла (формула (16)) є досить близькими за параметром інтенсивності відмови на відтинку часу [0 – 50] років. (Вид кривих «інтенсивність відмови – час» показано на рис. 3, 4).

Порівняння моделей (14) і (16) між собою приводить до висновку, що модель за нормальним розподілом часу є більш реалістичною, має кращу збіжність з натурними даними статистичного аналізу історії експлуатації автодорожніх мостів України.

Модель за логістичним розподілом дає гірші результати, як видно з рис. 3, 4 і табл. 2.

Таблиця 1

Моделі визначення інтенсивності відмов

Тип розподілу	Модель визначення інтенсивності відмов
Нормальний	$\lambda_{\text{norm}}(t) = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt} \quad (14)$
Логістичний	$\lambda_{\text{logis}}(t) = \frac{1}{\sigma \left(1 + \exp\left(\frac{-(t-\mu)}{\sigma}\right)\right)} \quad (15)$
Вейбулла	$\lambda_{\text{w}}(t) = \psi\phi(\psi t)^{\phi-1} \quad (16)$

Таблиця 2

Порівняння результатів обчислення інтенсивності відмов з отриманими при статистичному аналізі [4] натурними даними

Натурні дані	Нормальний розподіл		Логістичний розподіл		Розподіл Вейбулла	
	Інтенсивність	Відхилення	Інтенсивність	Відхилення	Інтенсивність	Відхилення
0,028	0,015	46	0,014	50	0,028	0
0,030	0,03	0	0,022	27	0,039	-30
0,036	0,039	-8	0,025	31	0,044	-22
0,042	0,044	-5	0,028	33	0,048	-14

Висновки. Виконане теоретичне дослідження інтенсивності відмов (швидкості деградації) у функції часу марковської моделі накопичення пошкоджень дає можливість уточнення прогнозу життєвого циклу експлуатації. Прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних елементів мостів за встановленими інтенсивностями відмов дасть більш реалістичні результати.

Прогнозування життєвого циклу із застосуванням моделі інтенсивності відмов привносить у марковську модель історичний досвід експлуатації мостів.

Дослідження нашої роботи, що базується на натурних даних з експлуатації залізобетонних мостів легко узагальнюється на всі типи будівельних конструкцій.

Цим дослідженням доведено, що крива інтенсивності відмов протягом життєвого циклу монотонно зростає, у ній немає відтинку «пристосування елемента».

Ця робота була виконана під керівництвом д-ра техн. наук, професора Лантуха-Лященко А. І. Висловлюю йому мою щирю подяку.

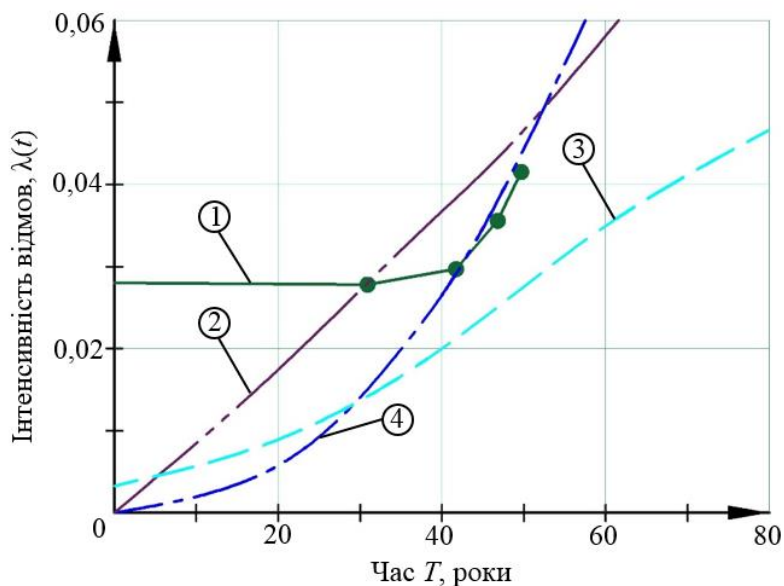


Рис. 3. Криві «інтенсивність відмови – час»:

- 1 – за натурними даними $\lambda T(t)$;
- 2 – за функцією Вейбулла $\lambda w(t)$ розподілу часу;
- 3 – за логістичною функцією $\lambda \logis(t)$ розподілу часу;
- 4 – за нормальною функцією $\lambda \text{norm}(t)$ розподілу часу

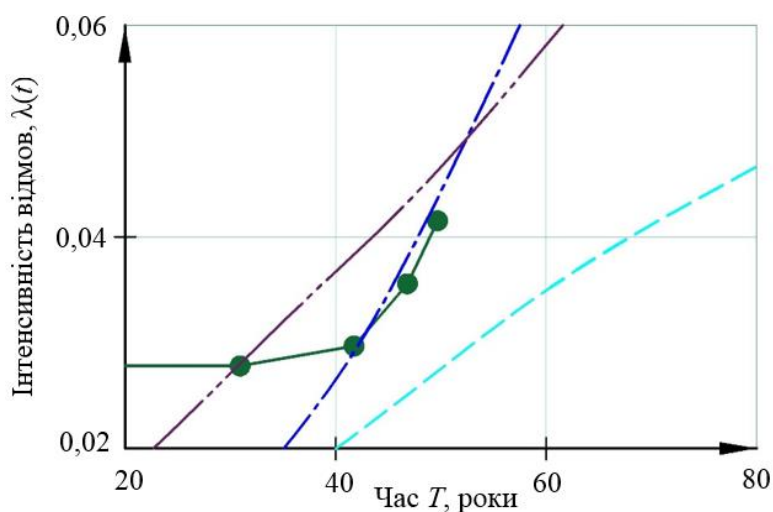


Рис. 4. Криві «інтенсивність відмови – час» на відтинку $t = 20-80$ та $\lambda = 0,02-0,06$

Список використаних джерел

1. Болотин, В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1971. – 255 с.
2. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

3. Вентцель, Е. С. Исследование операций [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
4. Давиденко, О. О. Моніторинг безпечної експлуатації автодорожніх мостів України [Текст] / О.О. Давиденко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 7. – С. 4–12.
5. Alfredo Hua-Sing Ang, Wilson H. Tang. Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, Risk and Reliability. Volume II [Text] / John Wiley and Sons, New York. 1984. – 574 p.
6. Enright, M.P. Frangopol, D.M. Failure Time Prediction of Deteriorating Fail-Safe Structures [Text] / Enright, M.P. Frangopol, D.M. // Journal of Structural Engineering. – 1998. – №124(12) – P.1448-1457.
7. Leemis, L.M. Reliability, Probabilistic Models and Statistical Methods [Text] /Prentice Hall, NJ. 1995. – 288 p.
8. Melchers, R.E. Structural Reliability Analyses and Prediction [Text] / Second Edition. John Wiley & Sons, New York. – 1999. – 437 p.
9. NG, S-K., Moses F. Prediction of bridge service life using time-dependent reliability analysis [Text] / NG, S-K., Moses F. // Bridge management 3. Inspection, maintenance and repair. Papers presented at the third international conference on bridge management, university of surrey, Guildford, UK, 14-17 april. – 1996. – P. 26-33.
10. Patev, R.C. Introduction to Engineering Reliability [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.palisade.com/downloads/pdf/EngineeringReliabilityConcepts.pdf>.
11. Mauricio Sánchez-Silva, Georgia-Ann Klutke. Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems [Text] / Springer Series in Reliability Engineering. – 2016. – 355 p.
12. Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J. Structural Reliability Theory and Its Applications [Text] / Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 1982. – 268 p.

Давиденко Олександр Олександрович, аспірант, асистент кафедри мостів та тунелів Національного транспортного університету. Тел. (050) 471-33-99. E-mail: aleksandros.davydenko@gmail.com. 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: aleksandros.davydenko@gmail.com. orcid.org/0000-0003-0176-3256.

Стаття прийнята 25.02.2017 р.

УДК 666.974.6

ВПЛИВ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ДОБАВОК НА ЕФЕКТИВНУ В'ЯЗКІСТЬ МЕХАНОАКТИВОВАНИХ ЦЕМЕНТОВМІСНИХ СУСПЕНЗІЙ

Д-р техн. наук І. В. Барабаш, канд. техн. наук Л. М. Ксьоншкевич,
асп. Д. П. Гаращенко (ОДАБА)

ВЛИЯНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДОБАВОК НА ЭФФЕКТИВНУЮ ВЯЗКОСТЬ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТОСОДЕРЖАЩИХ СУСПЕНЗИЙ

Д-р техн. наук И. В. Барабаш, канд. техн. наук Л. Н. Ксёншкевич,
асп. Д. П. Гаращенко (ОГАСА)

THE INFLUENCE OF MULTICOMPONENT ADDITIVES ON EFFECTIVE VISCOSITY OF THE MECHANICALLY ACTIVATED CEMENT SUSPENSIONS

Doct. of techn. Sciences, professor I.V. Barabash, cand. of techn. sciences, associate professor L.M. Ksenschkevich, Graduate st. D.P. Harashchenko

У статті розглядаються питання впливу рецептурних факторів (мікрокремнезем, суперпластифікатор Супер ПК, поліпропіленова фібра) на зміну ефективної в'язкості механоактивованих цементовмісних суспензій, що використовуються в технології виготовлення самоущільнюваних бетонних сумішей. Виявлено синергетичний ефект зниження в'язкості цементовмісних суспензій при їх активації у швидкісних змішувачах турбулентного типу при наявності Супер ПК. Оптимізовані режими механоактивації суспензій, що забезпечують максимальне зниження їх ефективної в'язкості.

Ключові слова: механоактивація, органо-мінеральна добавка, мікрокремнезем, портландцемент, ефективна в'язкість, швидкісне змішування, поліпропіленова фібра, синергізм.

В статье рассматриваются вопросы влияния рецептурных факторов (микрокремнезем, суперпластификатор Супер ПК, полипропиленовая фибра) на изменение эффективной вязкости механоактивированных цементосодержащих суспензий, используемых в технологии изготовления самоуплотняющихся бетонных смесей. Выявлен синергетический эффект снижения вязкости цементосодержащих суспензий при активации их в скоростных смесителях турбулентного типа в присутствии Супер ПК. Оптимизированы режимы механоактивации суспензий, обеспечивающих максимальное снижение их эффективной вязкости.

Ключевые слова: механоактивация, органо-минеральная добавка, микрокремнезем, портландцемент, эффективная вязкость, скоростное смешение, полипропиленовая фибра, синергизм.

The questions of influence of prescription factors (microsilica, superplasticizer Super PK, polypropylene fiber) on changing of effective viscosity mechanical activated cement containing suspensions that are using in technology of producing self-sealing concrete mixture are consider. Synergistic effect of decreasing of viscosity of cement containing suspensions during activating in

speeding mixture of turbulence type with Super PK was identify. Modes of mechanical activated suspensions provided decline of effective viscosity was optimize.

Key words: *mechanical activation, organomineral additive, microsilica, Portland cement, effective viscosity, high-speed mixing, synergy.*

Вступ. Самоущільнювані (безвібраційні) бетонні суміші все частіше застосовуються при бетонуванні залізобетонних конструкцій, особливо тонкостінних і густоармованих [1, 2]. Основний внесок в одержання самоущільнюваних сумішей належить полікарбоксилату – високоефективній полімерній добавці. Неодмінними умовами одержання самоущільнюваних сумішей є використання в них поліфракційних заповнювачів та ультрадисперсного наповнювача, наприклад мікрокремнезему. Посилення ролі мінеральних та органічних компонентів можливе за рахунок їх механоактивації в складі суспензії у швидкісних змішувачах оригінальної конструкції [3, 4].

Нагальна необхідність отримання самоущільнюваних бетонних сумішей на базі портландцементу та рядового гранітного щебеню змушує шукати, нарівні з ремонтними, нові технологічні прийоми, зокрема застосування роздільної технології приготування бетонної суміші з використанням швидкісних змішувачів. Ця технологія дасть змогу отримати високотехнологічні цементовмісні суспензії зниженої в'язкості, які забезпечують підвищену легкоукладальність сумішей при менших витратах води замішування [3-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботами [7, 8] встановлено, що використання мікрокремнезему, як добавки до портландцементу, дає можливість регулювати як легкоукладальність суміші, так і процеси структуроутворення цементного каменю і бетону на його основі [9].

Посилюють роль мікрокремнезему у формуванні структури цементного каменю поверхнево-активні речовини та добавка поліпропіленової фібри. Уведення

поліпропіленової фібри дає можливість цілеспрямовано регулювати властивості бетону, підвищуючи його тріщиностійкість, стійкість до змінного зволоження і висушування, заморожування та відтавання [10, 11].

Визначення мети та задач досліджень. Мета – дослідити вплив режимів механоактивації, концентрації мікрокремнезему, суперпластифікатора Супер ПК та поліпропіленової фібри на зміну ефективної в'язкості суспензій в'язучого. Задача досліджень – отримати синергетичний ефект зниження в'язкості цементовмісних суспензій з добавкою мікрокремнезему при спільній дії на них швидкісного змішування, суперпластифікатора Супер ПК та поліпропіленової фібри.

Основна частина досліджень. Відомо, що найбільш ефективними технологічними впливами на цементні суспензії є ті, які дають змогу досягти граничного руйнування початкової структури системи, що характеризується мінімальним показником її ефективної в'язкості [12]. Одним із шляхів виконання цього завдання є застосування інтенсивних гідродинамічних впливів на суспензії в'язучого у швидкісних змішувачах-активаторах.

Для цього використовувався швидкісний трибозмішувач з кількістю обертів робочого органу змішувача 2800 об/хв.

Для приготування суспензії використовувався портландцемент активністю 48 МПа з питомою поверхнею $S_{\text{пит}} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$, мікрокремнезем (МК) у кількості до 10 % маси портландцементу та поліпропіленова фібра (Ф) кількістю до 1 %. Для пластифікації суміші використовувався суперпластифікатор Супер ПК у кількості від 0 до 1 % маси в'язучого. Час

активації суспензії в експерименті варіювався від 0 до 150 с.

Ефективна в'язкість цементних суспензій визначалася за допомогою ротаційного віскозиметра з коаксіальними циліндрами.

