



ISSN 2617-1848

# СТРОИТЕЛЬ ДОНБАССА

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 2 (19) ИЮНЬ 2022



НАШИ ПАРТНЕРЫ:



Министерство строительства  
и жилищно-коммунального хозяйства ДНР



Министерство образования  
и науки ДНР

# ДОРОГИЕ ВЫПУСКНИКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, СРЕДНЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ И АБИТУРИЕНТЫ!



1 июля в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры стартует приемная компания.

ДОННАСА – это ВУЗ со славными традициями и историей. Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА) с 1947 года готовит специалистов для строительства и архитектуры, сначала как факультет Донецкого индустриального института (ныне ДОННТУ), а с 1972 года как самостоятельное высшее учебное заведение. В Донецкой Народной Республике ГОУ ВПО ДОННАСА – единственное учебное заведение, в котором готовят архитекторов, специалистов в области городского строительства и хозяйства, экономистов и менеджеров для строительства, строителей дорог и аэродромов. Наши студенты будут проходить обучение по программам двойных дипломов и по его окончании наряду с дипломом ДНР получить диплом одного из ведущих российских строительных вузов.

Мы начинаем прием документов и, конечно, ждем в вашем лице абитуриентов, а завтра уже студентов, которые будут в дальнейшем связывать свою судьбу именно с нашим высшим учебным заведением!

Ректор

Н. М. Зайченко

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор

**Е.В. ГОРОХОВ,**  
д. т. н., профессор

Зам. главного редактора  
(научный редактор)

**Н.М. ЗАЙЧЕНКО,**  
д. т. н., профессор

Выпускающий редактор

**Н.Х. ДМИТРИЕВА**

Ответственный редактор

**Б.В. КЛЯУС**

## УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ  
АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»  
Министерства образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
при поддержке Министерства строительства  
и жилищно-коммунального хозяйства  
Донецкой Народной Республики

## АДРЕС РЕДАКЦИИ

286123, Донецкая Народная Республика,  
г. Макеевка, ул. Державина, 2, ГОУ ВПО «ДОННАСА»  
Web: strdon.donnasa.ru. Электронная почта: strdon@donnasa.ru  
Контактный телефон: (071) 363-74-63

Печатается по решению Ученого Совета  
ГОУ ВПО «ДОНБАССКАЯ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»  
Протокол № 10 от 30.05.22 г.

Перепечатка, копирование и воспроизведение всех  
материалов журнала возможны только с письменного  
разрешения редакционной коллегии

«Свободная цена»

Свидетельство о регистрации средства массовой  
информации № 000217, выдано 18.03.2019 года  
Министерством информации  
Донецкой Народной Республики

Приказом МОН ДНР № 99 от 17.01.2020 г. журнал включен  
в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны  
быть опубликованы основные научные результаты диссертаций  
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание  
ученой степени доктора наук

Подписано в печать 27.06.2022. Формат 60 × 90<sup>1/8</sup>.  
Бум. мелов. Усл. печ. л. 7,20. Тираж 300 экз. Заказ № 15.

ООО «Издательско-полиграфическое предприятие «Проминъ»  
283059, г. Донецк, пр. Ильича, 109а  
Свидетельство о государственной регистрации № 27235,  
выдано 03.12.2014 года Департаментом государственной  
регистрации Министерства доходов и сборов  
Донецкой Народной Республики

№ 2(19),  
Июнь 2022 г.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агеев В.Г. – НИИГД «Респиратор», ДНР

Бенаи Х.А. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Большаков А.Г. – ИрНИТУ, РФ

Братчун В.И. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Брюханов А.М. – ГУ МакНИИ, ДНР

Гайворонский Е.А. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Горожанкин С.А. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Горохов Е.В. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Долженков А.Ф. – ГУ МакНИИ, ДНР

Дрозд Г.Я. – ГОУ ВПО ЛНР «ЛНУ им. Даля»

Зайченко Н.М. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Иванов М.Ф. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Левченко В.Н. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Лобов И.М. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Лобов М.И. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Лукьянов А.В. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Мамаев В.В. – НИИГД «Респиратор», ДНР

Муксинов Р.М. – КРСУ, Кыргыстан

Мущанов В.Ф. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Нагаева З.С. – ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», РФ

Назим Я.В. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Найманов А.Я. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Насонкина Н.Г. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Наумец С.С. – МИНСТРОЙ ДНР

Нездойминов В.И. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Нечепаев В.Г. – ГОУ ВПО «ДонНТУ», ДНР

Олексюк А.А. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Пенчук В.А. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Петраков А.А. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Пономоренко Е.В. – СамГТУ, РФ

Радионов Т.В. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Севка В.Г. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Семченков Л.В. – МИНСТРОЙ ДНР

Сердюк А.И. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Тищенко В.П. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Шалленный В.Т. – ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», РФ

Шолух Н.В. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

Югов А.М. – ГОУ ВПО «ДОННАСА», ДНР

## СОДЕРЖАНИЕ

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- В. И. Братчун, А. М. Саткоева, Е. А. Ромасюк,  
В. Л. Беспалов, В. В. Жеванов*  
КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫЙ  
ДОРОЖНЫЙ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫЙ  
АСФАЛЬТОБЕТОН ПОВЫШЕННОЙ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ ..... 4

- К. Г. Кондрашин, Т. К. Курбатова,  
Н. А. Рактович, С. П. Стрелкова, Р. А. Петров*  
ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ  
ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ  
СЛАБЫХ ГРУНТОВ ..... 10

- А. В. Назарова, С. В. Сороканич, Д. С. Коваленко*  
ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА  
КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРА  
НА ОСНОВЕ РАСШИРЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ  
В ТЯЖЕЛОМ ЦЕМЕНТНОМ БЕТОНЕ ..... 15

ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫЕ,  
СТРОИТЕЛЬНЫЕ, ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ

- Т. В. Луцко, С. В. Мишин, А. А. Родин*  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СТРЕЛЫ ТРОСОВОГО  
КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА НА ТОЧНОСТЬ  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУЗА ..... 20

- В. М. Даценко, А. Г. Водолажченко,  
Я. Р. Четвериков, П. Э. Сербинов*  
ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА  
ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРЯМОЗУБОЙ  
ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ И УСЛОВИЙ ЕЕ РАБОТЫ ..... 26

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО  
ХОЗЯЙСТВА

- А. Э. Ступина*  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ  
АРХИТЕКТУРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ  
СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕДЕЙСТВУЮЩИХ  
УГОЛЬНО-ОТРАСЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ  
ДОНБАССА ..... 35

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
СИСТЕМ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- А. Я. Бабанин, А. В. Чухаркин, Т. А. Кикош,  
Ю. А. Любивый*  
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КЛАПАНОВ  
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА  
ДВИГАТЕЛЯ УМЗ-4216 ПОСЛЕ ВЫРАБОТКИ  
РЕСУРСА В ТЯЖЕЛЫХ РЕЖИМАХ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ..... 40

## SUMMARY

*V. I. Bratchun, A. M. Satkoeva, E. A. Romasyuk,*

*V. L. Bespalov, V. V. Zhevanov*

COMPLEX-MODIFIED ROAD CRUSHED-STONE-  
MASTIC ASPHALT CONCRETE OF INCREASED DURA-  
BILITY

Using the method of experimental-statistical modeling, the optimal concentration of ethylene glycidyl acrylate of the Elvaloy-AM brand and polyphosphoric acid PFC-105 in petroleum road bitumen (2% wt. and 0.2% wt., respectively) was determined, and the surface of mineral materials was mechanically activated 0.7 % wt. ethylene glycidyl acrylate, at these concentration ratios of modifiers, optimal physical and deformation-strength characteristics of the complex-modified road asphalt concrete are provided in our research. It has been established that the fatigue life of the complex-modified asphalt concrete is 1.5-2 times higher than that of the unmodified one.

*K. G. Kondrashina, T. K. Kurbatova, N. A. Raktovich,  
S. P. Strelkova, R. A. Petrova*

THE USE OF SYNTHETIC POLYMERS TO STRENG-  
THEN SOFT SOILS

Research about the use of various synthetic resins for soil stabilization was first started in the USSR in 1954 under the guidance of prof. G. S. Petrov at the Chemical-Technological Institute. D. I. Mendeleev with the Scientific Research Institute of Oil and Gas in order to isolate formation waters by creating waterproof screens in oil wells. Researches have shown that the water permeability of sandstones after treatment with carbamide resin decreased by 80-90%. The decrease in the water permeability of sandstones after their treatment with a mixture of urea resin and hardener (acid) occurs as a result of polymerization of the resin in an acidic medium at pH = 4.5. The resulting dense gel is firmly bound to the soil particles and reduces the active porosity of the soil.

*A. V. Nazarova, S. V. Sorokanich, D. S. Kovalenko*

OPTIMIZATION OF A COMPLEX MODIFIER'S  
COMPOSITION BASED ON AN EXPANDING ADDITIVE  
IN CEMENT CONCRETE

This article presents results of optimization of a complex modifier's composition based on an expanding additive for cement concrete. As parameters of the considered variable factors in the planning of the experiment, the following were taken: the content of the oxide-sulfoaluminate expanding additive and the polycarboxylate superplasticizer. The goal of optimization is to obtain a complex concrete modifier that is able to provide the S4 concrete mix mobility grade and compressive strength at the design age of at least 40 MPa for concrete with reduced shrinkage. To achieve the given aim, the area of optimal values lies within the following limits: the content of the expanding additive is 8 ... 10.5% by weight of cement, and the content of the superplasticizer «MasterGlenium 115» is 1.3 ... 1.5%.

*T. V. Lutsko, S. V. Mishin, A. A. Rodin*

THE INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN  
STATE OF A TELESCOPIC BOOM OF A CABLE  
CRANE-MANIPULATOR ON THE ACCURACY OF LOAD  
POSITIONING

The article presents a numerical analysis of the stress-strain state of a telescopic boom of a cable crane-manipulator when it is loaded. Subject of the research is a telescopic boom with tetrahedral and hexagonal cross sections. The Compass software package – 3D APM FEM: Strength Analysis System – was used for the analysis. The results obtained made it possible to evaluate the strength and stiffness parameters of the considered structures of the booms of a cable crane-manipulator. Graphs of the dependences of the boom head displacements under loading in the vertical and horizontal planes are constructed. Based on the obtained data, the load-altitude characteristics of the crane-manipulator were adjusted. It contributes to the accurate positioning of the cargo to the place of loading and increase the

## SUMMARY

safety of loading and unloading operations. The refined load-altitude characteristics of the crane-manipulator in the form of analytical dependencies are presented.

*V. M. Datsenko, A. G. Vodolazhchenko, Ya. R. Chetverikov, P. E. Serbinov*

**THE EFFICIENCY'S OF A SPUR GEAR DEPENDENCE ON THE GEOMETRIC PARAMETERS AND CONDITIONS OF ITS OPERATING**

In our research, we are found out a decision for design requirements for high-performance gearing, using a method of calculation power losses in spur gears for a wide range of geometric parameters and its operating conditions. The coefficient of efficiency's (COE) dependence on the dimensions of a spur gear, module, gear ratio, circumferential speed at the pitch diameter and load is shown here. «Carpet diagrams» were used to illustrate the application of the proposed method. It has been established that the maximum efficiency is higher for fine-module gears with large diameters of the pitch circle. Idling losses account for a significant proportion of the total power loss in gearing. The results of calculating the efficiency factor (COE) by the above method for estimating power losses at one point of the engagement line with an accuracy of 0.1% coincide with the results of experiments conducted by Anderson and Leventhal. The only exception is the case of weak loading at high circumferential speeds (40 m/s), when the absence of a temperature correction factor limiting the thickness of the elastohydrodynamic film leads to an increase in the error up to 1%.

*A. E. Stupina*

**ENVIRONMENTAL ISSUES OF ARCHITECTURAL FORMATION OF MODERN ENTERPRISES FOR THE MANUFACTURE OF BUILDING MATERIALS ON THE BASIS OF INACTIVE COAL INDUSTRIAL FACILITIES OF DONBASS**

The article discusses the environmental prerequisites that determine the modern requirements for the architectural and planning organization of enterprises for the production of building materials and structures based on the use of territories and residual funds of inactive coal-industrial facilities in Donbass. Information is about the features of their town-planning position, about the environmental assessment of their condition after closure, which makes it possible to model a set of requirements at the preparatory stage of their renovation is given here. The regulatory requirements of documents regulating the design, construction and operation of enterprises in the industry of production of building materials and structures are analyzed in our research. This, in turn, makes it possible to take it into account when developing the principles and methods of the architectural and planning organization of buildings, structures and their complexes of these enterprises. The issues of typology of inactive coal-industry enterprises, the features of their regional-territorial and town-planning distribution in the structure of populated areas are also considered. The main modern environmentally conditioned requirements for the architectural and planning organization of buildings, structures and their complexes of the above-mentioned construction enterprises based on inactive coal-industry facilities are formulated.