Установлено, що введення в портландцемент МК призводить до збільшення ефективної в'язкості суспензії з 1500 сП (МК= 0 %) до 2900 сП (МК = 10%), тобто майже у 2 рази (рис. 1).

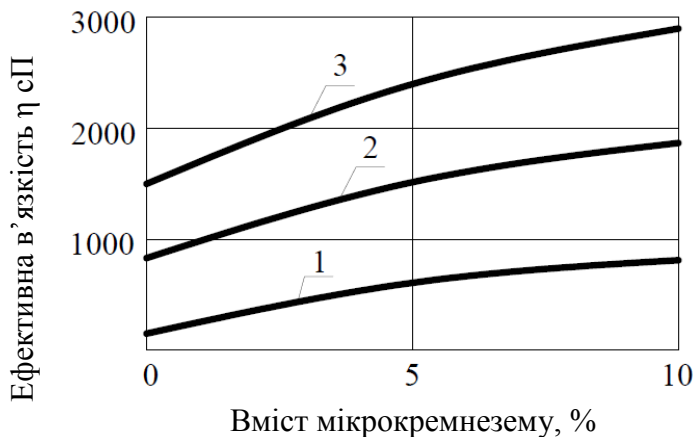


Рис. 1. Вплив мікрокремнезему на зміну ефективної в'язкості суспензій:

1 – Супер ПК = 0 %; 2 – Супер ПК=0,5 %;
3 – Супер ПК=1 %

Уведення в суспензію Супер ПК (1%) викликає зниження ефективної в'язкості. Зокрема для цементної суспензії без добавки МК в'язкість знизилася зі 1500 до 150 сП, тобто майже в 10 раз. Для цементної суспензії із 10%-м вмістом мікрокремнезему ефективна в'язкість суспензії при введенні 1% Супер ПК знизилася з 2900 до 812 сП (рис. 1).

У свою чергу введення в суспензію 1% поліпропіленової фібри викликає збільшення ефективної в'язкості із 1500 до 1741 сП (вміст МК=0%, Супер ПК=0%). Сумісна дія усіх компонентів (вміст МК = 10%, Супер ПК = 1% та $\Phi = 1%$) викликає зниження ефективної в'язкості суспензії з 3130 до 947 сП, тобто майже в 4 рази (рис. 2).

Виявлено вплив часу активації суспензії на зміну ефективної в'язкості цементовмісних суспензій. Оптимальний час змішування суспензій, при якому досягається максимальне зниження її ефективної в'язкості при наявності Супер ПК та поліпропіленової фібри (кількістю до 1%), перебуває в діапазоні 90÷120 с і становить 116 сП (рис. 3).

Якщо для суспензій без мікрокремнезему (при Супер ПК = 1% та $\Phi = 1%$) швидкісне змішування викликає незначне зниження в'язкості – зі 187 до 116 сП, то введення 10% мікрокремнезему викликає зниження ефективної в'язкості з 947 до 155 сП, тобто приблизно в 6 раз.

Результати досліджень ефективної в'язкості суспензій наведено в таблиці.

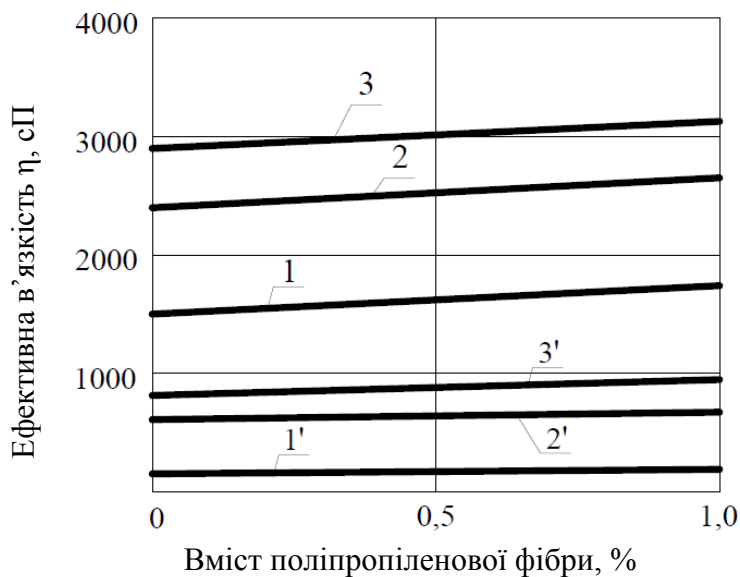


Рис. 2. Вплив вмісту поліпропіленової фібри на зміну ефективної в'язкості суспензій:
 1, 2, 3 – вміст мікрокремнезему 0, 5 та 10%, Супер ПК=0%;
 1', 2', 3' – вміст мікрокремнезему 0, 5 та 10%, Супер ПК=1%

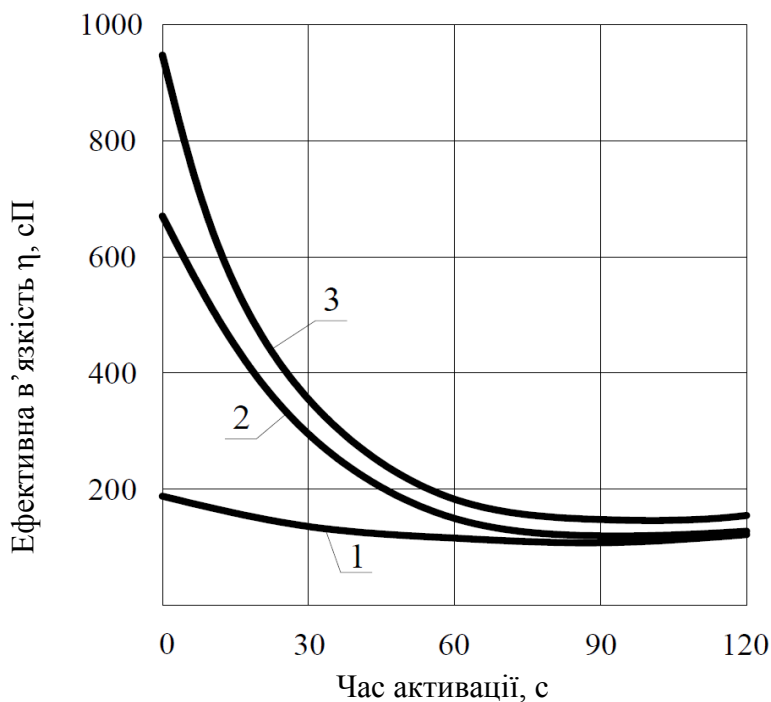


Рис. 3. Вплив режимів механоактивації на зміну ефективної в'язкості суспензій:
 Супер ПК=1 %, $\Phi=1$ %;
 1, 2, 3 – концентрація мікрокремнезему в портландцементі 0, 5 та 10 %

Вплив мікрокремнезему, поліпропіленової фібри, Супер ПК і часу змішування на зміну η суспензії

№ п/п	ПЦ, %	МК, %	Супер ПК, %	Ф, %	Час швидкісного змішування суспензій, с						
					0	30	60	90	120	150	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	100	0	0	0	1500	504	255	191	175	198	
2	95	5			2400	1049	692	623	680	747	
3	90	10			2900	1688	1437	1425	1459	1493	
4	100	0	0,5		831	281	143	107	96	112	
5	95	5			1515	599	371	337	357	103	
6	90	10			1869	951	752	742	751	787	
7	100	0	1,0		150	58	30	21	19	24	
8	95	5			608	149	47	35	42	51	
9	90	10			812	214	63	45	58	66	
10	100	0	0		1,0	1741	703	404	358	348	371
11	95	5				2653	1275	890	822	850	881
12	90	10				3130	1920	1694	1673	1703	1734
13	100	0	0,5			1187	380	188	153	147	156
14	95	5				1697	804	528	484	498	509
15	90	10				2019	1155	913	871	883	899
16	100	0	1,0			187	137	122	108	116	122
17	95	5				671	295	150	121	128	137
18	90	10				947	355	183	148	155	166

Загальний аналіз експериментальних даних свідчить про вплив на ефективну в'язкість суспензії як часу швидкісного змішування, так і вмісту мікрокремнезему, поліпропіленової фібри та суперпластифікатора Супер ПК.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Установлено, що введення до цементовмісних суспензій суперпластифікатора Супер ПК супроводжується значним (до 10 разів) зниженням ефективної в'язкості. У свою чергу введення в суспензію поліпропіленової фібри до 1 % та мікрокремнезему призводить до збільшення ефективної в'язкості.

Активация цементних суспензій з добавкою мікрокремнезему до 10 % при наявності Супер ПК та поліпропіленової фібри в кількості 1 % приводить до значного синергетичного ефекту зниження ефективної в'язкості, що дасть змогу отримувати бетонні суміші з підвищеною легкоукладальністю.

Метою подальших досліджень є вивчення фізико-механічних характеристик цементного каменю на механоактивованому в'язучому з добавкою мікрокремнезему, поліпропіленової фібри та пластифікатора Супер ПК.

Список використаних джерел

1. Базанов, С. М. Самоуплотняющийся бетон – эффективный инструмент в решении задач строительства [Электронный ресурс] / С.М. Базанов, М.В. Торопова. – Режим доступа: //www.allbeton.ru.

2. Калашников, В. И. Самоуплотняющийся высокопрочный бетон [Текст] / В.И. Калашников; под общ. ред. А. Ушерова-Маршака // Современные бетоны. – Запорожье, 2007. – С. 30-40.
3. Барабаш, І. В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин [Текст]: навч. посібник / І.В. Барабаш. – Одеса: Астропрінт, 2002. – 100 с.
4. Федоркин, С. И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов [Текст] / С.И. Федоркин. – Симферополь: Таврия, 1997. – 180 с.
5. Барабаш, І. В. Механизмы организации структуры механоактивированных грубодисперсных систем [Текст] / И.В. Барабаш, В.Н. Выровой. // В зб.: Композиційні матеріали для будівництва: Вісник ДДАБА. – Макіївка, 2000. – № 2 (22). – С. 12-15.
6. Соломатов, В. И. Пути активации наполнителей композиционных материалов [Текст] / В.И. Соломатов, Л.И. Дворкин, С.М. Чудновский // Изв. вузов. Стр-во и арх.-ра. – 1987. – № 1. – С. 60-63.
7. Баженов, Ю. М. Технология бетона [Текст] / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АВС, 2003. – 500 с.
8. Формирование структуры высокопрочных бетонов [Текст] / Р.Ф. Рунова, И.И. Руденко, В.В. Троян [та ін.] // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2008. – №29. – С. 91-97.
9. Батраков, В. Г. Эффективность применения ультрадисперсных отходов ферросплавного производства [Текст] / В.Г. Батраков, С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1989. – №8. – С.24-25.
10. Рабинович, Ф. Н. Дисперсноармированные бетоны [Текст] / Ф.Н. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1989. – 177 с.
11. Рабинович, Ф. Н. Об уровнях дисперсного армирования бетонов [Текст] / Ф.Н. Рабинович // Изв. вузов. Строительство. – 1981. – №11. – С. 30-36.
12. Урьев, Н. Б. Коллоидные цементные растворы [Текст] / Н. Б. Урьев, И. С. Дубинин. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ие, 1980. – 192 с.

Барабаш Іван Васильович, д-р техн. наук, професор кафедри міського будівництва та господарства Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Ксьоншкевич Любов Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри міського будівництва та господарства Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (066)917-06-88. E-mail: wl-ksm@mail.ru.

Гарашенко Дарина Павлівна, аспірант кафедри міського будівництва та господарства Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Barabash I. V., Dr., Prof., Department of Urban Development and Municipal Engineering Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Ksenshkevich L. N., Cand. Sc., Assistant Prof. Department of Urban Development and Municipal Engineering Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (066)917-06-88. E-mail: wl-ksm@mail.ru.

Narashchenko D.P., Graduate st. Department of Urban Development and Municipal Engineering Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Стаття прийнята 27.02.2017 р.

УДК 656.025.4

ФОРМУВАННЯ МЕТОДУ ВИБОРУ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ РОБОТИ В СХЕМАХ РОЗВЕЗЕННЯ ТАРНО-ШТУЧНИХ ВАНТАЖІВ

Д-р техн. наук В. К. Доля, канд. техн. наук Є. І. Куш,
асп. В. С. Скрипін, І. Ю. Власов (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДА ВЫБОРА ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАБОТЫ В СХЕМАХ РАЗВОЗКИ ТАРНО-ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ

Д-р техн. наук В. К. Доля, канд. техн. наук Е. И. Куш,
асп. В. С. Скрыпин, И. Ю. Власов (ХНУГХ им. А. М. Бекетова)

FORMATION OF THE METHOD FOR SELECTION OF VEHICLES LOAD CAPACITY TO WORK WITH SCHEMES OF CONVEYING UNITIZED CARGO

Doctor of science V. Dolia, Ph.D. Y. Kush, PhD student V. Skrypyn, I. Vlasov

У статті проведено дослідження, спрямоване на формування методу вибору вантажопідйомності транспортних засобів для роботи в схемах розвезення тарно-штучних вантажів. Для цього було здійснено моделювання процесу розвезення тарно-штучних вантажів пунктами збуту, визначено залежності зміни транспортних витрат від параметрів процесу транспортування, виявлено закономірності зміни загальних транспортних витрат від вантажопідйомності транспортних засобів і обсягів завезення, визначено і математично формалізовано залежність оптимальної вантажопідйомності транспортного засобу від обсягу завезення до пункту збуту.

Ключові слова: вантажопідйомність, тарно-штучний вантаж, розвізний процес, транспортні витрати, математична модель, моделювання.

В статье проведено исследование, направленное на формирование метода выбора грузоподъемности транспортных средств для работы в схемах развозки тарно-штучных грузов. Для этого проведено моделирование процесса развозки тарно-штучных грузов пунктами сбыта, определены зависимости изменения транспортных расходов от параметров процесса транспортировки, выявлены закономерности изменения общих транспортных расходов от грузоподъемности транспортных средств и объемов завоза, определены и математически формализованы зависимость оптимальной грузоподъемности транспортного средства от объема завоза в пункт сбыта.

Ключевые слова: грузоподъемность, тарно-штучный груз, развозочный процесс, транспортные расходы, математическая модель, моделирование.

The article is devoted to the research of the method for selection of vehicles load capacity to work with schemes of conveying unitized cargo. The first stage was to carry out simulation of conveying unitized cargo at distribution points based on the generated input data and constraints. After that, the dependences of changes in transportation costs depending on the transportation process parameters of unitized cargo in a simulated network have been identified. The next step was to identify patterns of change in the total transport costs by vehicles load capacity and delivery volumes. On the basis of the results obtained, the dependence of the optimum load capacity of the vehicle on the scope of delivery at the sales point was determined. A mathematical model of

dependence of optimum load capacity of the vehicle on the scope of delivery in the sales point has been obtained. Statistical evaluation results indicate that it has a sufficiently high information capacity and can be used in practical calculations.

Keywords: *load capacity, unitized cargo, conveying, transportation costs, mathematical model, simulation.*

Вступ. Одним із критеріїв ефективності процесу перевезення вантажів є повне задоволення потреб замовників транспортної послуги з рівнем якості, що може бути визначений на основі показників ефективності й оптимальності функціонування.

Під ефективністю процесу перевезення вантажів розуміють відношення результату діяльності цього процесу до витрат, що були понесені на його реалізацію. При цьому управляти дохідною частиною транспортування майже не можливо, отже, підвищення ефективності досягається за рахунок зменшення витрат. Для цього використовують такі підходи, як маршрутизація перевезень, вибір марки транспортного засобу тощо.

Визначення оптимальної вантажопідйомності транспортних засобів для роботи на розвізних маршрутах є важливою науковою задачею, правильне розв'язання якої буде визначати ефективність транспортного процесу. Науковцями розроблено підходи до визначення цього параметра для локальних задач, але питанню вибору оптимальної вантажопідйомності транспортного засобу для роботи в схемах розвезення приділено не достатньо уваги. Тому формування методу вибору вантажопідйомності транспортних засобів для роботи в схемах розвезення тарно-штучних вантажів є завданням цієї роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ефективності використання транспортних засобів важливі для автотранспортних підприємств на різних етапах планування роботи [1]. Особливої уваги заслуговує вирішення проблеми мінімізації фінансових і часових

витрат на перевезення при доставленні тарно-штучних вантажів у містах. Існують різні методи зниження цього виду витрат: вибір оптимального транспортного засобу, організація руху найкоротшим шляхом, розроблення розвізних маршрутів, кооперація перевізників на мережі великого розміру та ін. [2-5].

Як відмічають учені [6-12], одним з найсуттєвіших є підхід до підвищення ефективності перевізного процесу за рахунок вибору оптимального за вантажопідйомністю транспортного засобу для роботи на розвізних маршрутах.

Визначення вантажопідйомності автомобілів є складним завданням і залежить від великої кількості факторів. Науковцями зазначається, що оптимальна вантажопідйомність транспортних засобів здебільшого залежить від характеристик вантажопотоків. Автор [13] стверджує, що основним параметром, який ураховується при визначенні вантажопідйомності, є розмір партії замовлення.

Учені в роботах [1, 6, 14-18] відмічають, що основними факторами, які впливають на вибір вантажного автомобіля, є:

- вид і характер вантажу;
- розмір партії вантажу;
- спосіб здійснення навантажувально-розвантажувальних робіт;
- дорожньо-кліматичні умови й стан під'їздів до навантажувальних і розвантажувальних пунктів;
- швидкість доставлення вантажів.

Згідно з [6] при виборі транспортного засобу виходять з вимоги забезпечення мінімуму витрат, прямо або побічно пов'язаних з доставленням вантажів. До них відносять:

- собівартість перевезення, витрати на навантажувально-розвантажувальні роботи, транспортно-експедиційні операції і дорожню складову;

- можливі кількісні і якісні втрати вантажів у процесі доставлення;

- розмір матеріальних засобів, що перебувають в обороті, і витрати, пов'язані зі зберіганням вантажів;

- витрати на допоміжні засоби, що забезпечують транспортний процес (контейнери, піддони та ін.);

- капіталовкладення в автомобілі, вантажно-розвантажувальні засоби, складське господарство тощо.

Крім того, гарантування безпеки руху з мінімальними витратами також є критерієм оптимальності вантажопідйомності автомобілів [6, 14, 19].

Ученими пропонується визначати цей параметр виходячи з тарифу на перевезення, обсягу завезення, вартості зберігання вантажу в транспортному засобі і на складі [20]:

$$q_{opt} = \sqrt{\frac{f_0 Q + C_b b_0}{C_x}}, \quad (1)$$

де f_0 – тариф на перевезення транспортної партії вантажу, грош. од/відправка;

Q – норма поставки споживачеві, т;

C_b – вартість «зберігання» одиниці вантажу в транспортному засобі, грош. од/доб;

C_x – вартість зберігання одиниці вантажу для споживача, грош. од/доб;

b_0 – постійна, яка визначається методами регресійного аналізу.

Інший науковець визначає оптимальну вантажопідйомність з урахуванням транспортних витрат, планового обсягу надходження вантажу і витрат на зберігання запасу [21]:

$$q_{opt} = \sqrt{\frac{2aT}{b}}, \quad (2)$$

де a – транспортні витрати на перевезення однієї партії товарів, грош. од/т;

T – планований обсяг надходжень по досліджуваній групі товарів, т;

b – витрати на зберігання середнього товарного запасу, грош. од.

Оптимальна вантажопідйомність може бути визначена виходячи з витрат на розміщення замовлення і постачання, середньої потреби, витрат вмісту продукції і дефіциту [22]:

$$q_{opt} = \sqrt{\frac{2KV}{S}} \sqrt{1 + \frac{S}{d}}, \quad (3)$$

де K – накладні витрати, пов'язані з розміщенням замовлення і постачанням партії, грош. од.;

V – середня потреба в продукції, од.;

S – витрати вмісту продукції в одиницю часу, грош. од.;

d – дефіцит, од.

Найбільш важливим фактором, який визначає вибір вантажопідйомності транспортного засобу, як зазначає [6], є партійність перевезень. При організації перевезень необхідно прагнути, щоб вантажопідйомність автомобіля дорівнювала або була більшою від розміру перевезеної партії вантажу. При цьому ученими пропонується визначати оптимальну вантажопідйомність транспортного засобу так:

$$q_{opt} = \sqrt{\frac{1}{b_{noc} t_m} \left(\frac{a_{км} l_g}{\beta} + a_{noc} t_{n-3} \right)}, \quad (4)$$

де l_g – відстань вантажного пробігу, км;

t_{n-3} – витрати підготовчо-заключного часу, год;

t_m – час на навантаження-розвантаження 1 т вантажу, год;

β – коефіцієнт використання пробігу автомобіля;

a_{noc} , $a_{км}$, b_{noc} – регресійні постійні собівартості перевезень.

Існуючі підходи дають змогу визначити оптимальну вантажопідйомність транспортних засобів для роботи на заздалегідь сформованих маршрутах розвезення. У них не враховано взаємозалежність параметрів системи розвезення і вантажопідйомності транспортного засобу. Насправді процес формування розвізних маршрутів і вибору оптимальної вантажопідйомності взаємозалежні. Від того, який обсяг поставки необхідно виконати автомобілем визначеної вантажопідйомності, залежать параметри розвізних маршрутів. І навпаки, визначені параметри маршруту і необхідні обсяги розвезення впливають на вибір оптимальної вантажопідйомності.

Тому формування методу вибору вантажопідйомності транспортних засобів у схемах розвезення тарно-штучних вантажів, який би на системному рівні вирішував задачу вибору раціональної схеми розвезення вантажів і оптимальної вантажопідйомності автомобіля є актуальним.

Визначення мети та задачі дослідження. Проведене дослідження спрямоване на досягнення мети – формування методу вибору вантажопідйомності транспортних засобів для роботи в схемах розвезення тарно-штучних вантажів.

Для досягнення поставленої мети розв'язувалися такі задачі:

- провести моделювання процесу розвезення тарно-штучних вантажів пунктами збуту;
- визначити залежності зміни транспортних витрат від параметрів процесу транспортування;
- виявити закономірності зміни загальних транспортних витрат від вантажопідйомності транспортних засобів і обсягів завезення;
- визначити і математично формалізувати залежність оптимальної

вантажопідйомності транспортного засобу від обсягу завезення до пункту збуту.

Основна частина дослідження.

Вирішення завдання маршрутизації процесу розвезення тарно-штучних вантажів проводилося з використанням розробленої моделі [23], що є програмно реалізованою (рис. 1). Вона дає змогу сформуванню оптимальні маршрути з урахуванням параметрів вантажів, транспортної мережі, взаємного розміщення одержувачів і відправників вантажів, транспортних засобів в умовах оперативного управління перевізним процесом [23].

Для досягнення поставленої мети дослідження на першому етапі було проведено моделювання процесу розвезення тарно-штучних вантажів пунктами збуту в Харкові. Для цього було сформовано такі вхідні дані:

- відправлення вантажів здійснюється з центрального складу по магазинах роздрібною мережі загальною кількістю 40 од.;
- обсяг завезення фіксований для всіх споживачів системи;
- кількість вузлів топологічної карти району розвезення дорівнює 1376 од., місцезнаходження кожного з пунктів збуту і пункту відправлення описані GPS координатами;
- кожна дуга транспортної мережі описана такими параметрами, як довжина, схема організації дорожнього руху, швидкість транспортного потоку по напрямках руху залежно від часу доби (показник швидкості від 15 до 50 км/год.);
- кожне перехрестя описано часовими затримками залежно від виконуваного маневру транспортного засобу;
- у центральному складі зосереджено нескінченний обсяг транспортно-однорідного вантажу;
- час роботи відправника необмежений;
- затримок навантаження не існує;
- час навантаження визначається виходячи з величини завантаження автомобіля;

- час, протягом якого вантаж повинен бути доставлений у пункт збуту, обмежений інтервалом з 6:00 до 22:00 год;
- затримок розвантаження вантажу не має;

- час розвантаження визначається виходячи з обсягу поставки в пункт збуту;
- час початку руху маршрутом – 5:00;
- додатковий час (час на під'їзд до пунктів навантаження-розвантаження) дорівнює 15 хв.

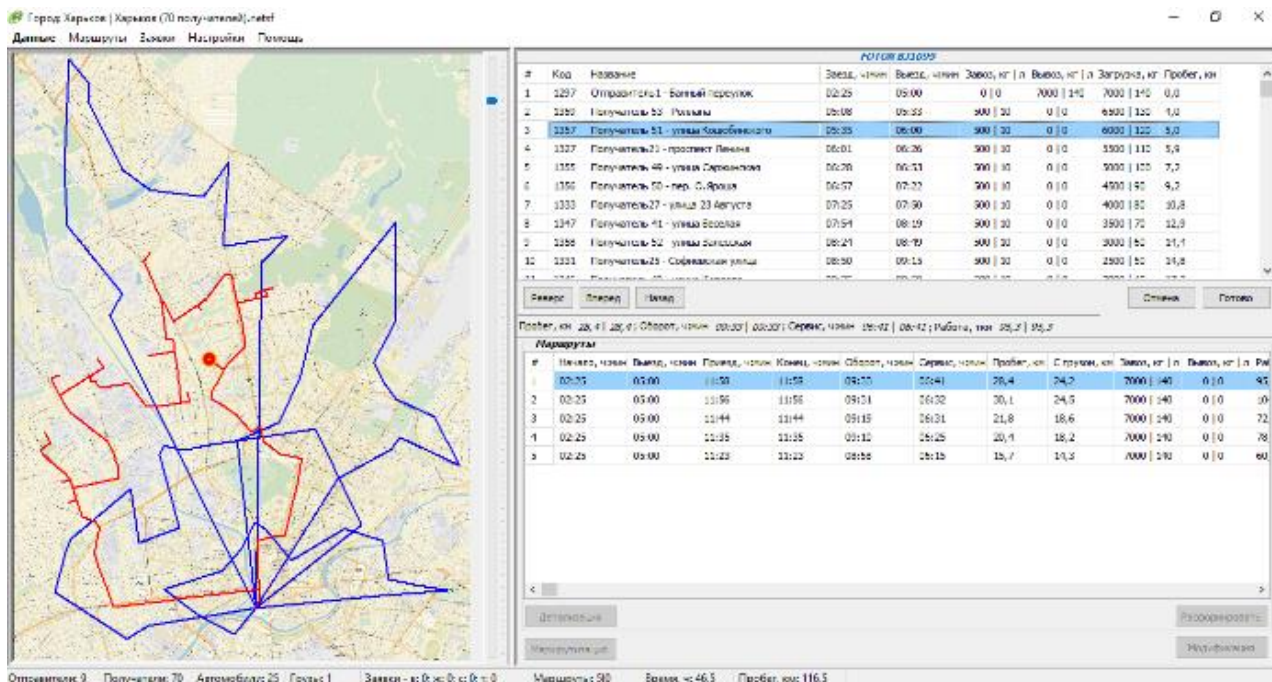


Рис. 1. Фрагмент програми формування розвізних маршрутів

Сформовані обмеження:

- час роботи транспортних засобів на маршрутах не перевищує 10 год;
- обсяг поставки до пункту збуту не повинен перевищувати вантажопідйомності автомобіля;
- кількість пунктів завезення вантажу на маршруті повинна бути більше одного;
- вантажопідйомність автомобіля не перевищує 15 т;
- усі пункти збуту повинні бути обслуговані протягом часу роботи транспорту;
- задоволення потреби споживача у вантажі здійснюється за одну поставку;
- кожна схема доставлення виконується однотипними транспортними засобами;
- коефіцієнт використання пробігу на маршруті більше 0,5.

У результаті моделювання були отримані різні схеми розвезення тарноштучних вантажів у залежності від вантажопідйомності транспортних засобів і обсягу завезення до пункту збуту. Показник вантажопідйомності варіювався від 1 до 14,7 т. Обсяги завезення до пунктів збуту – 0,33; 0,36; 0,4; 0,44; 0,5; 0,57; 0,66; 0,8; 1; 1,33; 2 і 4 т. Кожна схема розвезення була описана технічними (кількість маршрутів розвезення, кількість транспортних засобів, загальний пробіг схемою розвезення, загальний пробіг з вантажем, загальний час роботи в схемі розвезення, загальний час обслуговування схеми розвезення, загальний обсяг перевезення) і економічними (загальні транспортні витрати) параметрами. При цьому показник загальних транспортних витрат розраховувався на

підставі змінних і постійних витрат за розробленою моделлю в роботі [24].