*A. Ya. Babanin, A. V. Chukharkin, T. A. Kikosh, Yu. A. Lyubiviy*

**INVESTIGATION OF DEFECTS IN THE VALVES OF THE GAS DISTRIBUTION MECHANISM OF THE UMZ-4216 ENGINE AFTER THE EXHAUSTION OF A RESOURCE IN HEAVY OPERATING MODES**

In this article we are presented results of the research: based on the performed visual and instrumental studies of defects and the amount of wear of valves and mating surfaces of valves of the gas distribution mechanism (timing) of the internal combustion engine (ICE) UMZ-4216, which has exhausted its resource on gas fuel (compressed natural gas) in heavy operating modes, the a number of defects are found. The values of changes in the hardness of the surface layer of the characteristic surfaces of the valves during their operation in the engine are determined.

## CONTENTS

## CONSTRUCTION MATERIALS

*V. I. Bratchun, A. M. Satkoeva, E. A. Romasyuk,*

*V. L. Bespalov V. V. Zhevanov*

## COMPLEX-MODIFIED ROAD

## CRUSHED-STONE-MASTIC ASPHALT

CONCRETE OF INCREASED DURABILITY ..... 4

*K. G. Kondrashin, T. K. Kurbatova,*

*N. A. Raktovich, S. P. Strelkov, R. A. Petrova*

## THE USE OF SYNTHETIC

## POLYMERS TO STRENGTHEN

SOFT SOILS ..... 10

*A. V. Nazarova, S. V. Sorokanich, D. S. Kovalenko*

## OPTIMIZATION OF A COMPLEX

## MODIFIER'S COMPOSITION BASED

## ON AN EXPANDING ADDITIVE

IN HEAVY-DUTY CEMENT CONCRETE ..... 15

## LIFTING AND TRANSPORT,

## CONSTRUCTION, ROAD MACHINERY

## AND EQUIPMENT

*T. V. Lutsko, S. V. Mishin, A. A. Rodin*

## THE INFLUENCE'S INVESTIGATION

## OF THE STRESS-STRAIN STATE

## OF A TELESCOPIC BOOM OF A CABLE

## CRANE-MANIPULATOR ON

THE ACCURACY OF LOAD POSITIONING ..... 20

*V. M. Datsenko, A. G. Vodolazhchenko,*

*Ya. R. Chetverikov, P. E. Serbinov*

## THE EFFICIENCY'S OF A SPUR GEAR

## DEPENDENCE ON THE GEOMETRIC

## PARAMETERS AND CONDITIONS OF ITS

OPERATING ..... 26

## ENVIRONMENTAL SAFETY

## IN CONSTRUCTION AND URBAN

## ECONOMICS

*A. E. Stupina*

## ENVIRONMENTAL ISSUES

## OF ARCHITECTURAL FORMATION

## OF MODERN ENTERPRISES FOR THE

## MANUFACTURE OF BUILDING MATERIALS

## ON THE BASIS OF INACTIVE COAL

INDUSTRIAL FACILITIES OF DONBASS ..... 35

## INCREASING THE EFFICIENCY

## OF URBAN SYSTEMS

*A. Ya. Babanin, A. V. Chukharkin,*

*T. A. Kikosh, Yu. A. Lyubiviy*

## INVESTIGATION OF DEFECTS IN THE VALVES

## OF THE GAS DISTRIBUTION MECHANISM

## OF THE UMZ-4216 ENGINE AFTER THE

## EXHAUSTION OF A RESOURCE IN HEAVY

OPERATING MODES ..... 40

# КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ДОРОЖНЫЙ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫЙ АСФАЛЬТОБЕТОН ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

**В. И. Братчун<sup>1</sup>, д.т.н., профессор; А. М. Саткоева<sup>2</sup>; Е. А. Ромасюк<sup>1</sup>, к.т.н., доцент;  
В. Л. Беспалов<sup>1</sup>, д.т.н., профессор; В. В. Жеванов<sup>1</sup>, к.т.н., доцент**

<sup>1</sup> ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

<sup>2</sup> Юго-Осетинский государственный университет им. А. А. Тиболова



**Братчун  
Валерий Иванович**



**Саткоева  
Алана Маирбековна**



**Ромасюк  
Евгений Александрович**



**Беспалов  
Виталий Леонидович**



**Жеванов  
Вячеслав Владимирович**

**Аннотация.** С использованием метода экспериментально-статистического моделирования определена оптимальная концентрация этиленглицидилакрилата марки Elvaloy-AM и полифосфорной кислоты ПФК-105 в нефтяном дорожном битуме (2 % мас. и 0,2 % мас. соответственно), а поверхности минеральных материалов механо-активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата; при данных концентрационных соотношениях модификаторов обеспечиваются оптимальные физические и деформационно-прочностные характеристики комплексно-модифицированного дорожного асфальтобетона. Установлено, что усталостная долговечность комплексно-модифицированного асфальтобетона в 1,5-2 раза выше, чем у немодифицированного.

**Ключевые слова:** щебеночно-мастичный асфальтобетон; комплексная модификация; деформационно-прочностные свойства; долговечность.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Расчётный срок службы покрытий асфальтобетонных дорог 1-а и 1-б технических категорий до капитального ремонта (10-12 лет) в Донецкой Народной Республике и в Российской Федерации не выдерживается. После пяти лет эксплуатации они нуждаются в капитальном ремонте [1].

Свойства дорожного асфальтобетона – композиционного материала с коагуляционным типом контактов, определяется, прежде всего, физико-механическими свойствами органического вяжущего, рациональным сочетанием типов микроструктуры минерального остова, а также энергией взаимодействия на поверхности раздела фаз «органическое вяжущее – минеральный материал» [2-5].

Таким образом, необходимо разрабатывать такие способы направленного регулирования структуры и свойств нефтяных дорожных битумов и повышения энергетического взаимодействия на поверхности раздела фаз «органическое вяжущее – минеральный материал», которые бы позволили асфальтобетону, эксплуатируемому в покрытиях нежестких дорожных одежд, определяющих нормативные значения деформационно-прочностных характеристик, обеспечивающих долговечность нежестких дорожных одежд.

В научно-исследовательских работах, выполненных в ГОУ ВПО «ДОННАСА» [6,7], установлено,

что эффективным способом повышения долговечности покрытий нежестких дорожных одежд является комплексная модификация микро-, мезо- и макроструктуры дорожного асфальтобетона одновременной поверхностной активацией щебня, песка и минерального порошка этиленглицидилакрилатом, и модификацией нефтяного дорожного битума этиленглицидилакрилатом Элвалой-2 в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК-2. [8,9]. В то же время оптимальные концентрационные соотношения в системе «нефтяной дорожный битум – модификатор нефтяного дорожного битума» и поверхности минеральных материалов (Элвалой АМ) не установлены. В связи с этим не изучены технологические свойства модифицированных асфальтобетонных смесей, физические и деформационно-прочностные характеристики комплексно-модифицированного асфальтобетона.

**Целью исследования** являются экспериментальное определение оптимальных концентрационных соотношений в системе «нефтяной дорожный битум – этиленглицидилакрилат (Элвалой-АМ) – известняковый минеральный порошок, активированный Элвалоем АМ» и изучение физико-механических свойств комплексно-модифицированных асфальтобетонов и, прежде всего, дорожных щебеночно-мастичных асфальтополимербетонов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования приняты дорожные битумы БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.2-20. Для комплексной модификации микро-, мезо- и макроструктуры асфальтобетонов использованы этиленглицидилакрилат, отвечающий требованиям сертификата качества концерна-производителя «DUPON», совместно с полифосфорной кислотой ПФК-105 следующего состава (%):  $H_3PO_4$  – 51,  $H_4P_2O_7$  – 42,  $H_5P_3O_{10}$  – 6,  $H_6P_4O_{13}$  – 1; температура плавления –  $T_{пл}$  = 16-31 °С. Температура кипения –  $T_{кип}$  = 310 °С; эффективная вязкость при 25 °С –  $\eta$  = 840 сПз при 105 °С; при 105 °С  $\eta$  = 35 сПз; плотность при 25 °С –  $\rho$  = 19 20 кг/м<sup>3</sup> [6].

В этиленглицидилакрилате этиленовая основа модифицирована глицидилакрилатом ( $CH_2 = CH - COOR$ ) и придает системе эластичность, а глицидиловая (эпоксидная) группа обеспечивает стабильность системы в результате взаимодействия с компонентами битума. Для Элвалоя характерны растворимость в нефтяном дорожном битуме и взаимодействие эпоксидной группы этиленглицидилакрилата с асфальтогеновыми кислотами битума [6].

В качестве наполнителя асфальтобетонной смеси использован известняковый минеральный порошок (МП): содержание  $CaCO_3$  – 99 %; удельная поверхность  $S_{1,2}$  = 400 м<sup>2</sup>/кг; средняя плотность под нагрузкой 40 МПа – 1880 кг/м<sup>3</sup>; пустотность – 31,8 %;

## Значение факторов варьирования, которые действуют на систему «битум – активированный минеральный порошок»

№ п/п	Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни фактора		
					-1	0	+1
1	$X_1$	Содержание модификатора на поверхности МП	%	0,5	0,25	0,75	1,25
2	$X_2$	Массовая концентрация битума	%	2,5	12	14,5	17

битумность – 50 %. Минеральный порошок поверхности-активирован этиленглицидилакрилатом из раствора в бензине.

Щебень и песок получены дроблением и рассеянием гранита Каранского карьера (Донецкая область) со следующими показателями качества: дробимость – 6,2 % (марка щебня по прочности – 1400); истираемость щебня в полочном барабане – 2,3 %; насыпная плотность щебня – 1410 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность – 2700 кг/м<sup>3</sup>; морозостойкость, F > 200 циклов; содержание зерен лещадной и игольчатой формы – 6,5 %.

Составы асфальтобетонов приняты типов А, Б, В и ЩМА-10 состава, фракций, %: 15...10 – 50 %; 10...5 – 25 %; 5...2,5 – 5 %; 2,5...1,25 – 2 %; 1,25...0,63 – 2 %; 0,63...0,315 – 2 %; 0,315...0,14 – 2 %; 0,14...0,071 – 2 %; минеральный порошок – 10 %.

При выполнении экспериментальных исследований использованы как стандартные, так и специальные: калориметрический (микрокалориметр ДАК-1-1А); термогравиметрический (ДТА-Т).

Исследование усталостной долговечности асфальтобетонов при действии статических и динамических нагрузок выполнено на разработанной на кафедре «Автомобильные дороги и аэродромы» ГОУ ВПО «ДОННАСА» установке, которая позволяет выполнять исследования асфальтобетонных образцов-балочек (16×4×4 см) в режиме постоянных циклических нагрузений с определением количества циклов до разрушения и замеров величин прогиба образца.

Режимы циклического нагружения: нагрузка – от 0,1 до 0,5 с, отдых – от 0,2 до 0,9 с. Величина циклической нагрузки – 10...50 % от разрушающей. Температуры испытаний: -20 °С, -10 °С, 0 °С, 10 °С, 20 °С. Схема приложения нагрузки – двухточечная с целью создания зоны постоянного изгибающего момента в образце-балочке для обеспечения чистого изгиба образца – прогиб по линии окружности.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Оптимизация асфальтовяжущего вещества состава «битум – Elvaloy-AM и ПФК-105 – минеральный порошок, поверхностно активированный Elvaloy-AM»

В связи с тем, что совокупность факторов (табл. 1), действующих на комплексно-модифицированное асфальтовяжущее вещество, а именно массовая концентрация модифицированного дорожного битума, концентрация полимера-активатора (Elvaloy-AM) на поверхности МП является сложным сочетанием, то был применен метод планирования эксперимента, позволяющий определить оптимальное содержание полимерного активатора на поверхности, обеспечивающего требуемые физико-механические свойства (среднюю плотность и предел прочности при сжатии асфальтовяжущих при 0 °С).

Таблица 1.

Использовался композиционный несимметричный план на трех целочисленных уровнях (-1; 0; +1) с коэффициентом корреляции между факторами  $r_{ij}$ ,  $j < 0,1; i, j = 1, 2, 3$  и  $i \neq j$  [6].

В таблицах 2 и 3 приведены параметры оптимизации системы «битум – Elvaloy-AM и ПФК-105 – минеральный порошок, активированный Elvaloy-AM», а также матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 2.

## Параметры оптимизации и их предельные значения

№ п/п	Код параметра	Физический смысл параметра оптимизации	Ед. изм.	Предельные значения функции отклика
1	Y1	Предел прочности при сжатии при 0 °C	МПа	не более 6,50
2	Y2	Средняя плотность	г/см³	не менее 2,21

Таблица 3.

## Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	В кодируемых значениях		В натуральных значениях		Средние значения экспериментальных данных	
	$X_1$	$X_2$	$X_1$ , % Elvaloy в МП	$X_2$ , % битума	$Y_1$ , МПа	$Y_2$ , ρ <sub>ср.</sub> , г/см³
1	0	0	0,75	14,5	6,46	2,21
2	+	+	1,25	17	5,89	2,19
3	-	-	0,25	12	5,67	2,18
4	0	+	0,75	17	5,44	2,17
5	0	-	0,75	12	5,33	2,16
6	+	0	1,25	14,5	5,84	2,19
7	-	0	0,25	14,5	6,35	2,23
8	+	-	1,25	12	5,16	2,15
9	-	+	0,25	17	4,99	2,16

В программе MathCAD 14.0 for Windows выполнен расчет математических моделей с построением графиков функций отклика (рис. 1).

Получены математические модели в виде неполных полиномов второй степени:

$$Y_1(X_1, X_2) = -25,858 + 4,501X_1 + 1,982X_2 - 0,159X_1^2 - 10,044X_2^2 + 0,234X_1X_2 - 0,018X_1^2X_2 + 0,592X_1X_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2(X_1, X_2) = -0,247 + 0,345X_1 - 1,306X_2 - 0,012X_1^2 - 0,116X_2^2 - 0,186X_1X_2 + 0,0064X_1^2X_2 - 0,008X_1X_2^2 \quad (2)$$

Анализируя данные, приведенные на рис. 1, можно установить, что оптимальное содержание Elvaloy-AM на поверхности минерального порошка составляет 0,65 – 0,7 %. При больших концентрациях (1,25 %) наблюдается явный избыток активатора Elvaloy-AM, выраженный в явлении слипания частиц МП между собой в виде «горошинок» и снижению прочности из-за появления плоскостей скольжения по полимолекулярным слоям этиленглицидилакрилата.

Усталостная долговечность асфальтобетонов в логарифмической системе координат в зависимости от температуры испытаний приведена на рис. 2 а, б действия кратковременной нагрузки: 0,1 с – нагружение; 0,9 с – отдых, т.е. циклическая нагрузка с частотой в 1 Гц.

В качестве критерия отказа (критической выносимости) асфальтобетонного образца под действием кратковременных циклических и статических нагрузок был принят прогиб балки величиной 4 мм. Как показали наблюдения, такой прогиб достаточен для

появления магистральных усталостных трещин в диапазоне температур от +20 °C до минус 20 °C [6].

Исходя из полученных зависимостей (рис. 2 а, б) установлено, что большим количеством циклов до разрушения по сравнению со стандартными асфальтобетонами при всех температурах испытания характеризуется ЩМА, несмотря на повышенное содержание крупных фракций щебня. Это свидетельствует о том, что структура ЩМА имеет более жесткий пространственный каркас, который способен более эффективно воспринимать динамические напряжения. Повышенное содержание асфальтовяжущего вещества в ЩМА приводит к снижению остаточной пористости и, следовательно, источников концентраторов напряжений и повышению усталостной долговечности. Но, в то же время, на всех зависимостях (рис. 2 а, б) заметно, что линия наклона усталостной долговечности к линии абсцисс имеет более пологий угол по сравнению с другими асфальтобетонами, поэтому коэффициент  $m$  для ЩМА оказался самым высоким из всех типов асфальтобетонов. Следовательно, при большом количестве циклов динамической нагрузки усталостные разрушения в материале будут развиваться быстрее, чем в обычном асфальтобетоне. Это связано с тем, что слабоструктурированный битум раздвигает зерна минерального остова ЩМА. Присутствие слабоструктурированного битума в ЩМА способствует некоторому увеличению пластической деформативности при растяжении (особенно при отрицательных температурах), а также снижению когезионной прочности материала при положительных температурах. Это подтверждается в работе [7], в которой показано, что в результате испытаний на прочность при сжатии ЩМА имел более низкие показатели в сравнении с горячими

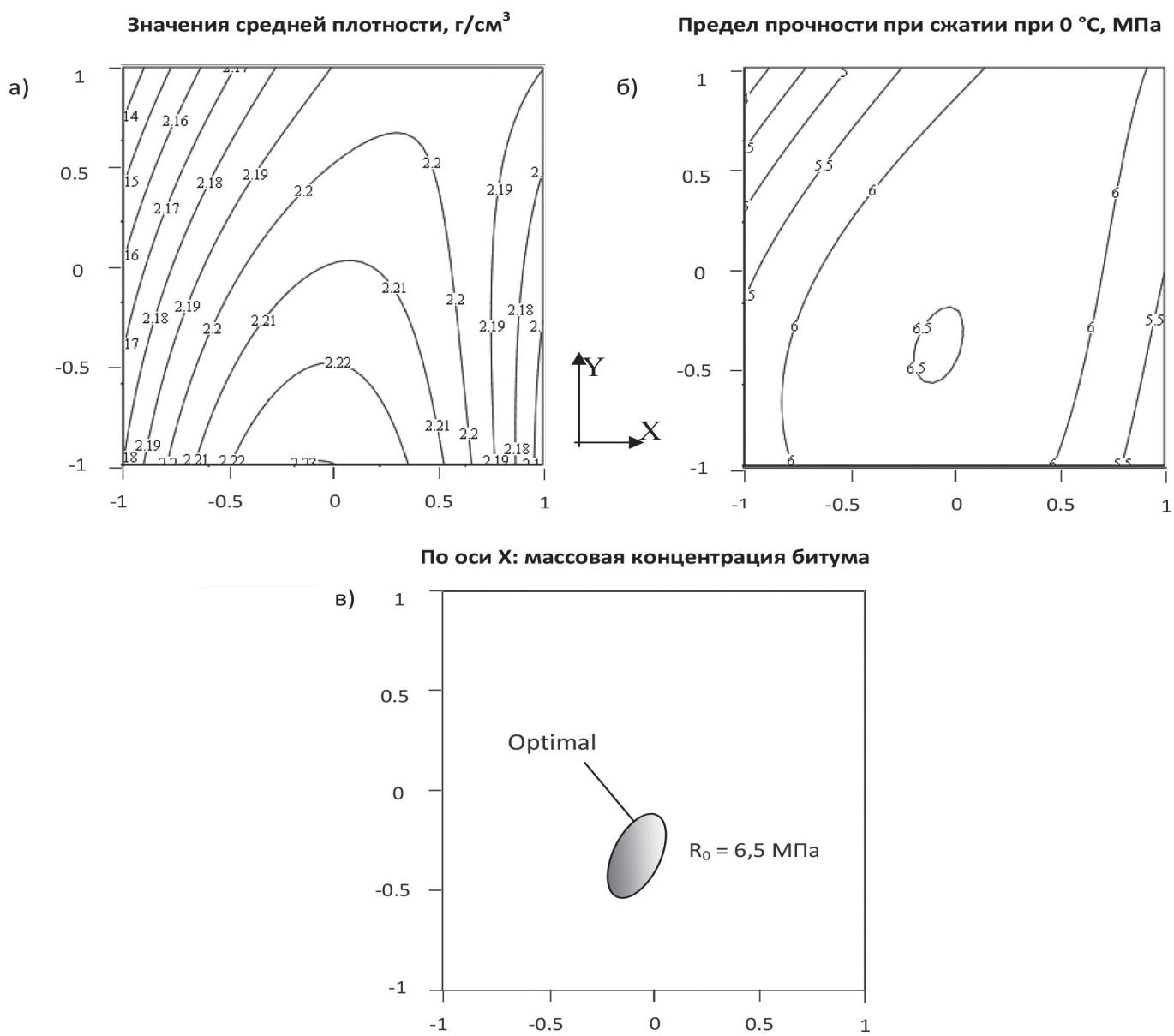


Рис. 1. Графики функций: а) средней плотности; б) предела прочности при сжатии; в) область оптимальных значений

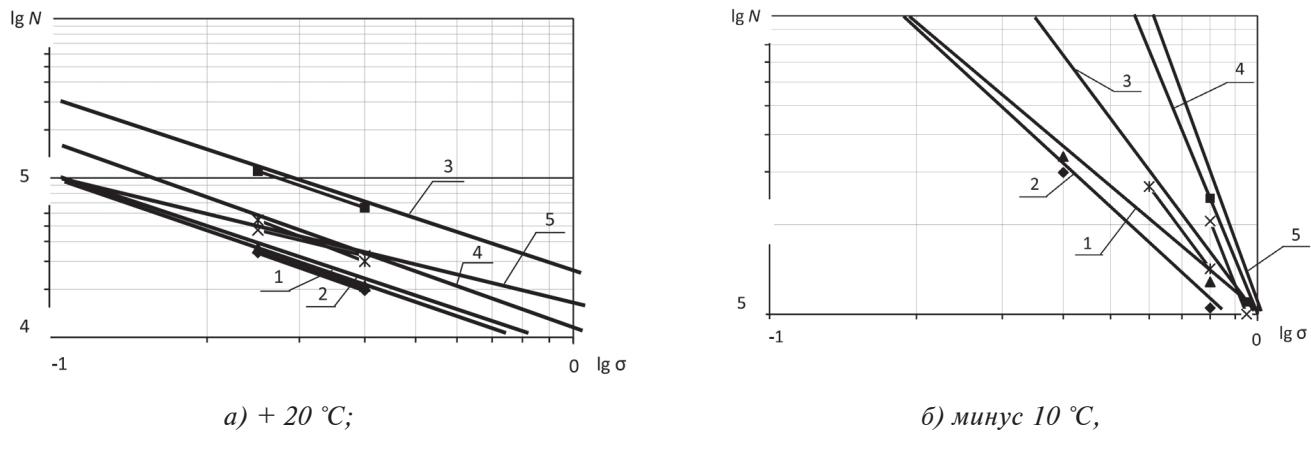


Рис. 2. Усталостная долговечность асфальтобетонов: 1 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «А»); 2 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»); 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»), с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом *Elvaloy-AM*; 4 – литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной микроструктурой *СКМС-30*. 5 – ЦМА-10 с добавкой *Antrocel-G*

асфальтобетонами типов «А» и «Б», тогда как предел прочности при изгибе достаточно высок (выше, чем у типов «А» и «Б»).

Данные, приведенные на рис. 3, свидетельствуют об усилении однородности коагуляционных контактов в ЩМА с комплексно-модифицированной микро-, мезо-, макроструктурой и более высокой адгезионной прочностью и меньшей величиной относительной деформации пленочного модифицированного органического вяжущего. В частности, модифицированный этиленглицидилакрилатом (2 % мас.) нефтяной дорожный битум БНД 130/200 ( $\Pi_{25} = 151$  град.) имеет интервал пластиичности 78 °C против ИП БНД 130/200 57 °C, эластичность при 0 °C – 62 %, против 0 %, а при 25 °C  $\mathcal{E}_{25} = 77$  % против 0 %, адгезия по ДСТУ Б.В.2.7-81-98 составляет 89 % против 18 %, когезия – 0,039 МПа против 0,022 МПа.

Характеристикой, которая позволяет косвенно оценить прочность асфальтобетона при высоких положительных температурах является испытание по методике Маршалла на устойчивость, условную пластичность и условную жесткость (табл. 4) [8, 9].