Параметри схем розвезення тарно-штучних вантажів при умові завезення 0,44

т в кожний пункт збуту транспортними засобами різної вантажопідйомності наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри схем розвезення тарно-штучних вантажів при умові завезення 0,44 т в пункт збуту транспортними засобами різної вантажопідйомності

Вантажопідйомність транспортного засобу, т	Кількість маршрутів схеми розвезення, од.	Кількість транспортних засобів, од.	Загальний пробіг схемою розвезення, км	Загальний пробіг з вантажем, км	Загальний час роботи в схемі розвезення, год	Загальний час обслуговування схеми розвезення, год	Загальний обсяг перевезення схемою, т	Загальні транспортні витрати, євро/т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	20	3	238,493	132,147	28,95	9,63	1,76	40,55
1,5	14	3	178,213	107,947	25,05	10,18	1,76	33,85
1,75	14	3	178,213	107,947	25,05	10,18	1,76	35,17
2	10	3	145,643	94,128	22,78	10,32	1,76	29,84
2,5	8	3	129,493	95,171	21,72	10,77	1,76	28,17
3	7	3	118,511	88,428	20,92	10,70	1,76	27,11
3,5	6	3	108,454	84,018	20,25	10,72	1,76	25,86
3,9	5	2	102,315	76,914	19,77	10,65	1,76	25,1
4,3	5	2	103,443	81,545	19,85	10,83	1,76	26,05
4,5	4	2	92,658	77,709	19,60	10,85	1,76	23,52
4,7	4	2	92,658	77,709	19,60	10,85	1,76	23,97
5	4	2	90,586	74,783	19,77	10,82	1,76	23,85
6	4	3	91,663	77,368	20,05	11,40	1,76	25,35
6,65	3	2	85,846	75,089	19,33	11,40	1,76	24,43
7	3	2	85,846	75,089	19,33	11,40	1,76	25,37
7,7	3	2	82,887	72,21	19,37	11,62	1,76	24,50
8,2	3	2	79,489	67,792	19,22	11,53	1,76	24,01
9,25	2	2	77,573	71,29	18,87	11,75	1,76	24,23
10	2	2	77,669	71,386	19,05	11,93	1,76	24,82
12,7	2	2	77,669	71,386	19,05	11,93	1,76	26,57
13,3	2	2	77,669	71,386	19,05	11,93	1,76	27
14,05	2	2	77,669	71,386	19,05	11,93	1,76	27,34
14,7	2	2	77,669	71,386	19,05	11,93	1,76	27,69

У результаті були визначені залежності зміни загальних витрат від вантажопідйомності транспортного засобу й обсягу завезення (рис. 2). Хвилеподібний характер зміни отриманих залежностей пояснюється так: при визначеному обсязі завезення для транспортних засобів різної вантажопідйомності формуються однакові розвізні маршрути, що призводить до збільшення загальних витрат. Наприклад, у

випадку, коли обсяг завезення дорівнює 1,33 т, для транспортних засобів вантажопідйомністю 3; 3,5 і 3,9 т сформовані однакові маршрути через те, що цей параметр обмежує кількість пунктів завезення на маршруті до двох. При цьому загальні транспортні витрати зростають через збільшення питомої витрати палива і вантажопідйомності автомобіля.

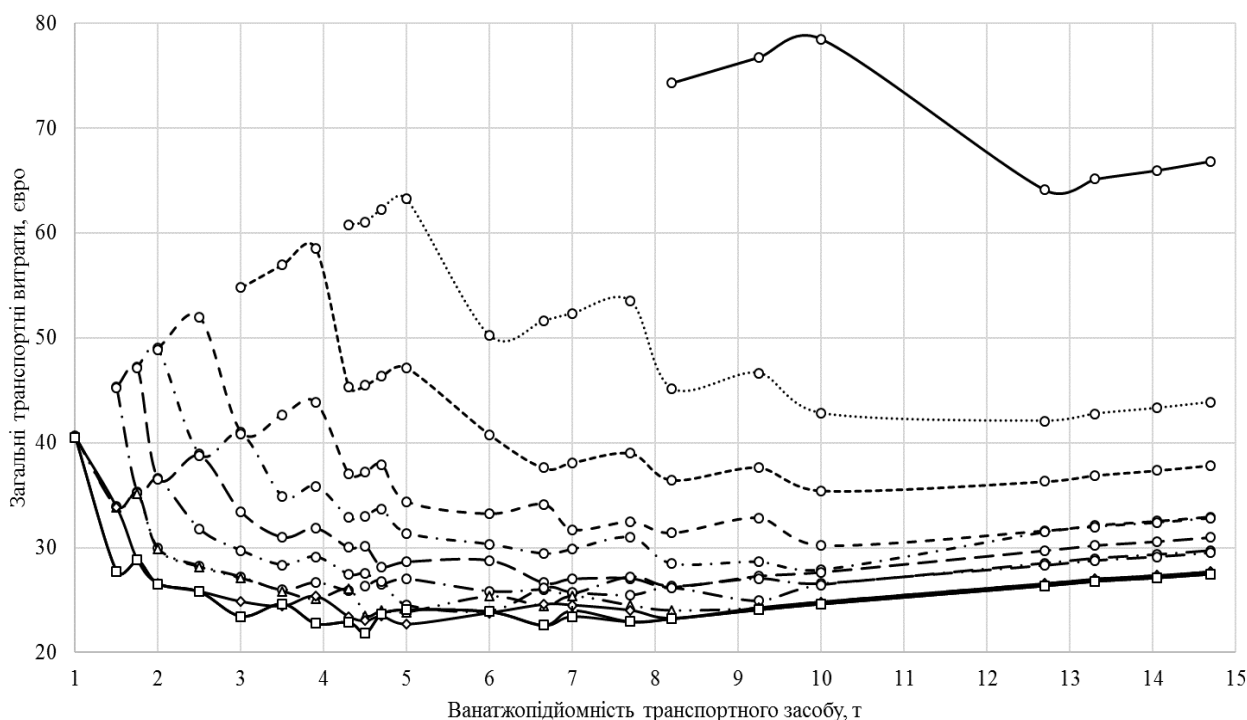


Рис. 2. Залежності зміни загальних транспортних витрат від вантажопідйомності транспортних засобів і обсягів завезення:

—○— 4 т ····○··· 2 т - - - - 1,33 т - ○ - 1 т - ○ - 0,8 т —○— 0,66 т
 —○— 0,57 т —○— 0,5 т —△— 0,44 т —◇— 0,4 т —ж— 0,36 т —□— 0,33 т

Для визначення оптимальної вантажопідйомності транспортного засобу при різних схемах доставлення тарноштучних вантажів пунктами збуту на наступному етапі дослідження було проведено апроксимацію отриманих результатів моделювання. Виявлена залежність наведена на рис. 3.

Кожній вантажопідйомності автомобіля відповідає визначена схема розвізних маршрутів, що відрізняються одна від одної технологічними параметрами. Для кожної схеми розвезення існує оптимальна вантажопідйомність, за якої спостерігається мінімум загальних транспортних витрат.

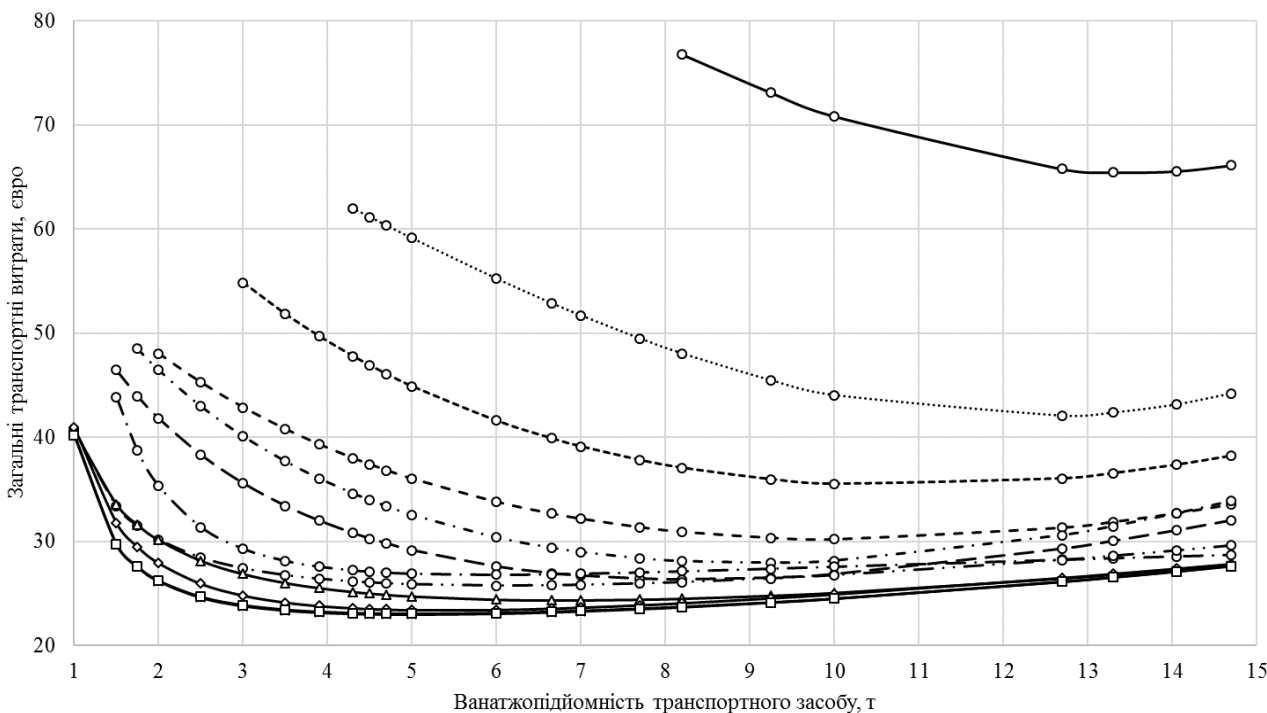


Рис. 3. Залежність зміни загальних транспортних витрат від вантажопідйомності транспортних засобів і обсягів завезення:

—○— 4 т ·····○···· 2 т - - - - -○- - - - - 1,33 т - ○ - 1 т - ○ - 0,8 т —○— 0,66 т
 —○— 0,57 т —○— 0,5 т —△— 0,44 т —◇— 0,4 т —ж— 0,36 т —□— 0,33 т

Математично описати отримані залежності зміни загальних транспортних витрат від вантажопідйомності транспортних засобів за різних обсягів завезення в пункти збуту можна регресійним рівнянням такого виду:

$$B_{mp_i} = a + b \cdot q_n^c + d \cdot q_n^f, \quad (5)$$

де a, b, c, d, f – коефіцієнти регресії (параметри моделі);

q_n – номінальна вантажопідйомність транспортного засобу, т;

i – схема розвезення.

Значення параметрів моделей та їх статистичні характеристики залежно від

параметрів розвезення тарно-штучних вантажів наведені в табл. 2.

Розроблені моделі мають достатньо високу інформаційну спроможність, про що свідчить перевищення розрахованого значення критерію Фішера над табличним. Значення коефіцієнтів множинної кореляції свідчать про достатньо-високий ступінь взаємозв'язку між параметрами, що досліджуються, величини середніх похибок апроксимації містяться в допустимих межах.

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок про наявність оптимальної вантажопідйомності транспортних засобів для обслуговування роздрібною мережі при певних її параметрах (табл. 3).

Таблиця 2

Коефіцієнти регресії і статистичні параметри моделей зміни загальних транспортних витрат залежно від вантажопідйомності транспортних засобів при різних обсягах заванезення в пункти збуту

Обсяг заванезення до пункту збуту, т	Коефіцієнти регресії					Статистичні показники		
						Коефіцієнт кореляції	Середня похибка апроксимації	Критерій Фішера
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>f</i>			
4	108,63	0,0063	3,24	-2,41	1,31	0,873	12,6	7,72
2	77,06	0,497	2,12	-2,61	1,57	0,985	7,6	254,11
1,33	95,83	2,84	1,29	-25,67	0,66	0,973	8,1	179,65
1	69,42	2,02	1,34	-16,2	0,71	0,961	8,5	162,29
0,8	84,93	2,43	1,26	-31,01	0,51	0,972	7,9	263,63
0,66	110,89	6,52	0,94	-64,48	0,34	0,963	7,6	219,69
0,57	89,97	51,59	-1,64	-7,71	-0,07	0,941	7,8	152,47
0,5	23,13	0,03	1,96	17,61	-1,35	0,989	6,9	745,27
0,44	20,06	0,04	1,87	20,53	-1,05	0,982	7,2	498,54
0,4	19,4	0,21	1,36	21,35	-1,42	0,971	7,2	312,75
0,36	21,68	0,02	2,07	18,57	-2,08	0,963	7,5	236,29
0,33	21,83	0,02	2,13	18,38	-2,1	0,968	7,8	258,52

Таблиця 3

Оптимальне значення вантажопідйомності транспортних засобів для різних схем доставлення тарно-штучних вантажів пунктами збуту

Вантажопідйомність транспортного засобу, т	Обсяг заванезення до пункту збуту, т	Загальний обсяг перевезення схемою, т	Кількість транспортних засобів, од.	Кількість маршрутів, од.	Час роботи в схемі розвезення, год	Загальний пробіг схемою розвезення, км	Загальні транспортні витрати, евро/т
13,3	4	160	13	14	124,38	177,346	65,47
12,7	2	80	7	7	64,63	118,371	42,07
10	1,33	53,2	5	6	45,88	108,416	35,53
10	1	40	4	4	36,48	92,65	30,19
9,25	0,8	32	4	4	30,75	90,545	27,93
8,2	0,66	26,4	3	4	26,72	86,107	26,33
6	0,57	22,8	3	4	24,1	92,77	26,78
6	0,5	20	3	4	22,57	86,047	25,74
6,65	0,44	17,6	2	3	11,4	85,846	24,34
5	0,4	16	2	4	19,62	86,088	23,4
5	0,36	14,4	2	4	18,67	91,663	22,96
5	0,33	13,2	2	4	18,67	91,663	23,03

На підставі отриманих результатів моделювання розвізних маршрутів і визначення оптимальної вантажопідйом-

ності транспортних засобів для кожної зі схем доставлення вантажів було отримано залежність, що наведена на рис. 4.