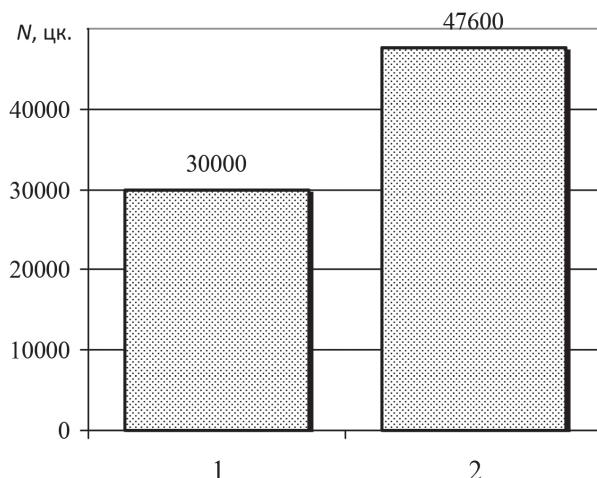
**Значение показателей, характеризующих сдвигостойчивость бетонов (тип «Б») по Маршаллу (температура испытания 60 °C)**

№ п/п	Состав асфальтобетонной смеси	Условная пластиичность, I /10, мм	Устойчивость, Р, Н	Условная жесткость, A, Н/мм
1	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип «Б»), приготовленная на битуме БНД 60/90; минеральный порошок – известняковый неактивирован.	46	15256	3316
2	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип «Б»), приготовленная на битумополимерном вяжущем (БНД 60/90 с 2,0 % бутадиенметилстирольного каучука СКМС-30 и 30 % технической серы); минеральный порошок – известняковый поверхностно активирован 0,5 % СКМС-30.	39	22981	5892
3	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип Б), приготовленная на битуме БНД 60/90, который модифицирован 2,0 % этиленглицидилакрилата в комбинации с 0,2 % полифосфорной кислоты ПФК-105; минеральные материалы поверхностно активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата.	37	30000	8108
4	Щебеноно-мастичная асфальтобетонная смесь, приготовленная на битуме БНД 60/90; минеральные компоненты поверхностно неактивированы.	46	12580	2735
5	Щебеноно-мастичная асфальтобетонная смесь, приготовленная на битуме БНД 60/90, который модифицирован 2,0 % этиленглицидилакрилата в комбинации с 0,2 % полифосфорной кислоты ПФК-105; минеральные материалы поверхностно активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата.	42	20100	4786

## ВЫВОДЫ

Установлено, что при различных температурах испытания усталостная долговечность асфальтобетонов с комплексно-модифицированной структурой значительно выше, по сравнению с обычными асфальтобетонами.

Рост усталостной выносливости в 1,5 – 2 раза наблюдается у асфальтобетона, в котором «битум модифицирован 2,0 % мас. этиленглицидилакрилатом марки Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105, а минеральные материалы, поверхностно активированы 0,7 % мас. Elvaloy-AM» и в 1,1 – 1,5 раз у литого асфальтополимербетона, в котором битум модифицирован 2,0 % мас. бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 + 30 % технической серы, минеральный порошок, поверхностно активирован 0,5 % мас. СКМС-30».



**Рис. 3. Сравнительные данные усталостной долговечности (20 °C, 0,4 – 0,45 МПа):  
1 – стандартный ЩМА-10; 2 – ЩМА-10 с комплексно-модифицированной структурой Elvaloy-AM**

**Таблица 4.**

**Значение показателей, характеризующих сдвигостойчивость бетонов (тип «Б») по Маршаллу (температура испытания 60 °C)**

## Список литературы:

1. Доля, А. Г. Эффективное использование вторичных ресурсов Донбасса в дорожном строительстве [Текст] / А. Г. Доля, Р. А. Доля // Харьков: Изд-во АТНТ, 2015. – 171 с.
2. Дорожный асфальтобетон / Гезенцев Л. Б., Горельшев Н. В., Богуславский А. М., Королев И. В. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
3. Золотарев, В. А. Дорожные асфальтобетоны. Избранные труды, том 3 [Текст] / В. А. Золотарев. – С.Пб: Славутич, 2015. – 184 с.
4. Иванськи, М. Основы улучшения и регулирования эксплуатационных свойств асфальтобетона: дис. доктора тех. наук: 05.23.05, 05.23.11 / М. Иванськи. – М., 2004. – 541 с.

5. Илиополов, С. К. Усталостное разрушение асфальтобетона в широком частотном диапазоне / С. К. Илиополов, Е. В. Углова, О. В. Дровалева // Дороги и мосты. – М.: РосдорНИИ, 2007. – № 17 (1). – С. 245–251.
6. Братчун, В. И. Теоретико-экспериментальные принципы получения модифицированных дорожных асфальтобетонов повышенной долговечности / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, Е. А. Ромасюк // Донецк: Изд-во ООО НПП «Фолиант», 2020. – 244 с.
7. Ромасюк, Е. А. Усталостная долговечность модифицированных асфальтобетонов при динамическом нагружении / Е. А. Ромасюк, В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, А. А. Стукалов // Современное промышленное и гражданское строительство. – Макеевка, 2015. – Т. 11, № 1. – С. 15–25.
8. Братчун, В. И. Асфальтополимербетонные смеси, модифицированные этиленглицидилакрилатом [Текст] / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, А. А. Стукалов, Е. А. Ромасюк // Международный научно-технический журнал «Наука и Техника в дорожной отрасли». РФ: Москва, ЗАО «Издательство «Дороги», 2015 (71) № 1. – С. 33–36
9. Химические процессы и формирование сетчатой структуры в битуме, модифицированном «Элвалоем АМ» – шлам нейтрализации травильных растворов (ШН), активированный полимерсодержащим отходом производства эпоксидных смол (ПОЭС) / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, Е. Э. Самойлова, Л. Д. Карат, М. К. Пактер // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры «Современные строительные конструкции и материалы» – 2006. – Т. 23. – С. 4–10.

# ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

К. Г. Кондрашин; Т. К. Курбатова; Н. А. Рактович; С. П. Стрелков, к.б.н.; Р. А. Петров

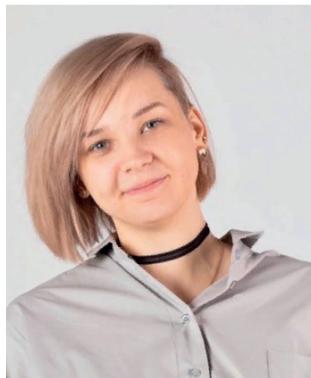
Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия



Кондрашин  
Кирилл Геннадьевич



Курбатова  
Татьяна Камильевна



Рактович  
Надежда Алексеевна



Стрелков  
Сергей Петрович



Петров  
Роман Андреевич

**Аннотация.** Исследования по использованию различных синтетических смол для укрепления грунтов впервые были начаты в СССР в 1954 г. под руководством проф. Г. С. Петрова в Химико-технологическом институте им. Д. И. Менделеева совместно с Научно-исследовательским институтом нефти и газа в целях изоляции пластовых вод созданием водонепроницаемых экранов в нефтяных скважинах. Проведенные исследования показали, что водопроницаемость песчаников после обработки их карбамидной смолой снижалась на 80-90 %. Уменьшение водопроницаемости песчаников после их обработки смесью карбамидной смолы и отвердителя (кислоты) происходит в результате полимеризации смолы в кислой среде при рН = 4,5. Образующийся при этом плотный гель прочно связывается с грунтовыми частицами и уменьшает активную пористость грунта.

**Ключевые слова:** слабые грунты, синтетические полимеры, укрепление, строительные технологии.

## ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Грунты являются основой, фундаментом, для производимых на них строительных работах. Крайне необходимо исследование текущего состояния грунтов, прогноз на будущее и определение возможности укрепления слабых грунтов. Слабые грунты являются препятствием расширения строительства зданий и сооружений, дорог и т.д.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Эффект укрепления на песчаниках был получен при использовании фурфуроловых смол с солянокислым анилином в качестве отвердителя (15-20 %) [5]. В течение последних лет проведен ряд исследовательских и опытно-производственных работ по применению синтетических смол в дорожном строительстве. Например, для укрепления песков и супесей была применена смола МФ-17 с отвердителями щавелевой кислоты. Опыты показали высокую эффективность смолы при укреплении грунтов, находящихся в воздушно-сухом и оптимально-влажностном состояниях.

**Целью** данного исследования является изучение применения синтетических полимеров для укрепления слабых грунтов.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Синтетические смолы являются высокомолекулярными соединениями – полимерами.

Полимерами называют вещества, молекулы которых состоят из многочисленных элементарных звеньев, соединенных между собой силами химической связи в длинные цепи линейного или пространственного строения. Процесс соединения ряда одинаковых молекул (монаомеров) в одну большую макромолекулу называется *полимеризацией*.

В зависимости от условий полимеризации возникают полимеры с разной длиной цепи, то есть разным молекулярным весом (полидисперсностью). Считают, что с увеличением молекулярного веса активность полимеров при взаимодействии с грунтами быстро достигает максимума, а затем падает. Это явление связывают с вязкостью полимеров и их способностью адсорбироваться грунтовыми частицами.

Многие физические свойства высокомолекулярных полимеров тесно связаны с величиной макромолекул, их структурой и молекулярным весом. По форме макромолекулы делятся на линейные, разветвленные и пространственные.

Полимеры линейной структуры (полиакриламид, полиакрил, полиакрилат кальция и др.) размягчаются при нагревании и отвердеваются при охлаждении, растворяются или набухают в различных растворителях. Их свойства можно легко изменить введением молекул других мономеров.

Полимеры разветвленной структуры (полиизобутилен, полипропилен и т. п.) обладают высокой эластичностью.

Полимеры пространственной структуры представляют собой твердые, неплавкие и нерастворимые вещества.

Синтетические смолы – твердые или жидкые смеси родственных и взаиморастворимых органических высокомолекулярных веществ. Принято считать, что к высокомолекулярным относятся такие соединения, которые имеют молекулярный вес не менее 5000.

В зависимости от поведения высокомолекулярных синтетических смол под воздействием температуры их разделяют на термоактивные, термопластичные и термостабильные [4].

Термоактивные смолы при нагревании легко переходят в вязкотекущее состояние, но при длительном действии высоких температур в результате химических реакций переходят в твердое нерастворимое вещество. К термоактивным относятся фенол альдегидные и мочевиноальдегидные смолы, а также смолы на основе глицерина и многоосновных кислот.

Термопластичные смолы при нагревании приобретают повышенные пластические свойства, а при охлаждении вновь возвращаются в упругопластичное состояние без изменения основных свойств. К этому типу высокомолекулярных соединений относятся полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид и т. п.

Термостабильные смолы при нагревании не переходят в пластичное состояние и мало изменяют физические свойства.

Синтетические смолы имеют комплекс свойств очень важных для укрепления грунтов. К таким свой-

ствам относятся: высокие адгезионные и когезионные связи; регулируемое и быстрое отвердение смолы, высокие прочностные свойства грунтовых смесей, приготовленных на основе синтетических смол; сравнительно небольшие расходы смолы для укрепления грунтов.

Из синтетических смол для укрепления грунтов наиболее часто применяют мочевино- и меламиноформальдегидные, фурфуроланиловые, фенолформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические и другие смолы.

Мочевиноформальдегидные или карбамидные смолы – весьма перспективная группа смол для улучшения инженерно-геологических свойств грунтов. Они представляют собой продукты поликонденсации мочевины (карбамид  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  с формальдегидом  $\text{CH}_2\text{O}$ ).

Отечественная промышленность выпускает мочевиноформальдегидные смолы следующих марок: М.Ф, МФ-17, М, М-1, МСБ, К 411-02, БДМ. В технической мелиорации грунтов для укрепления лессов, лесовых суглинков, песков и супесей применяют главным образом смолы МФ-17, крепители М и К.

В качестве отвердителей карбамидных смол используют технические кислоты – соляную, фосфорную, щавельную, а также хлоридаммония, суперфосфат и т. п. Зависимость времени гелеобразования карбамидной смолы от вида и количества отвердителя показана на рис. 1. Смолы хорошо растворяются в воде в любых пропорциях, могут твердеть при обычных температурах и давлениях, на холода, в пористой среде, образуя в воде прочные продукты – пространственные полимеры. Поэтому карбамидные смолы стали широко применяться для укрепления грунтов.

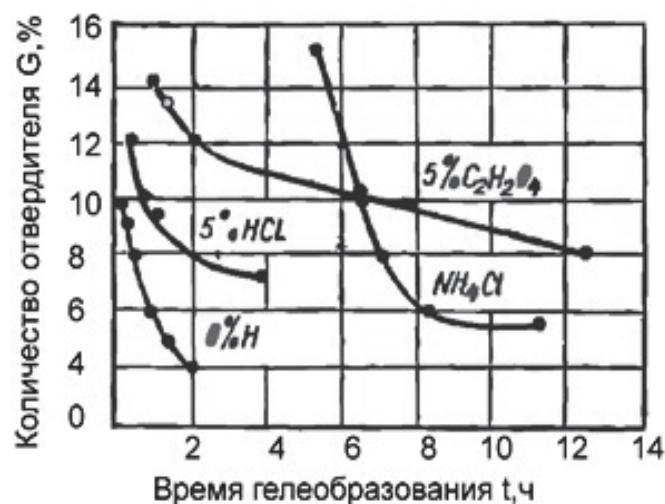


Рис. 1. Зависимость времени гелеобразования карбамидной смолы от вида и количества отвердителя

Меламиноформальдегидные смолы получают поликонденсацией меламина  $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}(\text{NH}_2)_3$  с формальдегидом  $\text{CH}_2\text{O}$ . Они отвердеваются при нагревании, а если есть катализаторы – на холода. Меламиноформальдегидные смолы так же, как и карбамидные, растворяются в воде и не растворяются в органических растворах. Они отвердеваются в кислой, нейтральной и

щелочной среде. В меламиноформальдегидных смолах содержится много реакционноспособных групп, поэтому отвердевшие полимеры имеют много перечных связей, чем и объясняется их прочность и водостойкость. В качестве катализаторов можно использовать щавельную и другие кислоты, хлорид аммония, сульфат аммония и т. п.