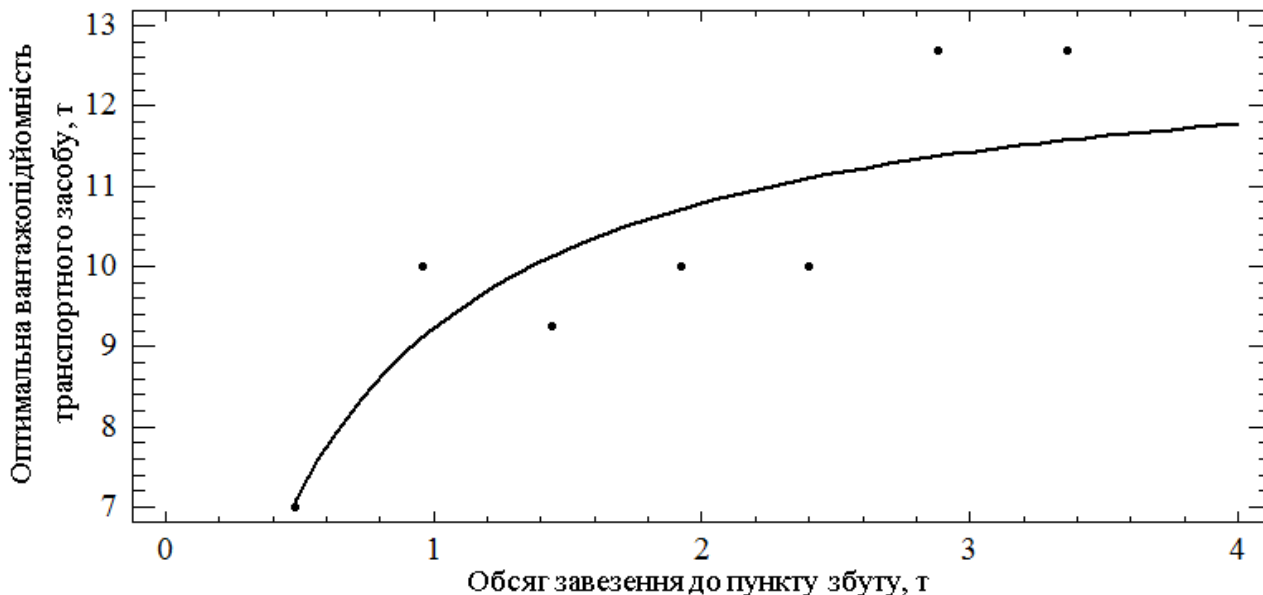


Рис. 4. Залежність оптимальної вантажопідйомності транспортного засобу від обсягу завезення до пункту збуту

Математично описати залежність оптимальної вантажопідйомності транспортного засобу від обсягу завезення до пункту збуту можна такою регресійною моделлю:

$$q_{\text{нoпт}} = \sqrt{g + h \cdot \ln(Q_j)}, \quad (6)$$

де Q_j – обсяг завезення до j -го пункту збуту, т;

g, h – регресійні коефіцієнти, які дорівнюють для даного випадку відповідно 92,78 і 68,05.

Результати статистичної оцінки вказують, що отримана модель має достатньо високу інформаційну спроможність. Про що свідчить розрахункове значення показника Фішера 207,71. Ступінь кореляції дорівнює 0,954. Середня помилка апроксимації складає

7,62 %. Отримана закономірність свідчить, що збільшення оптимальної вантажопідйомності транспортного засобу зі збільшенням обсягу поставки відбувається за нелінійною залежністю.

Наведені результати справедливі для конкретних параметрів завдань на розвезення, що розглянуті в статті. Проте аналіз інших схем розвезення тарноштучних вантажів у містах указує на збереження загальної закономірності зростання оптимальної вантажопідйомності транспортних засобів у залежності від обсягу перевезення. При цьому коефіцієнти рівняння (6) мають різні значення залежно від конкретних умов завдання на перевезення.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Запропонований у роботі метод вибору вантажопідйомності транспортних засобів, на відміну від існуючих,

передбачає системну оптимізацію схеми розвезення тарно-штучних вантажів за параметрами маршрутів руху й автомобілів виходячи з критерію мінімуму загальних транспортних витрат.

Методику застосування запропонованого методу розглянуто на прикладі моделювання процесу розвезення тарно-штучних вантажів у Харкові. У результаті було виявлено, що варіювання вантажопідйомності транспортного засобу з 1 до 14,7 т для роботи в схемах розвезення для випадку, що розглядається в дослідженні, призводить до зміни кількості маршрутів розвезення з 20 до 2. Це супроводжується зміною таких технологічних параметрів, як загальний пробіг транспортних засобів з 238 до 77 км і загальний час роботи в схемі розвезення від 28,95 до 19,05 год. При цьому загальні транспортні витрати змінюються з 40,55 до 27,69 євро в залежності від схеми розвезення.

Проте схеми розвезення можуть відрізнятися кількістю учасників, їх взаємним розміщенням та розміщенням відносно розподільчого центру,

коефіцієнтом непрямої зв'язку, що зумовлені характеристиками транспортної мережі, величиною попиту на продукцію (обсягом замовлення) тощо. Натомість розгляд різних схем розвезення, що мають зазначені відмінності, показав загальну тенденцію щодо зростання оптимальної вантажопідйомності транспортного засобу зі збільшенням обсягу завезення до пунктів роздрібною мережі за критерієм мінімізації витрат системи розвезення. Ця залежність з достатньою точністю може бути формалізована з використанням запропонованої в роботі нелінійної залежності з різними параметрами, що залежать від конкретних характеристик системи розвезення.

Однак при формуванні системи розвезення недостатньо керуватися лише транспортними витратами, бо вони не відбивають результати діяльності логістичної системи в цілому. Тому подальшим етапом дослідження планується обґрунтування параметрів обслуговування роздрібною мережі виходячи з характеру функціонування всіх її учасників.

Список використаних джерел

1. Майборода, М. Е. Грузовые автомобильные перевозки [Текст]: учеб. пособие / М. Е. Майборода, В. В. Бернадский. – 2-е изд. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 442 с.
2. Семенов, Ю. Н. Использование методов моделирования для построения маятниковых маршрутов [Текст] / Ю. Н. Семенов, О. С. Семенова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 3 (109). – С. 136-140.
3. Ergun Ö. Shipper collaboration [Text] / Ö. Ergun, G. Kuyzu, M. W. P. Savelsbergh // Computers & Operations Research. – 2007. – V. 34. – P. 1551-1560.
4. Krajewska M. A. Horizontal cooperation among freight carriers: request allocation and profit sharing [Text] / M. A. Krajewska, H. Kopfer, G. Laporte, S. Ropke, G. Zaccour // Journal of the Operational Research Society. – 2008. – V. 59. – P. 1483-1491.
5. Shchegryaev A. Multi-period cooperative vehicle routing games [Text] / A. Shchegryaev, V. Zakharov. // Contributions to Game Theory and Management, №7 (2014), 349-359.
6. Воркут, А. И. Грузовые автомобильные перевозки [Текст] / А. И. Воркут. – К. : Вища школа, 1986. – 447 с.
7. Афанасьев, Л. Л. Автомобильные перевозки [Текст] / Л. Л. Афанасьев, С. М. Цукерберг. – М.: Транспорт, 1973. – 320 с.

8. Горев, А. Э. Грузовые автомобильные перевозки [Текст]: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / А. Э. Горев. – 5 изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 288 с.
9. Чеботаев, А. А. Специализированные автотранспортные средства: выбор и эффективность применения [Текст] / А. А. Чеботаев. – М.: Транспорт, 1988. – 159 с.
10. Горев, А. Э. Организация автомобильных перевозок и безопасность движения [Текст]: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / А. Э. Горев, Е. М. Олещенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 256 с.
11. Воркут, А. И. Разработка теоретических основ и методов рациональной организации транспортного процесса при автомобильных перевозках партийных грузов [Текст]: дис... д-ра техн. наук: 05.22.10 / А. И. Воркут. – К., 1987. – 299 с.
12. Савин, В. И. Перевозки грузов автомобильным транспортом [Текст] / В. И. Савин. – М.: Дело и сервис, 2002. – 544 с.
13. Горев, А. Э. Грузовые автомобильные перевозки [Текст]: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / А. Э. Горев. – 2-е изд. – М.: Академия, 2004. – 288 с.
14. Вельможин, А. В. Грузовые автомобильные перевозки [Текст]: учебник для вузов / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Куликов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006 – 560 с.
15. Миротин, Л. Б. Логистика. Управление в грузовых транспортно-логистических системах [Текст] / Л. Б. Миротин. – М.: Юристъ, 2002. – 414 с.
16. Ходош, М. С. Грузовые автомобильные перевозки [Текст]: учебник для автотрансп. техникумов / М. С. Ходош. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1986. – 208 с.
17. Горев, А. Э. Грузовые автомобильные перевозки [Текст]: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / А. Э. Горев. – 5-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 288 с.
18. Босняк, М. Г. Вантажні автомобільні перевезення [Текст]: навч. посібник для студентів спеціальності "Організація перевезень і управління на транспорті (автомобільний)" / М. Г. Босняк. – К.: Видавничий Дім "Слово", 2010. – 408 с.
19. Василенко, Т. Є. Підвищення ефективності роботи суб'єктів підприємницької діяльності при перевезенні дрібнопартиїних вантажів автомобільним транспортом [Текст] / Т. Є. Василенко, О. Є. Губін // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2014. – № 1. – С. 28-33.
20. Смехов, А. А. Моделирование параметров логистической системы на фазе распределения [Текст] / А. А. Смехов // Подъемно-транспортная техника и склады. – 1992. – №2. – С. 35-37.
21. Бурмистров, В. Г. Организация торговли непродовольственными товарами [Текст] / В. Г. Бурмистров. – М.: Экономика, 1988. – 304 с.
22. Колпаков, В. М. Методы управления [Текст] / В. М. Колпаков. – К.: МАУП, 1997. – 160 с.
23. Куш, Є. І. Формування розвізних маршрутів тарно-штучних вантажів в містах [Текст] / Є. І. Куш, В. С. Скрипін // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 160. – С. 97-105.
24. Куш, Е. И. Определение затрат на перевозку грузов автомобильным транспортом [Текст] / Е. И. Куш, В. С. Скрыпин // Национальная ассоциация ученых: ежемес. науч. журн. – Екатеринбург: НАУ, 2016. – № 3 (13), ч. 1. – С. 18-20.

Доля Віктор Костянтинівич, д-р техн. наук, завідувач кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова.

Куш Євген Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел.: (057) 707-32-61. E-mail: kush_bush@mail.ru.

Скрипін Василь Сергійович, аспірант кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова.

Власов Ігор Юрійович, студент спеціальності "Логістика" Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова.

Dolia Viktor, doctor of science, head of Transport Systems and Logistics department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Kush Yevhen, Ph.D., associate professor of Transport Systems and Logistics department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, E-mail: kush_bush@mail.ru.

Skrypin Vasyly, PhD student of Transport Systems and Logistics department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Igor Vlasov, student of Transport Systems and Logistics department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Стаття прийнята 27.02.2017 р.

УДК 621.313.33:51

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА АД-906У В РЕЖИМІ ПОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ

Старш. наук. співроб. О. О. Шкурпела (ДП «Завод «Електроважмаш»»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ АД-906У В РЕЖИМЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ

Старш. науч. сотр. О.О. Шкурпела (ГП «Завод «Электротяжмаш»»)

STUDY WORK OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR AD-906U IN FIELD WEAKENING MODE

Senior Research Officer O. Shkurpela

У статті проведено аналіз дослідження роботи асинхронного двигуна АД-906У в режимі послаблення поля з векторною системою керування на математичній моделі у програмному середовищі MATLAB. Наведена кількісна оцінка відхилення величини споживаної потужності асинхронним двигуном при різних способах побудови характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$. Обґрунтований вибір способу побудови характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ для асинхронного двигуна АД-906У в режимі послаблення поля у складі тягового електропривода дизель-поїзда ДЕЛ-02.

Ключові слова: асинхронний двигун, математичне моделювання, режим послаблення поля.

В статье проведен анализ исследования работы асинхронного двигателя АД-906У в режиме ослабления поля с векторной системой управления на математической модели в программной среде MATLAB. Приведена количественная оценка отклонения величины потребляемой мощности асинхронным двигателем при разных способах построения характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$. Обоснован выбор способа построения характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ для асинхронного двигателя АД-906У в режиме ослабления поля в составе тягового электропривода дизель-поезда ДЕЛ-02.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, математическое моделирование, режим ослабления поля.

The article analyzes research of the work asynchronous motor AD-906U in the field weakening mode with vector control system on mathematical model in MATLAB software environment. A quantitative estimation of the deviation of the power by an asynchronous motor is given for different methods of constructing the characteristic $|\psi_R|=f(\omega_R)$. The rationale for choosing of the method for constructing a characteristic $|\psi_R|=f(\omega_R)$ for an asynchronous motor AD-906U in the field weakening mode in the traction electric drive of a diesel train DEL-02.

Keywords: asynchronous motor, mathematical modeling, field weakening.

Вступ. Відомо, що режим послаблення поля в електроприводі застосовують для розширення діапазону регулювання швидкості. При реалізації векторних методів керування асинхронним двигуном це зводиться до активного регулювання величини модуля вектора потокозчеплення ротора асинхронного двигуна $|\psi_R|$. При некоректній зміні $|\psi_R|$ асинхронний двигун не повністю використовується за потужністю, що призводить до зменшення діапазону регулювання швидкості або до виникнення нештатної ситуації.

Аналіз досліджень і публікацій.