Кроме мочевиноформальдегидных и меламиноформальдегидных смол широко применяют для укрепления песчаных грунтов смешанные меламино-мочевино-формальдегидные смолы.

Фурфуроланиловые смолы (ФАС) образуются при взаимодействии фурфурола  $C_4H_3OCNO$  с анилином  $C_6H_5NH_2$ . Эти смолы получили наибольшее распространение при стабилизации грунтов. В грунт фурфурол и анилин можно вводить в виде смеси или раздельно. Однако не все грунты можно укреплять ФАС.

Фенолформальдегидные смолы – продукт взаимодействия фенола и формальдегида. Процесс образования фенолформальдегидных смол и их свойства зависят в основном от химического состава и строения фенолов, мольного соотношения между фенолом и формальдегидом и реакции среды.

Для укрепления грунтов применяют фенолформальдегидные смолы марок ВИАМ-Б, ЦНИИМОД № 26 и т. п. Они стойкие по отношению к воде и химическим реагентам. Фенолформальдегидные смолы перспективны для укрепления глинистых грунтов.

Эпоксидные смолы – это вещества, которые содержат в своих молекулах трехчленный цикл, образованный атомом кислорода и двумя атомами углерода, и названный эпоксидной группой. Структура эпоксидной группы является напряженной, поэтому трехчленный цикл стремится раскрыться и вступает в различные реакции. Таким образом, эпоксидная группа обладает высокой реакционной способностью. Для этой группы характерны реакции присоединения веществ, содержащих группы с одним или несколькими подвижными атомами водорода. Эти реакции сопровождаются раскрытием цикла с образованием гидроксильной группы. Примерами могут быть реакции взаимодействия эпоксидных соединений со спиртом, фенолами, кислотами, аминами. Превращение линейных эпоксидных соединений в трехмерные полимеры называется отверждением. Эпоксидные соединения (олигомеры), которые могут отверждаться, принято называть эпоксидными смолами.

Из большого многообразия эпоксидных смол наиболее распространенными являются диановые, в суммарном выпуске эпоксидных смол их производство превышает 90 %. Отечественная промышленность выпускает эпоксидные диановые смолы следующих марок: ЭД-5, ЭД-6, ЭД-П, ЭД-Л, ЭД-37 и ЭД-40.

Эпоксидные смолы получают тремя методами:

1) взаимодействием эпоксидных соединений с полуфункциональными соединениями, содержащими подвижные атомы водорода, например, между эпихлоридрином и фенолами, резорцином, анилином, гликолями и т. д.;

2) введением эпоксидных групп в ненасыщенные соединения, воздействием надкислот (надуксусной  $CH_3CO_3H$ , надбензойной  $C_6H_5CO_3H$  и т. п.);

3) диановые смолы получают в процессе конденсации дифенилпропана (диана) с эпихлоридрином в присутствии щелочи.

Эпоксидные смолы могут быть использованы для укрепления любых грунтов, однако пока стоимость их высокая.

Из кремнийорганических смол широко применяются полиорганосилоксаны. Основным преимуществом кремнийорганических полимеров является их высокая гидрофобность. Промышленность выпускает полиорганосилоксановые смолы марок Ф-9, ЭФ и К. Но особенно эффективны для гидрофобизации грунтов кремнийорганические жидкости ГКЖ-10 и ГКЖ-11.

Синтетические смолы, применяемые для укрепления грунтов, должны отвечать следующим основным требованиям [1]:

1) легко растворяться или диспергировать в воде при введении полимера в грунт, перемешивании и уплотнении смеси;

2) не растворяться в воде и не смачиваться после завершения стадии затвердевания смеси;

3) обязательна активная связь непосредственно между минеральными частицами и полимером, а также способность увеличения сохранения сил сцепления в системе грунт – вода – полимер или грунт – полимер;

4) противостоять физическим и химическим воздействиям и биологическому разложению;

5) возможность производства работ при температуре 30-0 ° С и при повышенной влажности грунтов;

6) относительно небольшая стоимость, незначительный расход и недороговизна синтетических смол.

Инженерно-геологические свойства грунтов, укрепленных синтетическими смолами, определяются главным образом контактной прочностью искусственного цемента и частиц грунта, то есть прочностью вновь созданных структурных связей [3]. Новые структурные связи образуются в результате взаимодействия минералов грунта, воды и синтетической смолы вследствие сложного комплекса физических, физико-химических и химических процессов и явлений. Наличие или отсутствие естественных структурных связей у грунтов оказывается на образовании искусственной структуры грунта.

Учитывая структурные особенности естественных грунтов, рассмотрим отдельно механизм взаимодействия разделнозернистых и связанных грунтов с синтетическими смолами.

Глубокой и стройной теории взаимодействия несвязанных грунтов с синтетическими смолами в настоящее время не существует. Пока что имеются отдельные работы по исследованию некоторых вопросов сложного процесса взаимодействия несвязанных грунтов с реагентами [2]. Результаты выполненных исследований показывают, что процессы и явления в системе песок – химический реагент определяются величиной поверхности, то есть величиной дисперсности грунтов, минеральным составом и физико-химическими особенностями.

С увеличением дисперсности происходит усиление молекулярных связей, поскольку происходит

увеличение общей поверхности, а так же количество углов и кромок кристаллов, то есть местами не имеющих компенсаций, зарядов. Исходя из этого, мелко-зерные пески имеют большее число активных центров по сравнению с крупнозерными.

Действие минеральной структуры песков на прочность сцепления выявляется через энергетическую способность минералов: чем выше энергетическая способность, тем быстрее и прочнее образуются связи на границе раздела минерал – смола.

Среди песчаных грунтов чистые по минеральному составу разновидности встречаются довольно редко. Чаще всего мы имеем дело с кварцевыми или полевошпатовыми песками с примесью слюд, роговой обманки и других породообразующих минералов.

Для характеристики степени активности различных минералов при взаимодействии с синтетическими смолами были использованы данные опытов по определению краевого угла смачивания [7]. Для повышения адгезионной способности рекомендуется применять комплексный отвердитель, представляющий собой слабый раствор хлорного железа в 4-5 %-ной соляной кислоте [8].

Адгезионные свойства зависят и от состояния поверхности частиц минералов. Качество минеральной поверхности характеризуется наличием или отсутствием аутигенных пленок.

В соответствии с этим выделяются следующие группы песчаных грунтов:

- 1) пески чистые, без каких-либо аутигенных пленок;
- 2) пески с сильно развитой аутигенной пленкой;
- 3) пески со слабо развитой аутигенной пленкой на поверхности зерен.

Взаимодействие чистых песков или песков со слабо развитой аутигенной пленкой на поверхности зерен с синтетическими смолами определяется различной энергетической способностью составляющих минералов [10]. В песках, отличающихся более развитой аутигенной пленкой, процессы взаимодействия определяются ее типом. Пленки из глины, состоящие из минералов группы каолинита и гидрослюд, указывают на сравнительно повышенную поглощающую способность, обменное поглощение и другие отличительные черты, свойственные глиняным минералам. Пленки, с присутствием в их составе железа, полученные гетит-гидрогетитовыми и гематит-гидрогетитовыми минералами, меняют характер и интенсивность слияния в зависимости от степени кристаллизации.

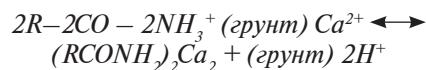
#### Взаимодействие синтетических смол с глинистыми грунтами

Механизм взаимодействия синтетических смол с глинистыми грунтами сложный и изучен недостаточно. Это связано с тем, что на процессы взаимодействия смол с глинистыми грунтами оказывает влияние больше факторов, чем на процессы взаимодействия с песчаными. Кроме гранулометрического состава, состава обменных катионов и емкости обмена, существенную роль играют также величины pH среды и состав растворимых солей.

Сложная геологическая структура застраиваемой территории часто является основным препятствием работ. И переработка проекта по строительству потен-

циально несёт в себе удорожание работ в несколько раз. В этом ключе применение укрепляющих материалов для слабых или неоднородных грунтов является наиболее эффективным и недорогостоящим процессом.

Результаты рентгеноструктурных и электроноскопических исследований показали, что поликатионы смол при взаимодействии с суспензиями монтмориллонита и каолинита адсорбируются на внешней поверхности кристаллов. Одновременно установлено некоторое увеличение межпакетных расстояний в кристаллической решетке монтмориллонита, что свидетельствует о катионном обмене по схеме:



Ионы водорода смолы обмениваются на ионы  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ , содержащиеся в грунтах. Вытесненный кальций при определенной концентрации вызывает коагуляцию смолы. Выпадая в осадок, смола покрывает поверхность частиц и заполняет поры между ними, что способствует их склеиванию [9].

Второй важный фактор процесса взаимодействия смол и грунтов – способность полимеров образовывать водородные (водопрочные) связи. Количество водородных связей, а следовательно, и водопрочность возникающих агрегатов при обработке каолинитовых частиц определяется величиной pH среды.

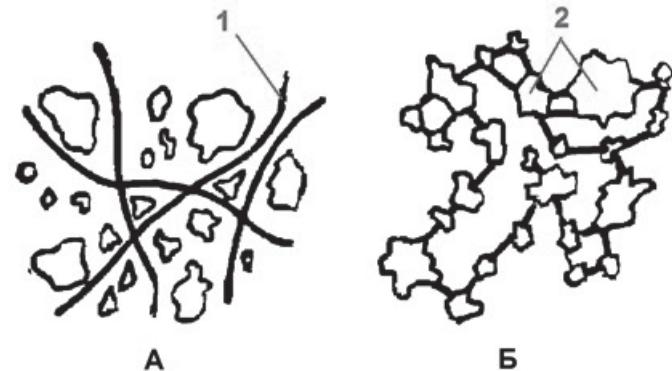


Рис. 2. Схема взаимодействия полимеров с грунтами:  
А – без участия грунтовых частиц; Б – с включением грунтовых частиц в структурную сеть, образованную полимерами и грунтом; 1 – полимерные цепи; 2 – частицы грунта и их микроагрегаты.

Взаимодействие грунтов с малыми количествами синтетических смол и образование при этом максимальной прочности смологрунтовой смеси может происходить по двум принципиальным схемам [6].

1. Линейные цепи полимера, пронизывая грунт, образуют пространственный каркас (сетку), в котором заключены минеральные частицы и агрегаты. Поверхность последних взаимодействует с полимером только в случаях непосредственного контакта. В данной системе (рис. 2, А) частицы и микроагрегаты грунта почти не участвуют в создании каркаса из полимерных цепей, и прочных связей между полимерным каркасом и минеральными частицами нет.

2. Полимерные цепи непосредственно соприкасаются с частицами и агрегатами грунта, которые

участвуют в образовании полимерной сетки и создают единую пространственную структуру, в которой минеральные частицы срашиваются с полимерными цепями (рис. 2, Б).

Что касается прочности смологрунтовой смеси, то вторая схема более эффективна.

## ВЫВОДЫ

Полимерная стабилизация почвы — это метод добавления полимеров в почву для улучшения общих физических свойств. Другими словами, полимер связывает частицы почвы вместе, что очень похоже на функцию клея [11]. Полимеры традиционно применяются в жидкой форме и менее разбавлены, чем другие методы стабилизации грунта, а это означает, что требуется больше продукта, чем других средств стабилизации грунта. В настоящее время полимеры обычно используются для грунтовых поверхностей, таких как грунтовые дороги, дорожки или временная облицовка пруда.