Класичний метод формування заданого $|\psi_R|$ в зоні послаблення поля передбачає його зменшення, починаючи з робочої точки, в оберненопропорційній залежності від швидкості обертання ротору двигуна [1]. Це дозволяє реалізувати в системах векторного керування двозонне регулювання частоти обертання аналогічне електроприводу постійного струму. Амплітуда вихідної напруги підтримується при цьому постійною, рівною номінальному значенню [2]. Теоретичною базою вирішення даного питання є дослідження екстремальних характеристик асинхронних електродвигунів при обмежених ресурсах джерел їх живлення [3, 4]. В першій зоні швидкостей (від мінімальної до номінальної) для досягнення максимальної перевантажувальної здатності необхідно підтримувати струм статора двигуна на гранично допустимому рівні, що обмежується перевантажувальною здатністю перетворювача частоти. В другій зоні (послаблення

поля) необхідно підтримувати струм та напругу на рівні, що обмежується потужністю двигуна [5, 6]. Алгоритм формування $|\psi_R|$ ускладнений нелінійними характеристиками асинхронного двигуна.

Метою даної роботи є оцінка та визначення способу побудови характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$, який задовольнятиме вимоги регулювання асинхронним двигуном АД-906У в режимі послаблення поля.

Основна частина дослідження.

Дослідження проведені на розробленій імітаційній моделі в програмному середовищі MATLAB [7].

Зміна частоти обертання ротора тягового двигуна АД-906У відбувається за траєкторією, що визначається умовами експерименту (рис. 1), від номінальної – 800 об/хв до максимальної експлуатаційної частоти обертання ротора, що регламентована технічними умовами на двигун АД-906У – 2790 об/хв.

Стабілізація частоти обертання ротора впродовж 5 с виконана для можливості набору потужності двигуном до рівня номінальної, що дорівнює 230 кВт.

Побудову характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ виконаємо у вигляді полінома 4-го порядку (1) та лінійних функцій (2), (3) (рис. 2).

$$|\Psi_R| = \sum_{j=1}^4 k_j (\omega_R)^j, \quad (1)$$

$$|\Psi_R| = K_1 \omega_R + K_2, \quad (2)$$

$$|\Psi_R| = \max [(K_1 \omega_R + K_2); (K_3 \omega_R + K_4)]. \quad (3)$$

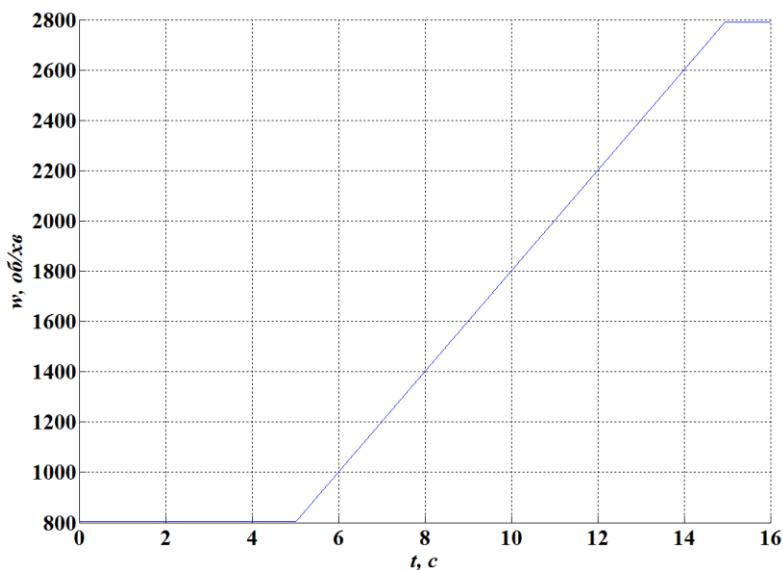


Рис. 1. Траекторія частоти обертання ротора АД-906У

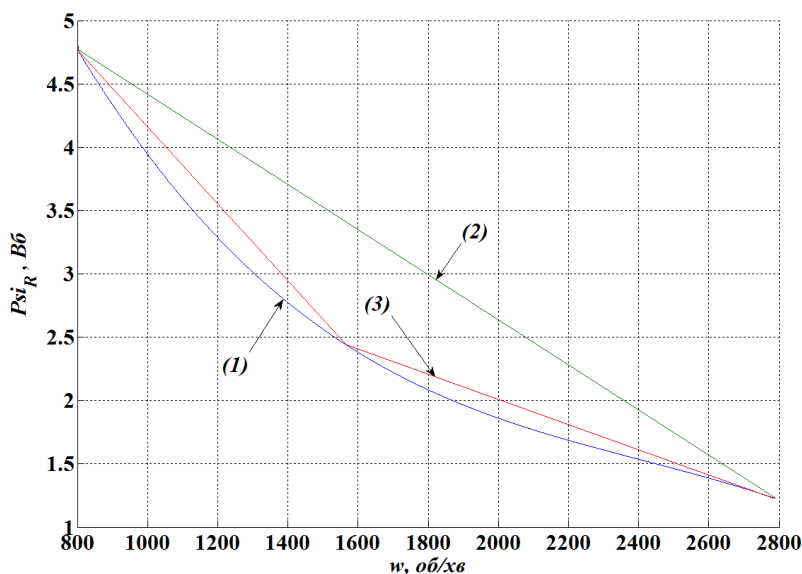


Рис. 2. Вигляд характеристик $|\psi_R|=f(\omega_R)$, заданих способами: 1 – у вигляді полінома 4-го порядку; 2 – лінійною функцією (2); 3 – складеною лінійною функцією (3)

Побудова характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ за допомогою лінійної функції є найпростішою у реалізації, проте призводить до значних відхилень величини потужності двигуна (рис. 3). При заданні характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ у вигляді полінома 4-го порядку такого не відбувається (рис. 4). При роботі АД-906У в зоні послаблення поля було виявлено

зниження величини споживаної потужності до рівня 82,6 % від номінальної.

Аналізуючи перехідний процес електромагнітного моменту (рис. 5), також зафіксовано зниження його величини до 20 % відносно значення при заданні характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ у вигляді полінома 4-го порядку.

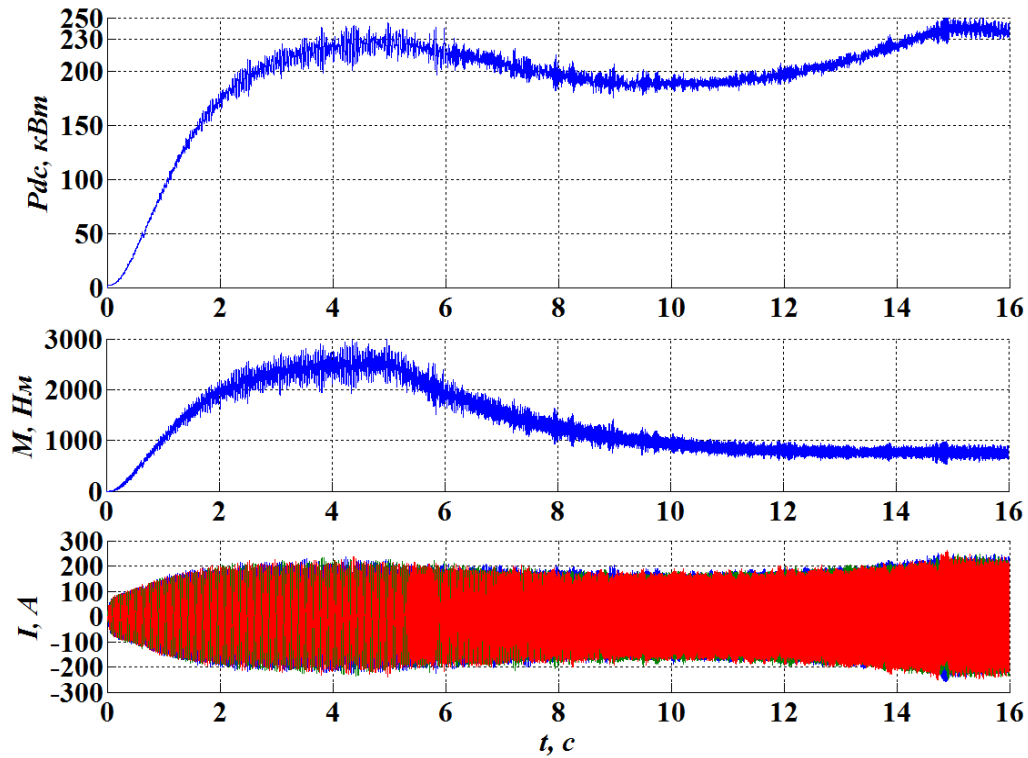


Рис. 3. Перехідний процес АД-906У при заданні характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ лінійною функцією вигляду (2)

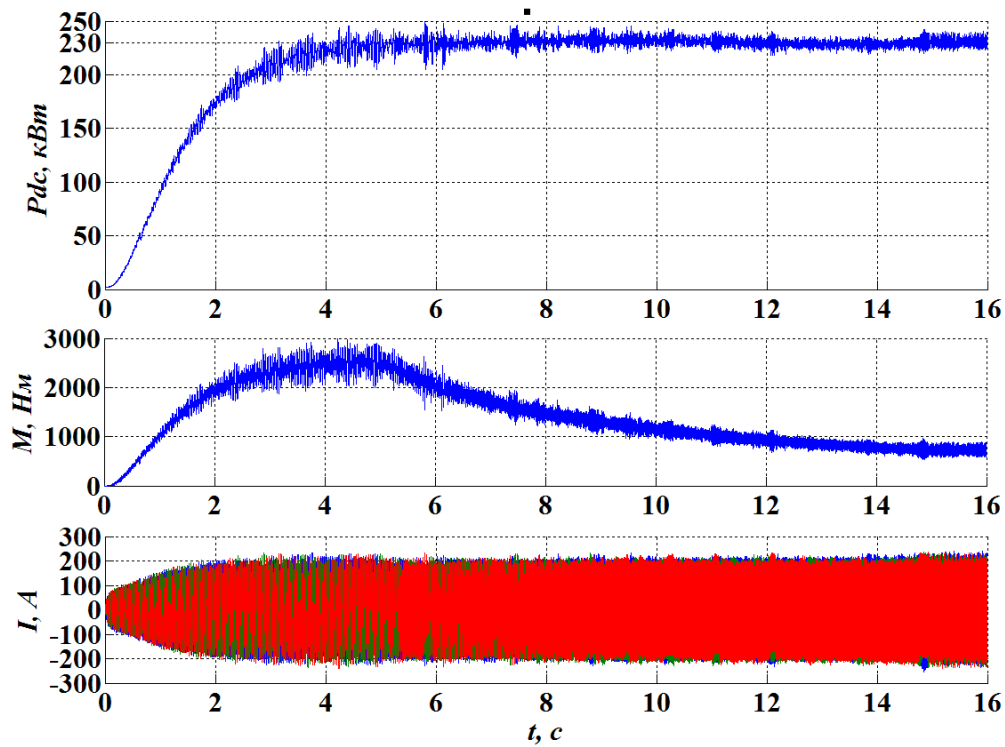


Рис. 4. Перехідний процес АД-906У при заданні характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ у вигляді полінома 4-го порядку

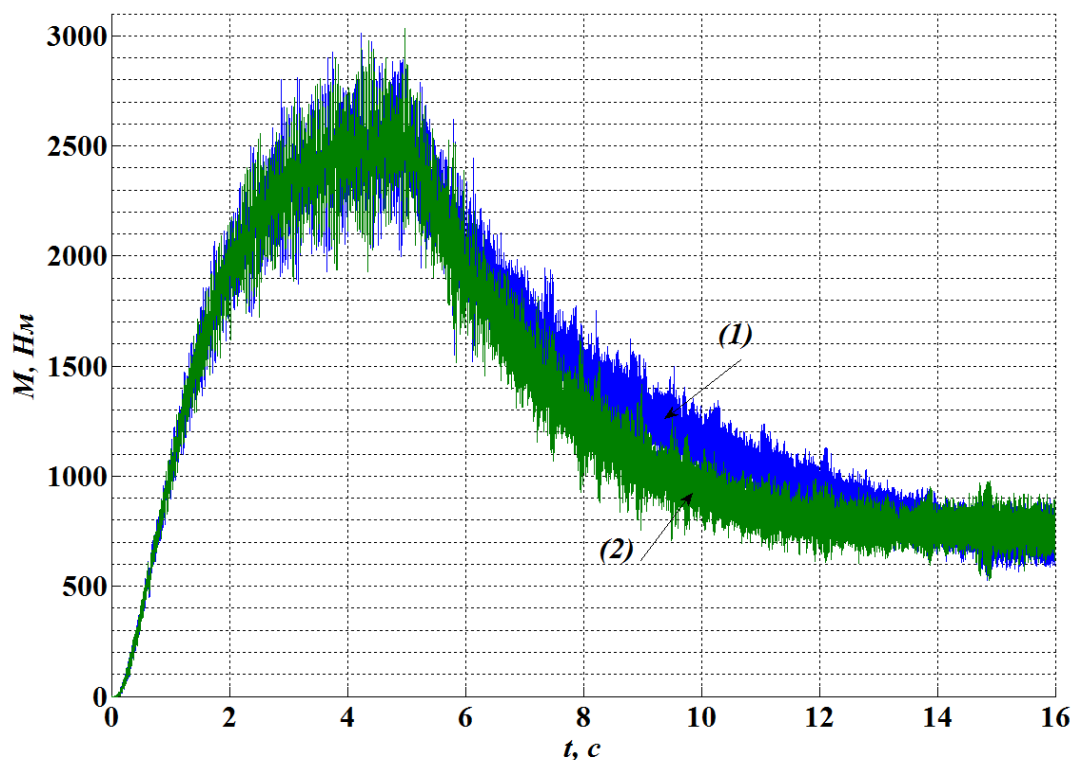


Рис. 5. Перехідний процес електромагнітного моменту з побудовою характеристики

$|\psi_R|=f(\omega_R)$ двома способами:

1 – у вигляді полінома 4-го порядку;

2 – лінійної функції вигляду (2)

Також слід зазначити, що використання лінійної функції вигляду (3), що складається з двох лінійних ділянок характеристики, яка зображена на рис. 2 (спосіб 3), хоч і дозволяє зменшити зниження величини споживаної потужності, але має злам характеристики при переході з першої ділянки до другої, що призводить до виникнення збурень у перехідному процесі. Зниження величини споживаної потужності не перевищують 5 %, проте на ділянці зламу характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ має місце перевантаження асинхронного двигуна АД-906У за потужністю на 4 % (рис. 6).