## Список литературы

1. Bartolomey, A. *The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals* [Текст] / A. Bartolomey, A. Bogololov, V. Kleveko, A. Ponomarev, V. Ofrikhter // *Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. — Amsterdam, Netherlands, 1999. — Vol. 2. — P. 1197-1202.
2. Leshchinsky, G. *Geosynthetic confined pressurized slurry (GeoCoPS)* [Текст] / G. Leshchinsky, O. Leshchinsky // *Tech. Rep. CPAR-GL96-1 / U. S. Army Corps of Engineers*.  
™ Washington. D.C., 1996.
3. Алексеев, С. И. Электроосмос как способ улучшения физических и механических свойств связных грунтов [Текст] / С. И. Алексеев, Д. Н. Понедельников, И. В. Копылов, Г. Р. Курбанов // Техника и технология. — 2012. — № 4. — С. 86-93.
4. Гумаргалиева, К. З. Деструкция полимеров в биологически-активных и модельных средах. [Текст] / Кинетические аспекты. Автореферат. 35 с. 1997.
5. Инъекционное химическое закрепление грунтов. [Текст] Термическое закрепление грунтов: типовая технологическая карта. — СПб., 2009.
6. Куликов, Ю. Н., Куликова, Е. Ю. *Материалы конструкций подземных сооружений. Часть 3 «Полимеры и инъекционные растворы на их основе»*. [Текст] / Ю. Н. Куликов, Е. Ю. Куликова, Учебное пособие. РИО. МГИ. 1992.
7. Пименов, А. Т., Выбор составов для упрочнения элементов подземных сооружений [Текст] А. Т. Пименов, Е. В. Биркина // Известия вузов. Строительство. — 2001. — № 9. С. 24-25.
8. Ржаницын, Б. А. *Химическое упрочнение грунтов в строительстве*. [Текст] / — М.: Стройиздат. 1986.
9. Sharma, R. *Soil Improvement Techniques for Mitigation of Seismic Hazards – An Overview*. Geology. 2010
10. Padfield, C.J. *Settlement of Structures on Clay Soils*. CIRIA, Spec Publ 1983, p.27.
11. Fakhar, A.M.M.M. *Road maintenance experience using polyurethane (PU) Foam injection system and geocrete soil stabilization as ground rehabilitation*. / A.M.M.M/ Fakhar, A. Asmaniza. // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 136 (1) (2016), Article 012004.

# ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРА НА ОСНОВЕ РАСШИРЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ В ТЯЖЕЛОМ ЦЕМЕНТНОМ БЕТОНЕ

А. В. Назарова, к.т.н.; С. В. Сороканич, к.т.н.; Д. С. Коваленко

ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет им. В. Даля»

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты выполненной оптимизации состава комплексного модификатора на основе расширяющей добавки для тяжелого цементного бетона. В качестве параметров рассматриваемых переменных факторов при планировании эксперимента приняты: содержание оксидносульфоалюминатной расширяющей добавки и поликарбоксилатного суперпластификатора. Целью оптимизации является получение комплексного модификатора бетона, который способен обеспечить марку по подвижности бетонной смеси П4 и предел прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 40 МПа для бетонов с пониженной усадкой. Для достижения заданной цели область оптимальных значений лежит в следующих пределах: содержание расширяющей добавки – 8...10,5 % от массы цемента, а содержание суперпластификатора «MasterGlenium 115» – 1,3...1,5 %.

**Ключевые слова:** тяжелый бетон, усадка, расширяющая добавка, оптимизация состава, осадка конуса, прочность при сжатии.



Назарова  
Антонина Васильевна



Сороканич  
Станислав Васильевич



Коваленко  
Денис Сергеевич

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Долговечность является одним из требований к любому конструктивному материалу, то есть способностью его в определенных условиях внешнего воздействия не изменять свои свойства. При этом большинство этих материалов теряют свои свойства вследствие развития в них трещинообразования, разделяющих их на отдельные элементы, неспособные противостоять воздействиям внешней среды. Для тяжелых цементных бетонов зарождение и развитие в нем трещин способствует попаданию различных агрессивных веществ в эти трещины, что ведёт к развитию коррозии бетона и арматурной стали. Как правило, возникновению трещин в изделиях из бетона способствуют деформации усадки и расширения [1-4].

Одним из способов снижения деформаций усадки является введение расширяющих добавок в состав бетонов. При применении этих добавок в составах комплексных добавок-модификаторов бетонов возможно получить полифункциональный эффект и полностью реализовать потенциал всех компонентов [5, 6].

В данной работе был разработан и оптимизирован состав комплексного модификатора на основе расширяющей добавки оксидносульфоалюминатного типа. В качестве этой добавки обычно выступает смесь из глиноземсодержащего, сульфатного и оксидного компонентов. Расширение осуществляется при взаимодействии алюминатных и сульфатсодержащих фаз с образованием игольчатых кристаллов этtringита, а также дополнительно за счет новообразований оксидов кальция из оксидного компонента. Глиноземсодержащим компонентом принята шамотно-каолиновая пыль (отход производства Донбасского региона, получаемый из электрофильтров вращающихся печей при обжиге шамота), характеризующаяся высокой дисперсностью частиц и повышенным содержанием  $Al_2O_3$ .

(до 40 %). Гипсовый камень использовался в качестве сульфатного компонента. Оксидным компонентом принята известь.

Целью работы является оптимизация состава комплексного модификатора с расширяющей добавкой оксидносульфоалюминатного типа в тяжелом цементном бетоне с пониженной усадкой по величине содержания расширяющей добавки и поликарбоксилатного суперпластификатора для обеспечения требуемых показателей подвижности бетонной смеси и предела прочности при сжатии бетона в проектном возрасте.

### ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ПЦ) производства ОАО «Новороссцемент» (г. Новороссийск, РФ);
- природный кварцевый песок (П) Лутугинского песчаного карьера с модулем крупности 1,35;
- щебень фракции 5-20 (Щ) Торезского карьера;
- активный минеральный дисперсный заполнитель – микрокремнезем (МК);
- расширяющая оксидносульфоалюминатная добавка (ОСА) на основе шамотно-каолиновой пыли (65 %), гипса (30 %) и извести (5 %);
- поликарбоксилатный суперпластификатор (СП) «MasterGlenium 115»;
- техническая вода (В).

Подвижность бетонных смесей определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний», предел прочности при сжатии бетонных образцов определяли на образцах-кубах с размером ребра 0,1 м, твердевших в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Оптимизацию составов бетона выполняли с применением метода математического планирования эксперимента (ПФЭ 2<sup>k</sup>). Статистический анализ и обработку полученных результатов проводили на основе статистических моделей в соответствии с [7].

Матрица планирования и результаты эксперимента (подвижность смеси)

№ оп.	Кодированное значение факторов		Натуральное значение факторов		Выходная переменная (осадка конуса, см)			Расчетные показатели	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	y <sub>u1</sub>	y <sub>u2</sub>	ȳ <sub>u</sub>	s <sub>u2</sub>	ȳ̂ <sub>u</sub>
1	+1	+1	1,5	12	18	17	17,5	0,5	16,87
2	-1	+1	1,1	12	8	11	9,5	4,5	10,07
3	+1	-1	1,5	8	18	20	19	2	19,67
4	-1	-1	1,1	8	13	14	13,5	0,5	12,87

Матрица планирования и результаты эксперимента (прочность при сжатии)

№ оп.	Кодированное значение факторов		Натуральное значение факторов		Выходная переменная (предел прочности при сжатии, МПа)				Расчетные показатели	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	y <sub>u1</sub>	y <sub>u2</sub>	y <sub>u3</sub>	ȳ <sub>u</sub>	s <sub>u2</sub>	ȳ̂ <sub>u</sub>
1	+1	+1	1,5	12	34	36,5	35	35,17	3,16	36,5
2	-1	+1	1,1	12	42	40,7	41,5	41,4	0,86	41,3
3	+1	-1	1,5	8	43,7	42,1	45,3	43,7	5,12	40,1
4	-1	-1	1,1	8	41,5	42,6	43,7	42,6	2,42	44,9

Графическую интерпретацию уравнений выполняли с использованием программного комплекса «MathCAD for Windows».

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе после выполненных экспериментальных исследований в качестве базового был принят состав бетонной смеси, который характеризовался маркой по подвижности П4 и пределом прочности в возрасте 28 суток 42,7 МПа, а расход компонентов составлял: ПЦ = 400 кг; П = 545 кг; Щ = 1 170 кг; В = 175 л; ОСА = 40 кг; МК = 38 кг; СП = 5,2 л. На основе метода планирования эксперимента ПФЭ = 2<sup>k</sup> выполнена оптимизация состава комплексного модификатора на основе расширяющей оксидносульфоалюминатной добавки для тяжелого цементного бетона по величине содержания расширяющей добавки (на основе шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести) и содержания поликарбоксилатного суперпластификатора.

В качестве параметров оптимизации комплексного модификатора приняты:

Y<sub>1</sub> – подвижность бетонной смеси (границы значения – не менее 16 см, не более 21 см);

Y<sub>2</sub> – предел прочности бетона при сжатии в проектном возрасте (с границами значениями не менее 40 МПа).

В качестве рассматриваемых переменных факторов при планировании эксперимента приняты:

X<sub>1</sub> – количество добавки СП, % от расхода цемента;

X<sub>2</sub> – количество расширяющей добавки ОСА, % от расхода цемента.

Значения факторов варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Значение факторов варьирования

Код фактора	Интервал варьирования	Уровни фактора		
		-1	0	+1
X <sub>1</sub>	0,2	1,1	1,3	1,5
X <sub>2</sub>	2	8	10	12

Матрица планирования и результаты экспериментов по подвижности бетонной смеси и прочности при сжатии представлены в таблицах 2, 3 соответственно.

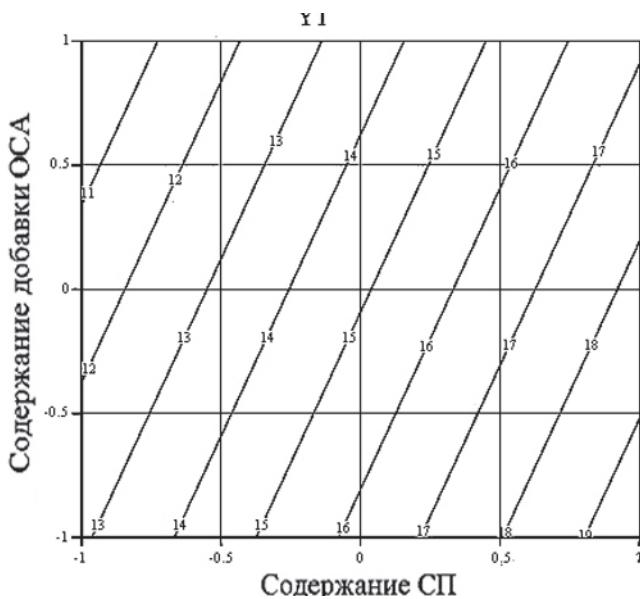
Таблица 2.

Таблица 3.

Проверка значимости коэффициентов математических моделей выполнена по критерию Стьюдента, адекватность математических моделей проверена по критерию Фишера. Были получены следующие уравнения регрессии:

$$\hat{y}_1 = 14,87 + 3,4X_1 - 1,4X_2 \quad (1)$$

$$\hat{y}_2 = 40,7 - 2,4X_1 - 1,8X_1X_2 \quad (2)$$



Формулы перехода от кодированных значений факторов эксперимента к натуральным для уравнений 1 и 2 соответственно имеют вид:

$$X_1 = \frac{x_1 - 1,3}{0,2}; \quad X_2 = \frac{x_2 - 10}{2}. \quad (3, 4)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии (1), характеризующего изменение подвижности бетонных смесей от действующих факторов ( $X_1, X_2$ ), представлена на рис. 1.

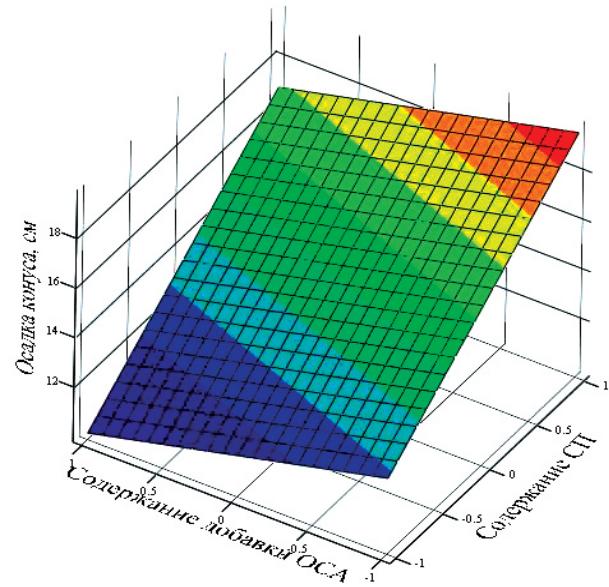


Рис. 1. Графическая интерпретация уравнения регрессии (1), характеризующего изменение подвижности бетонных смесей от действующих факторов ( $X_1, X_2$ )

Установлено, что на величину подвижности бетонной смеси в большей мере оказывает влияние фактор ( $X_1$ ) – содержание суперпластификатора, чем расширяющей добавки ОСА ( $X_2$ ). Повышение содержания добавки СП приводит к повышению подвижности бетонной смеси, напротив, повышенное содержание до-

бавки ОСА снижает её технологические свойства, что является следствием высокой водопотребности компонентов этой добавки. Графическая интерпретация уравнения регрессии (2), характеризующего изменение предела прочности при сжатии бетона от действующих факторов ( $X_1, X_2$ ), представлена на рис. 2.