Висновки. Таким чином, в ході проведеного дослідження виявлено, що вибір способу побудови характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ для точки номінальної потужності має суттєвий вплив на характер протікання перехідних процесів у зоні послаблення поля. Побудова характеристики $|\psi_R|=f(\omega_R)$ за допомогою полінома 4-го порядку забезпечує виконання умови використання повної потужності тяговим двигуном АД-906У у режимі послаблення поля та не призводить до виникнення збурень величини споживаної потужності.

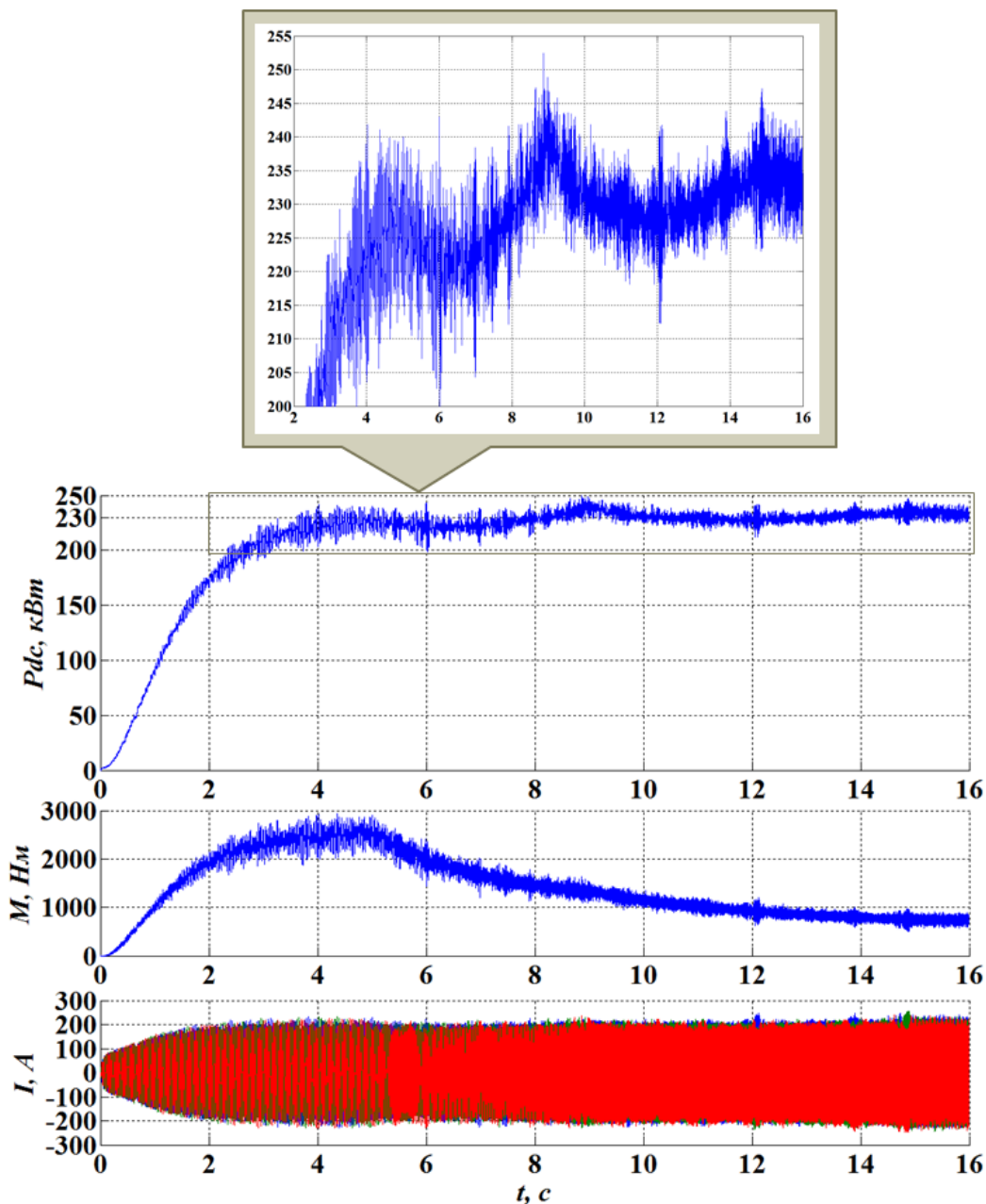


Рис. 6. Перехідний процес АД-906У з характеристикою $|\psi_R|=f(\omega_R)$, заданою лінійною функцією вигляду (3)

Список використаних джерел

1. Воронко, А. Б. Алгоритм формування заданого потягоцеплення в системах векторного управління асинхронними двигателями в режимі ослаблення поля для транспортних применень [Текст] / А. Б. Воронко // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 121.
2. Анищенко, Н. В. Математическая модель асинхронного электропривода мехатронного модуля главного движения токарного станка [Текст] / Н. В. Анищенко, С. И. Савченко // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. – № 36 (1009). – С. 344-346.

3. Шрейнер, Р. Т. Трехзонная система векторного частотного управления асинхронным двигателем [Текст] / Р. Т. Шрейнер // VIII Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – 2014. – С. 433-437.

4. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Theoretical and experimental comparison of indirect field-oriented controllers for induction motors // IEEE Transactions on Power Electronic. – 2003. – Vol. 18. – No. 1. – Pp. 151–163.

5. Levi E., Sokola M., Vukosavic S.N. A method for magnetizing curve identification in rotor flux oriented induction machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2000. – Vol. 15. – No. 2. – P. 157–162

6. Leonhard W. Control of Electrical Drives. (3rd edition). – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 460 p.

7. Розробка та дослідження математичної моделі електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 в режимі електричного гальмування [Текст]: звіт про НДР (заключний); [Українська державна академія залізничного транспорту]; Яцько С.І.; №ГР0113U001808; викон.: Шкурпела О.О.; № ГР0113Г001808 (договір № 72/1 – 2013 р.). – Харків, 2013. – 52 с.

Шкурпела Олександр Олександрович, старший науковий співробітник, ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ». Тел.: +38(097)948-99-45. E-mail: 447Alexashka@gmail.com.

Shkurpela Olexandr, Senior Research Officer, SE Plant Electrotyazhmash. Phone: +38(097)948-99-45. E-mail: 447Alexashka@gmail.com.

Стаття прийнята 27.02.2017 р.

УДК 624.074

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДИСКА ПЕРЕКРЫТИЯ, СОСТАВЛЕННОГО ИЗ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ

Канд. техн. наук Е. Г. Стоянов, асп. А. В. Набока

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДИСКА ПЕРЕКРИТТЯ, СКЛАДЕНОГО ІЗ ЗБІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ

Канд. техн. наук Є. Г. Стоянов, асп. А. В. Набока

MATHEMATICAL MODELING OF THE DISK OVERLAP WORK, COMPOSED OF THE PRECAST REINFORCED CONCRETE SLABS

Doct. of techn. sciences E. G. Stoyanov, A. V. Naboka

В статье рассмотрены основные положения расчета и проектирования сборных дисков перекрытий, составленных из сборных железобетонных предварительно напряженных многослойных плит. Приведены результаты аналитического решения задачи напряженно-деформированного состояния перекрытия и результаты расчета методом конечных элементов.

***Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, моделирование, коэффициент эффективности, коэффициент приведения, изгибная жесткость, крутильная жесткость, метод конечных элементов.*

У статті розглянуто загальні положення розрахунку і проектування збірних дисків перекриттів, що складаються із збірних залізобетонних попередньо напружених багатопустотних плит. Наведено результати аналітичного розв'язання задачі напружено-деформованого стану перекриття та результати розрахунку методом кінцевих елементів.

Ключові слова: напружено-деформований стан, моделювання, коефіцієнт ефективності, коефіцієнт приведення, згинальна жорсткість, крутильна жорсткість, метод кінцевих елементів.

We offer to construct flooring from reinforced concrete precast hollow slabs that ensures structural design of several slabs within floor slab instead of convenient beam-type structural design of separate slab within the flooring. Thus, we have quasi-contour design of operation of flooring slab. Flooring, consisting of several beam slabs within flooring cell in question, has finite bending stiffness in longitudinal direction that depends on geometrical and physical-mechanical parameters and also reinforcement of each separate slab. In transverse direction composite flooring slab has almost zero bending stiffness and bears load due to shear rigidity of the joint and torsion resistance of each slab. This arrangement reduces loads, applied to flooring slab. Represented results of calculations and their comparison by analytical and numerical methods (FEM).

Keywords: stress-strain state, modeling, efficiency ratio, rate reduction, flexural stiffness, torsional rigidity, FEM.

Введение. Для сборных железобетонных предварительно напряженных плит перекрытий вопросы экономической эффективности их применения связаны в наибольшей степени с расходом рабочей арматуры. В последнее время формирование таких плит производится безопалубочным стендовым методом [1, 2], в них с успехом применяется канатная арматура К1400, К1500 (К7), и вопрос экономии дорогостоящей высокопрочной арматуры является весьма актуальным. При этом требования к прочности, трещиностойкости и деформативности не снижаются [3, 4].

Нами предлагается вариант перекрытия, в котором сборные железобетонные плиты работают совместно в составе ячейки диска перекрытия.

Преимущества работы плит в виде единого сборного диска рассматривались и ранее [5-7]. При этом отдельные плиты в составе ячейки соединяются между собой по боковым поверхностям продольным швом, исключающим взаимные сдвиги по вертикали.

Анализ последних достижений и публикаций. Рассматривались различные конструктивные схемы сборных дисков (с опиранием на жесткий или податливый контур, с опиранием плит друг на друга по этажной схеме, с соединением плит между собой с помощью закладных деталей в отдельных точках или сплошным продольным швом [7, 8], с устройством надбетонки над пустотными плитами [9] и др.). Определенный интерес представляют композитные железобетонные плиты, в которых в качестве вкладышей применены микрокапсулы РСМ, которые адаптируются к температурному режиму и имеют потенциал в энергосбережении [10].

Цель и задачи исследования. Целью настоящего исследования является возможность управления напряженно-деформированным состоянием квазимонолитной ячейки перекрытия, составленной из сборных железобетонных плит.

Основная часть исследования. Составная ячейка имеет в продольном направлении определенную изгибную жесткость, зависящую от геометрических и физических параметров, а также от

армирования каждой плиты. В поперечном направлении изгибная жесткость является практически нулевой, а нагрузка воспринимается только за счет сдвиговой жесткости шва и сопротивления плит кручению.

Характер передачи нагрузки и соответствующая схема работы диска перекрытия в поперечном направлении зависит от количества плит в ячейке.

Так, например, для ячейки перекрытия, составленной из двух плит

(рис. 1), каждая из них воспринимает погонный крутящий момент

$$T = T_{(2)} = qb^2/2. \quad (1)$$

От крутящего момента плита поворачивается на угол φ :

$$\varphi = (T/GI_k) \cdot f(x), \quad (2)$$

где $f(x)$ – функция изменения угла поворота по длине плиты;

G – модуль сдвига, $G = 0.4E_{cm}$;

I_k – крутильный момент инерции сечения плиты.

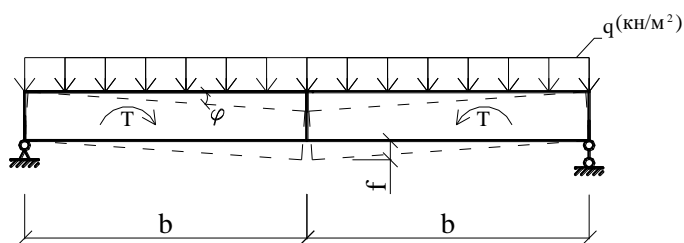


Рис. 1. Схема работы диска перекрытия из двух плит

Крутильный момент инерции определяется в зависимости от наличия, количества и размеров пустот. Так, для сплошного поперечного сечения ее фактическое сечение может быть приведено к пустотелому коробчатому сечению с условной толщиной стенки t_{ef} [5].

Многopустотную плиту можно рассматривать как многоконтурное сечение. Однако можно принять, что крутильный момент воспринимается полностью внешней оболочкой профиля. В этом случае толщина стенки сечения определяется как $t_{ef} = (h - \varnothing_{пустоты}) / 2$.

Для равномерной нагрузки по поверхности диска перекрытия функцию $f(x)$ можно принять аналогичной функции изменения изгибающего момента по длине

плиты. Максимальный угол поворота в центре диска перекрытия

$$\varphi_0 = \frac{T}{GI_k} \int_0^L \left(x - \frac{x^2}{L}\right) dx = \frac{TL^2}{6GI_k}. \quad (3)$$

Прогиб в центре диска

$$f = btg\varphi_0 = b\varphi_0. \quad (4)$$

Погонный изгибающий момент в продольном направлении около шва между плитами

$$M = 48E_{cm}I_z f / 5L^2. \quad (5)$$

Если ячейка диска состоит из трех плит, то работу диска можно представить, как показано на рис. 2.

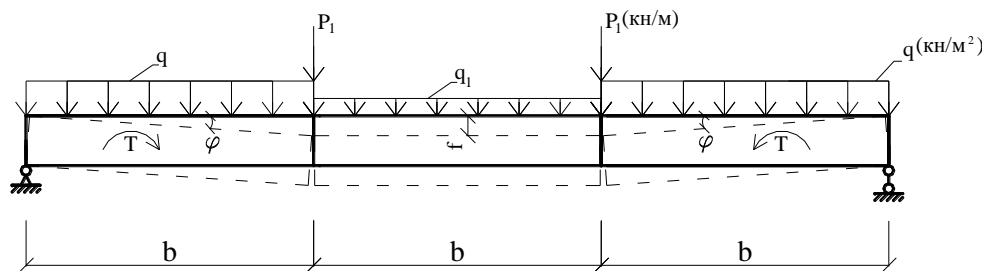


Рис. 2. Схема работы диска перекрытия из трех плит

При этом нагрузка от средней плиты частично распределяется на изгиб плиты, как балочной (q_1), а частично является погонной линейной нагрузкой на кромку крайней плиты $P_1 = (q - q_1)b / 2$, что вызывает дополнительный изгиб крайней плиты от поворота сечения.