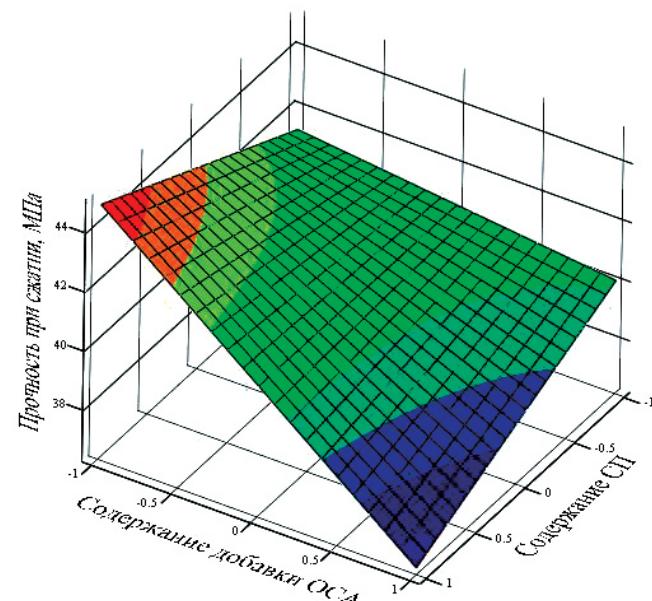
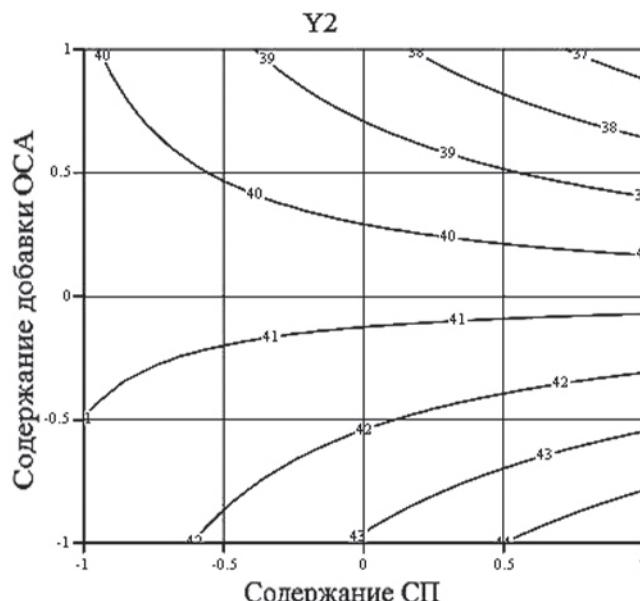


Рис. 2. Графическая интерпретация уравнения регрессии (2), характеризующего изменение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток от действующих факторов ( $X_1, X_2$ )

Показано, что прочность бетона при сжатии повышается при увеличении дозировки суперпластификатора (фактор  $X_1$ ) и снижении расхода добавки ОСА (фактор  $X_2$ ). Также присутствует вторая зависимость повышения прочности: при повышении содержания расширяющей добавки ОСА необходимая прочность (40 МПа) достигается при снижении количества СП.

В соответствии с принятymi граничными значениями функций отклика: марка по подвижности бетонной смеси П4, предел прочности при сжатии бетона в проектном возрасте не менее 40 МПа, область оптимальных составов бетонных смесей по величине содержания расширяющей оксидносульфоалюминатной добавки (ОСА=8...10,5 %) и суперпластификатора (СП=1,3...1,5 %) представлена на рис. 3.

При расчетах экономической эффективности за базовый вариант принят состав бетона с прочностью при сжатии  $R_{сж} = 43,8$  МПа, в котором расширяющим компонентом принята порошкообразная добавка «Expancrete» итальянской фирмы «Marei», а в качестве разработанного – состав бетона с прочностью при сжатии  $R_{сж} = 43,0$  МПа с оптимизированной по составу расширяющей оксидносульфоалюминатной добавкой на основе шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести.

Калькуляция стоимости сырьевых материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона по базовому и разработанному вариантам составов приведена в таблице 4.

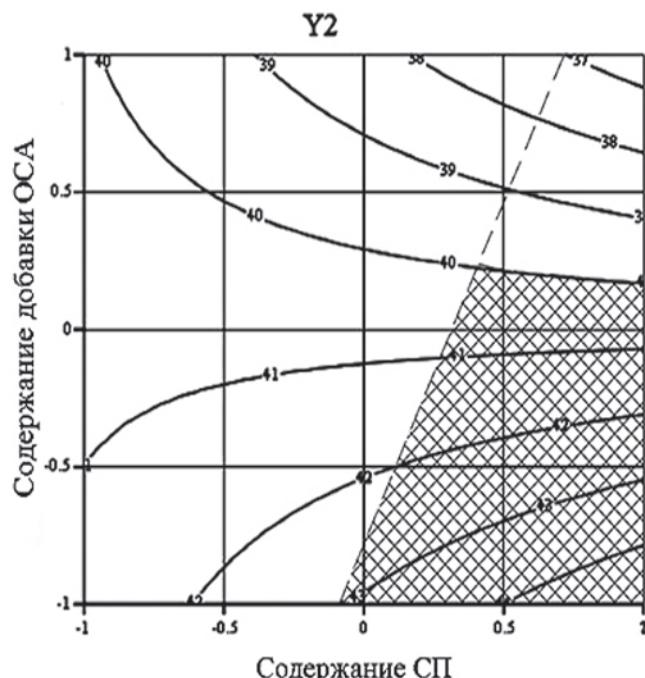


Рис. 3. Область оптимальных составов тяжелого цементного бетона с комплексным модификатором на основе расширяющей добавкой ОСА

Таблица 4.

Калькуляция стоимости сырьевых материалов

Наименование сырьевых материалов	Ед. изм.	Стоимость материала, руб.	Расход на 1 м <sup>3</sup> бетона	Стоимость на 1 м <sup>3</sup> бетона
1	2	3	4	5
Базовый состав				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор Master Glenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Expancrete	кг	100	28	2800
Итого:				8113,67
Состав с добавкой ОСА				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор MasterGlenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Добавка ОСА:				
– шамотно-каолиновая пыль	кг	15	20,8	312
– гипс	кг	4	9,6	38,4
– известь	кг	7	1,6	11,2
Итого:				5675,27

Согласно данным таблицы 4, экономическая эффективность по показателю стоимости сырьевых материалов на 1 м<sup>3</sup> модифицированного бетона при замене фирменной расширяющей добавки «Expancrete» разработанной добавкой ОСА составит:

$$\mathcal{E} = 8113,67 - 5675,27 = 2438,4 \text{ руб.}$$

## ВЫВОДЫ

По результатам выполненной оптимизации состава комплексного модификатора на основе расширяющей добавки для тяжелого цементного бетона с пониженной усадкой по содержанию расширяющей добавки и суперпластификатора было установлено, что

для обеспечения марки бетонной смеси по подвижности П4 и предела прочности при сжатии бетона в проектном возрасте не менее 40 Мпа область оптимальных составов находится в следующих пределах: содержание расширяющей добавки оксидносульфоалюминатного типа 8...10,5 % от массы цемента; содержание суперпластификатора «MasterGlenium 115» – 1,3...1,5 %.

По итогам расчетов экономической эффективности по показателю стоимости сырьевых материалов на 1 м<sup>3</sup> модифицированного бетона при замене фирменной расширяющей добавки «Expancrete» разработанной добавкой ОСА сумма составит 2 438,4 руб.

#### Список литературы

1. Батраков, В. Г. Модификаторы бетона – новые возможности [Текст] / В. Г. Батраков // Мат-лы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. – М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. – Кн. 1. – С. 184-208.
2. Холмянский, М. М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность [Текст] / М. М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1997. – 576 с.
3. Рамачандран, В. Наука о бетоне [Текст] / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
4. Kurdowski, W. Cement and concrete chemistry [Text] / W. Kurdowski. – Springer Publ., 2014. – 700 p.
5. Кардумян, Г. С. Новый органо-минеральный модификатор серии «МБ» – Эмбелит для производства высококачественных бетонов [Текст] / Г. С. Кардумян, С. С. Каприев // Строительные материалы. – № 8, 2005. – С. 12-15.
6. Кирсанова, А. А. Высокофункциональные тяжелые бетоны, модифицированные комплексными добавками, включающими метаколин [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / А. А. Кирсанова – Томск, 2016. – 164 с.
7. Вознесенский, В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов [Текст] / В. А. Вознесенский, В. Н. Выровой, В. Е. Керш, Т. В. Ляшенко – К.: Будивельник, 1983. – 144 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СТРЕЛЫ ТРОСОВОГО КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУЗА

Т. В. Луцко, к.т.н., доцент; С. В. Мишин; А. А. Родин

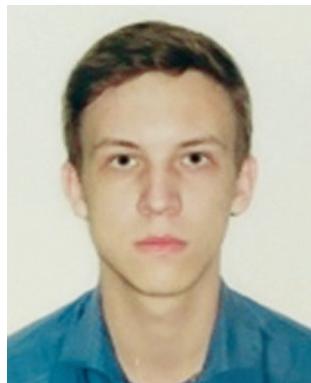
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

**Аннотация.** В статье проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния телескопической стрелы тросового крана-манипулятора при его нагружении. В качестве объекта исследования принята телескопическая стрела с четырехгранным и шестигранным поперечными сечениями. Для анализа использовался программный комплекс Компас-3D АРМ FEM: Система прочностного анализа. Полученные результаты позволили оценить прочностные и жесткостные параметры рассматриваемых конструкций стрел тросового крана-манипулятора. Построены графики зависимостей перемещений оголовка стрелы при нагружении в вертикальной и горизонтальной плоскостях. На основании полученных данных скорректированы грузовысотные характеристики крана-манипулятора, которые способствуют точному позиционированию груза на место погрузки и повышают безопасность погрузочно-разгрузочных работ. Уточненные грузовысотные характеристики крана-манипулятора представлены в виде аналитических зависимостей.

**Ключевые слова:** вылет, высота подъема, грузовысотная характеристика, грузоподъемность, деформативность, кран-манипулятор, напряжение, перемещение, поперечное сечение, стрела.



Луцко  
Татьяна Васильевна



Мишин  
Сергей Васильевич



Родин Александр  
Александрович

Краны-манипуляторы широко используются при выполнении погрузочно-разгрузочных работ малой и средней грузоподъемности в различных отраслях национальной экономики: в строительстве, промышленности, на транспорте и т.д. [1-3]. В последнее время рассматриваемый вид техники получил массовое распространение. В связи с этим вопросы, связанные с эффективностью применения кранов-манипуляторов, являются насущными. Стремление к снижению металлоемкости грузоподъемных кранов вызывает повышение деформативности конструкции, а, следовательно, приводит к неточности установки грузов на место монтажа или погрузки. Для кранов-манипуляторов данная проблема также характерна.

Вопросам уточнения координат положения стрелового оборудования грузоподъемных кранов и подъемников посвящены работы [4-6]. Анализ этих публикаций подтверждает актуальность проблемы повышения точности позиционирования груза. В результате чего, более точная установка груза на место монтажа помимо повышения безопасности проведения погрузочно-разгрузочных и монтажных работ кранов, способствует снижению времени на выполнение рабочих операций и, как следствие, повышению эффективности эксплуатации машин.

В связи с этим, в настоящей работе ставится цель – оценка влияния деформативности телескопической стрелы крана-манипулятора на точность позиционирования груза. Полученные результаты позволят уточнить и скорректировать грузовысотную характеристику крана.

Для этого решались следующие задачи:

- 1) выполнение анализа конструктивных исполнений и разновидностей поперечных сечений стрел, применяемых на кранах-манипуляторах;
- 2) моделирование в программном комплексе телескопической стрелы тросового крана-манипулятора с разными видами поперечного сечения;
- 3) уточнение грузовысотных характеристик крана-манипулятора и разработка аналитических зависимостей для их построения.

Различают краны-манипуляторы со стреловым оборудованием [3]:

- 1) шарнирно-сочлененной конструкции с Z-образной схемой складывания;
- 2) L-образные краны-манипуляторы с прямой телескопической стрелой и тросовой подвеской крюка.