Крутящий момент в крайней плите

$$T_{(3)} = T_{(2)} + P_1 b = qb^2 - q_1 b^2 / 2. \quad (6)$$

Угол поворота крайней плиты

$$\varphi_0 = \frac{b^2 L^2}{6GI_k} \left(q - \frac{q_1}{2} \right); \quad (7)$$

прогиб кромки крайней плиты

$$f_{кр} = b\varphi_0 = \frac{b^3 L^2}{6GI_k} \left(q - \frac{q_1}{2} \right). \quad (8)$$

Прогиб средней плиты от ее изгиба по балочной схеме

$$f_{cp} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_1 b L^4}{E_{cm} I_z}. \quad (9)$$

Приравняв $f_{кр} = f_{cp}$, получаем

$$q_1 = \frac{\frac{q b^2}{6GI_k}}{\left(\frac{5L^2}{384E_{cm}I_z} + \frac{b^2}{12GI_k} \right)}. \quad (10)$$

Максимальный прогиб средней плиты при трех плитах в ячейке

$$f_{(3)} = 5q_1 b L^4 / 384 E_{cm} I_z, \quad (11)$$

а «балочный» изгибающий момент в средней плите $M = q_1 b L^2 / 8$.

Соотношение момента при «балочной» схеме работы одной плиты (M_1) к моменту в плите сборной ячейки диска перекрытия (M_d) $n = M_1 / M_d$ является показателем эффективности работы диска перекрытия.

Авторами разработаны алгоритмы расчета и определены коэффициенты эффективности работы дисков перекрытий, составленных из четырех, пяти, шести плит шириной 1.2 м и длиной 6 м, 7.2 м, 9.0 м.

Параллельно с аналитическим решением задачи работы плит в составе диска перекрытия авторами создана конечно-элементная модель диска, составленного из любого количества плит любого пролета под любое нагружение.

Для решения использован программный комплекс ЛИРА-САПР 2013 [6].

Рассматриваемая задача имеет четко выраженный плоский характер, в ЛИРА-САПР 2013 был выбран Признак 3 – схемы, расположенной в плоскости XOY.

Для всех моделей был принят прямоугольный конечный элемент (КЭ) плиты № 11. Каждый из узлов КЭ имеет три степени свободы: вертикальное перемещение (прогиб), угол поворота

относительно оси X и угол поворота относительно оси Y.

Для расчета заданы механические и геометрические характеристики:

- E_{cm} – модуль упругости;
- μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0.2$;
- толщина плиты (принята как приведенная $h = 20.88$ см).

Собственный вес плиты учитывался в приложенной нагрузке.

Все модели закреплены шарнирно по коротким сторонам. Шарнирное опирание моделировалось путем запрещения перемещений вдоль вертикальной оси Z.

Для КЭ моделей дисков перекрытий из сборных плит шов между плитами моделировался путем создания шарниров с расшивкой узлов.

Модуль E_{cm} задается разным для разных плит в составе диска в зависимости от количества плит в диске. Это связано с тем, что первая плита опирается на жесткий контур по трем сторонам, и ее деформации определяются жесткостью на кручение G_k . Смежные плиты опираются по двум коротким сторонам на жесткие опоры, а по двум длинным сторонам – на упругие контуры (разной упругости на противоположных сторонах). Их деформации определяются в зависимости от факторов и кручения, и изгиба.

Для каждой средней плиты принимается обобщенная жесткость как некоторый конгломерат жесткостей на изгиб $E_{cm}I_z$ и на кручение G_k , где доля каждого компонента зависит от места каждой средней плиты в составе диска.

Для того чтобы в ПК «ЛИРА-САПР» оперировать единым модулем (E_{cm}), был введен к этому модулю для каждой плиты коэффициент приведения k , который также учитывал снижение жесткости на кручение плиты с пустотами в сравнении со сплошным сечением плиты тех же габаритов ~ на 20%. При этом каждая сборная плита в составе диска рассмотрена как работающая на изгиб с модулем kE_{cm} .

Функцию изменения коэффициента приведения к логично принять аналогичной функции упругой линии изгиба диска в поперечном направлении.

Нами принята функция k в виде синусоиды

$$k = y = \sin \frac{\pi x}{L}. \quad (12)$$

Функцию k можно принять и в виде полинома, простейший из которых можно представить как

$$k = y = -\frac{4x^2}{L^2} + \frac{4x}{L}. \quad (13)$$

Обе функции отвечают граничным условиям ($y = 0$ при $x = 0$ и при $x=L$) и условию для средней плиты при нечетном количестве плит в диске ($k = 1$ при $x = L/2$). Функция (12) имеет более пологий характер, поэтому, на наш взгляд, больше отвечает действительной работе диска.

Если в качестве координат принять центр ширины плит (при ширине плит 1200 мм имеем $x_1 = 0.6$ м; $x_2 = 1.8$ м; $x_3 = 3.0$ м), то числовые значения коэффициентов приведения, как характеристики моделей дисков, могут быть сведены в табл. 1.

Для сравнения была создана модель сплошной монолитной железобетонной плиты тех же размеров, что и сборный диск. Плита имеет жесткость, эквивалентную изгибной жесткости сборных плит. Сборные и монолитная плиты смоделированы прямоугольными КЭ № 11, размеры всех элементов 0.2x0.2 м. Для модели монолитного диска использовано 703 узла и 648 элементов.

В результате расчетов получены поля и эпюры перемещений вдоль вертикальной оси, поля изгибающих моментов M_x (вдоль длины плит), величины максимальных изгибающих моментов в средних сечениях ячейки диска перекрытия для разных

значений пролетов и разного количества плит в ячейке.

Сравнение результатов расчетов аналитическим методом и методом конечных элементов показало достаточную

степень совпадения для всех параметров напряженно-деформированного состояния при разных пролетах и разном количестве плит (рис. 3).

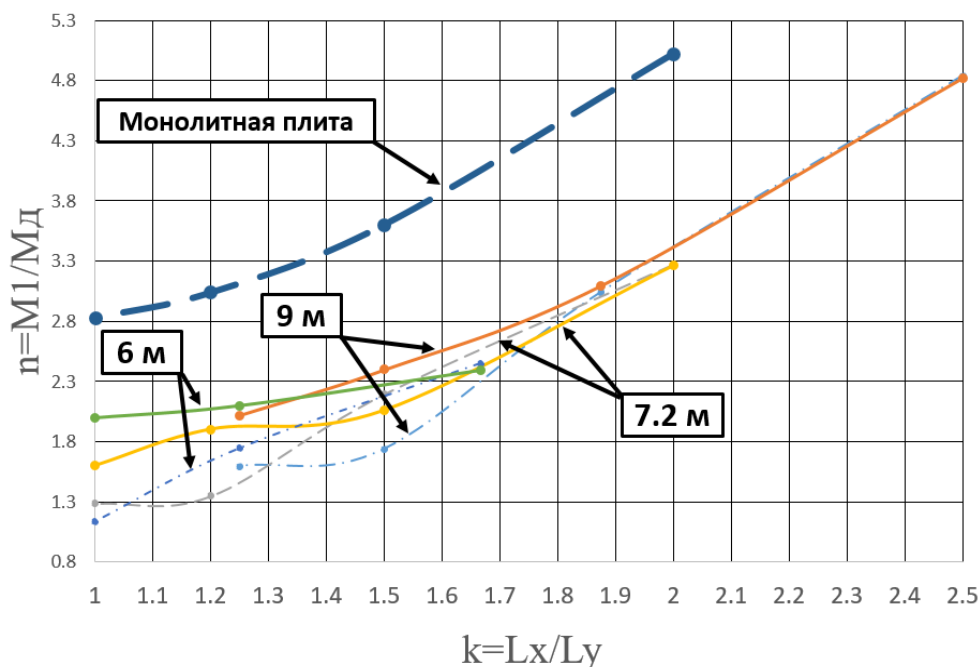


Рис. 3. График $n - k$ изменения изгибающих моментов в диске перекрытия:

- L_x – длина диска (плиты);
- L_y – ширина диска из нескольких плит;
- M_1 – максимальный момент для одиночной плиты;
- M_d – максимальный момент в плите, работающей в составе диска;
- · — – результаты, полученные методом КЭ;
- — — – результаты, полученные аналитическим путем

Уровень снижения величины изгибающих моментов в каждой отдельной плите, работающей в едином диске перекрытия при разных пролетах плит, разном их количестве в диске (разной ширине ячейки диска), разной переменной нагрузке, иллюстрируется в табл. 2.

Выводы по результатам исследования и перспективы по дальнейшему развитию данного направления:

1. Варьирование количеством плит в ячейке перекрытия и их длиной позволяет получить желаемые величины изгибающих моментов в сборных дисках, и, следовательно, возможность управления напряженно-деформированным состоянием перекрытия в целом.
2. Возможность управления напряженным состоянием диска перекрытия позволяет существенно снизить расход арматуры.

Таблица 1

Характеристика моделей дисков перекрытий из сборных плит

Пролет, м	Количество плит	Кол-во узлов	Количество элементов	Коэффициент приведения к при $x = 0.6 \text{ м}, 1.8 \text{ м}, 3.0 \text{ м}$					
6.0	1	217	180			1.0			
	2	465	380			0.57	0.57		
	3	651	540		0.4	1.0	0.4		
	4	868	720		0.31	0.83	0.83	0.31	
	5	1116	900	0.25	0.73	1.0	0.73	0.25	
	6	1302	1080	0.21	0.57	0.77	0.77	0.57	0.21
7.2	1	259	216			1.0			
	2	555	504			0.57	0.57		
	3	777	648		0.4	1.0	0.4		
	4	1036	864		0.31	0.83	0.83	0.31	
	5	1295	1080	0.25	0.73	1.0	0.73	0.25	
	6	1554	1296	0.21	0.57	0.77	0.77	0.57	0.21
9.0	1	322	270			1.0			
	2	690	540			0.57	0.57		
	3	966	810		0.4	1.0	0.4		
	4	1288	1080		0.31	0.83	0.83	0.31	
	5	1610	1350	0.25	0.73	1.0	0.73	0.25	
	6	1932	1620	0.21	0.57	0.77	0.77	0.57	0.21

Таблица 2

Изгибающие моменты в сборном диске перекрытия

Длина плиты, м	Переменная расчетная нагрузка, кН/м ²	Момент в балочной плите M_1 , кНм	Максимальный момент в центре диска M_d , кНм, при ширине ячейки перекрытия, м			
			3.6	4.8	6.0	7.2
6.0	21.0	124.5	51.9	59.3	62.2	-
	16.0	98.9	41.2	47.1	49.5	-
	12.5	81.0	33.7	38.6	40.5	-
	10.0	68.2	28.4	32.5	34.1	-
	8.0	58.0	24.2	27.6	29.0	-
7.2	16.0	143.7	44.0	69.8	75.6	89.4
	12.5	117.7	36.0	57.2	62.0	73.1
	10.0	99.1	30.3	48.1	52.1	61.9
	8.0	89.2	27.3	43.3	46.9	55.8
	6.0	69.4	21.2	33.7	36.5	43.4
8.4	10.0	134.5	38.0	49.5	66.3	78.8
	8.0	121.0	34.1	44.5	59.6	71.2
	6.0	94.1	26.5	34.6	46.3	55.3
	4.5	79.0	22.3	29.1	38.9	46.5
9.0	8.0	139.4	28.9	45.0	58.1	69.0
	6.0	108.4	22.5	35.0	45.2	53.5
	4.5	91.0	18.9	29.4	37.9	45.1

Список использованных источников

1. Шмуклер, В. С. Особенности внедрения железобетонных многопустотных предварительно напряженных плит перекрытий безопалубочного стендового формования [Текст] / В. С. Шмуклер, Е. Г. Стоянов, О. М. Пустовойтова и др. // Комунальне господарство міст. – Харків, 2014. – №114. – С. 22-30.
2. Стоянов, Е. Г. Особенности проектирования многопустотных плит с напрягаемой канатной арматурой [Текст] / Е. Г. Стоянов, А. В. Набока // Комунальне господарство міст. – Харків, 2015. – № 123. – С. 12-18.
3. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
4. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010.
5. Байков, В. Н. Проектирование железобетонных тонкостенных пространственных конструкций / В. Н. Байков, Э. Хампе, Э. Рауэ. – М.: Стройиздат, 1990. – 232 с.
6. Шмуклер, В. С. Каркасные системы облегченного типа [Текст] / В. С. Шмуклер, Ю. А. Климов, Н. П. Буряк. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.
7. Стоянов, Е. Г. Экспериментальное исследование работы сборных железобетонных предварительно напряженных плит в составе диска перекрытия [Текст] / Е. Г. Стоянов, А. В. Набока // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНТУБА, 2016. – №1(83). – С. 107-114.
8. Krzysztof Gromysz Distribution of forces in composite concrete slabs between the joint and reinforcement anchored on the support [Text] / K. Gromysz // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 65. – P. 206-211.
9. Eray Baran Effects of cast-in-place concrete topping of flexural response of precast concrete hollow-core slabs [Text] / E. Baran // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 98. – P. 109-117.
10. Lidia Navarro Design of prefabricated concrete slab with PCM inside the hollows [Text] / Lidia Navarro, Alvaro de Garcia, Albert Castell, Servando Alvarez, Luisa F. Cabeza // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 57. – P. 2324-2332.
11. Бабаєв, В. М. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В 2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1(Eurocode 2) [Текст] / В. М. Бабаєв, А. М. Бамбура, О. М. Пустовойтова [та ін.]. – Харків: Золоті сторінки, 2015. – 206 с.

Стоянов Євген Геннадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. E-mail: kname.edu.ua.

Набока Анатолій Віталійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. E-mail: kname.edu.ua.

Stoyanov Evgeniy Genadiyovich, d-r science, docent department of building constructions. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.

Naboka Anatoliy Vitalievich graduate student department of building constructions O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.

Стаття прийнята 27.02.2017 р.

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

**COLLECTED SCIENTIFIC WORKS OF UKRAINIAN
STATE UNIVERSITY OF RAILWAY**

Випуск 167

«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.

Редактор Еткало О. О.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 28.02.2017 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн.друк. арк. 9,5. 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.