Устройство стрел с Z-образной схемой складывания более сложное по сравнению с L-образной схемой, однако, Z-образная конструкция получается наиболее компактной в транспортном положении. В тоже время, у Z-образной стрелы высокой грузоподъемности достаточно мощные соединительные шарниры могут сильно утяжелять конструкцию. L-образные краны-манипуляторы работают на больших

вылетах и быстрее Z-образных кранов. Поэтому однозначно сказать, какому крану-манипулятору отдавать предпочтение нельзя. Все зависит от конкретных условий и требований эксплуатации.

Для улучшения эксплуатационных показателей конструкторы кранов-манипуляторов пошли по пути увеличения количества граней в сечении короба. Исследования в области крановых стрел показали, что, чем больше граней в профиле, тем эффективнее распределяется напряжение по сечению. Анализ поперечных сечений стрел кранов-манипуляторов показал, что оптимальной является коробчатая стрела с шестигранным сечением [3].

Таким образом, в итоге в качестве объекта исследования был принят L-образный тросовый кран-манипулятор INMAN IT 120 Palfinger [7] (рис. 1). Для него характерны следующие параметры:

- грузовой момент 12,7 т·м (124,6 Н·м);
- максимальная грузоподъемность 5050 кг;
- грузоподъемность на максимальном вылете 800 кг;
- максимальный вылет стрелы 11,1 м.

На рис. 2 показана грузовысотная характеристика тросового крана-манипулятора INMAN IT 120 Palfinger.



a)



б)

Рис. 1. Тросовый кран-манипулятор INMAN IT 120 Palfinger: а – общий вид; б – стреловое оборудование

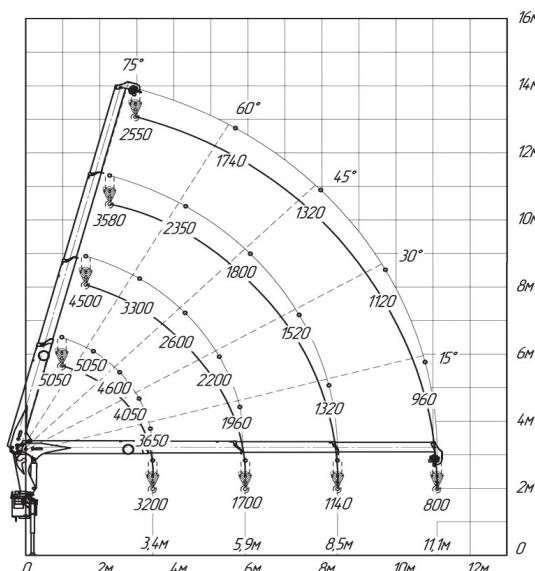


Рис. 2. Грузовысотные характеристики тросового крана-манипулятора INMAN IT 120 Palfinger

Рассматриваемый кран имеет три телескопируемые секции. На рис. 3 показаны вертикальные нагрузки, действующие на стрелу, причем, в качестве расчетных принимаются три положения стрелы: на минимальном вылете, максимальном вылете и при расположении стрелы под 45° к горизонту. При этом рассматривается стрела полностью выдвинутой.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

- Q – грузоподъемность на соответствующем вылете (см. грузовысотную характеристику на рис. 2), кг;
- SK – усилие в грузовом канате, Н;
- GC – масса стрелы, кг;
- R – усилие в гидроцилиндре подъема стрелы, Н;
- LC – длина полностью выдвинутой стрелы, м;
- b – расстояние от пятки стрелы до точки закрепления гидроцилиндра к стреле, м;
- $\alpha$  – угол наклона стрелы к горизонту, град;
- $b$  – угол наклона гидроцилиндра подъема стрелы к горизонту, град.

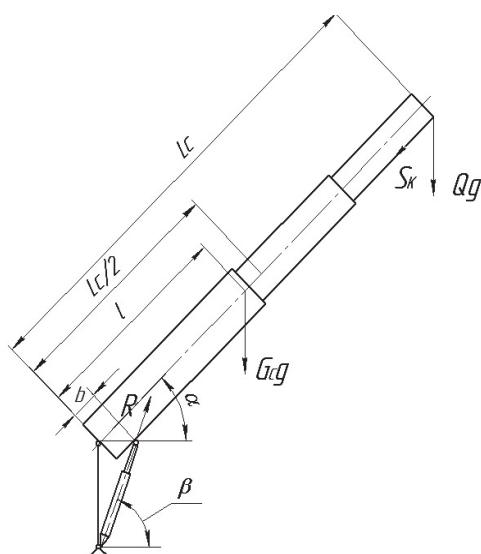


Рис. 3. Вертикальные нагрузки, действующие на стрелу тросового крана-манипулятора

Для обеспечения заданной грузоподъемности стрела должна удовлетворять условиям прочности и жесткости. В связи с тем, что в современных конструкциях кранов-манипуляторов применяются коробчатые стрелы, как с прямоугольными (четырехгранными) поперечными сечениями, так и с шестигранными, то выполним моделирование двух вариантов стрел. На рис. 4 показаны размеры поперечных сечений стрелы нижней секции (сечение I-I), второй секции (сечение II-II) и верхней секции (сечение III-III) для двух исполнений: четырехгранных и шестигранных.

Далее выполняем моделирование стрел в программном комплексе Компас-3D и прикладываем нагрузки на стрелу, показанные на рис. 3. В результате прочностного расчета в программе APM FEM Система прочностного анализа для Компас-3D определены максимальные напряжения и перемещения металлоконструкций стрел. На рис. 5 показаны вертикальные перемещения оголовка стрелы тросового крана-манипулятора.

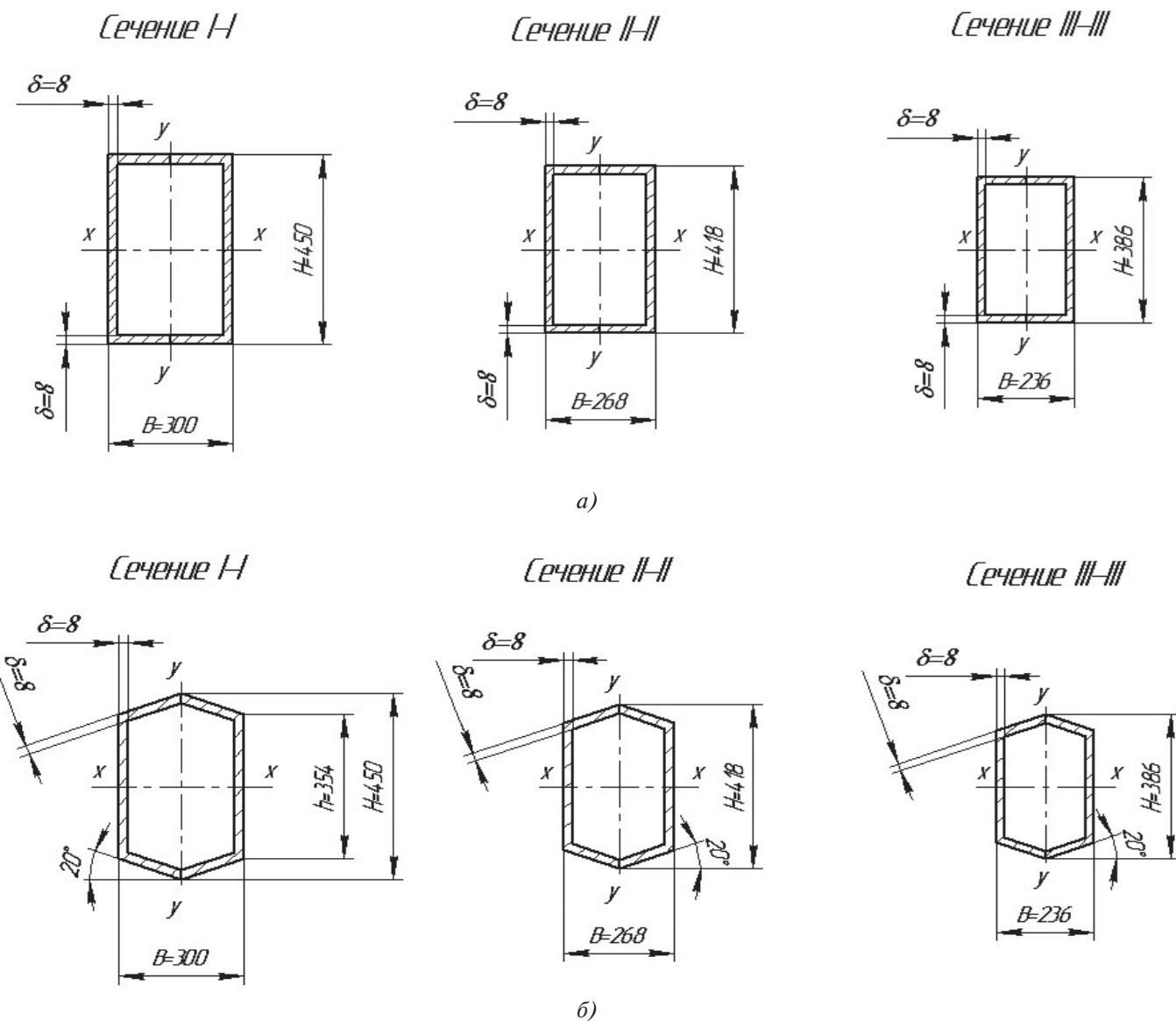


Рис. 4. Поперечные сечения стрел тросового крана-манипулятора: а – прямоугольного поперечного сечения (четырехгранных); б – шестигранных поперечного сечения

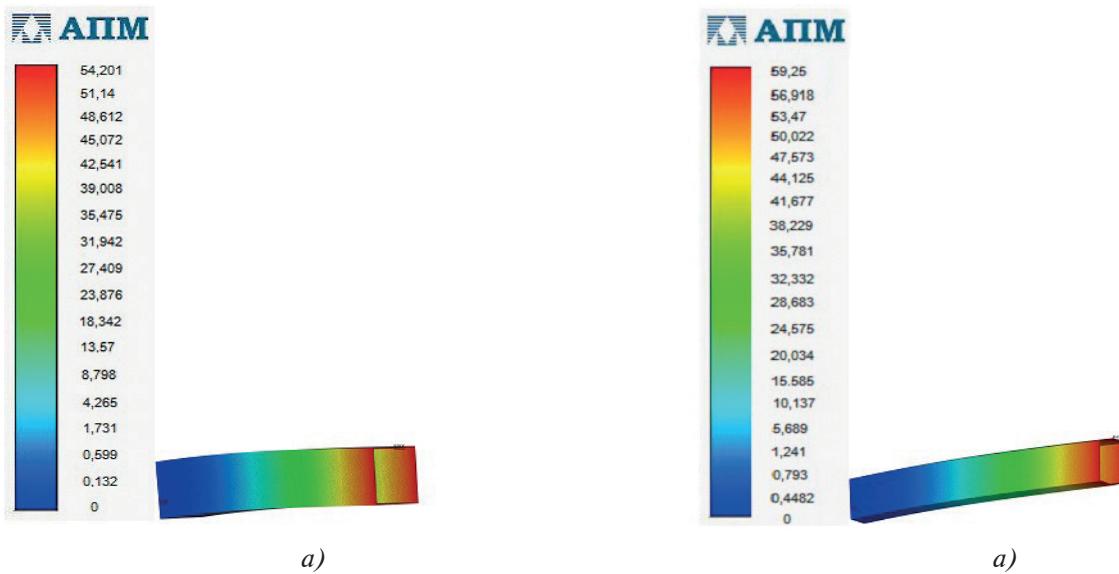


Рис. 5. Карта вертикальных перемещений верхней секции стрелы тросового крана-манипулятора:  
а – стрела прямоугольного поперечного сечения (четырехгранным);  
б – стрела шестиугранного поперечного сечения

Концентрация напряжений возникает в местах стыка секций стрелы, а также в верхнем поясе стрелы независимо от формы поперечного сечения. Причем, запас прочности у стрелы с прямоугольным поперечным сечением (четырехгранным) составил 1,96, у шестиугранной стрелы – 2,24.

Наибольшие вертикальные перемещения составили 54,201 мм у четырехгранный стрелы и 59,25 мм у шестиугранной стрелы на максимальном вылете. Наи-

большие горизонтальные перемещения (то есть приращения вылета стрелы) получились при расположении стрелы под углом 45° (вылет 8,5 м) к горизонту, причем для четырехгранный стрелы составили 75,32 мм, а для шестиугранной стрелы – 84,052 мм.

На рис. 6, а показаны графики вертикальных перемещений оголовка стрелы в зависимости от вылета, а на рис. 6, б – графики горизонтальных перемещений оголовка стрелы в зависимости от вылета.

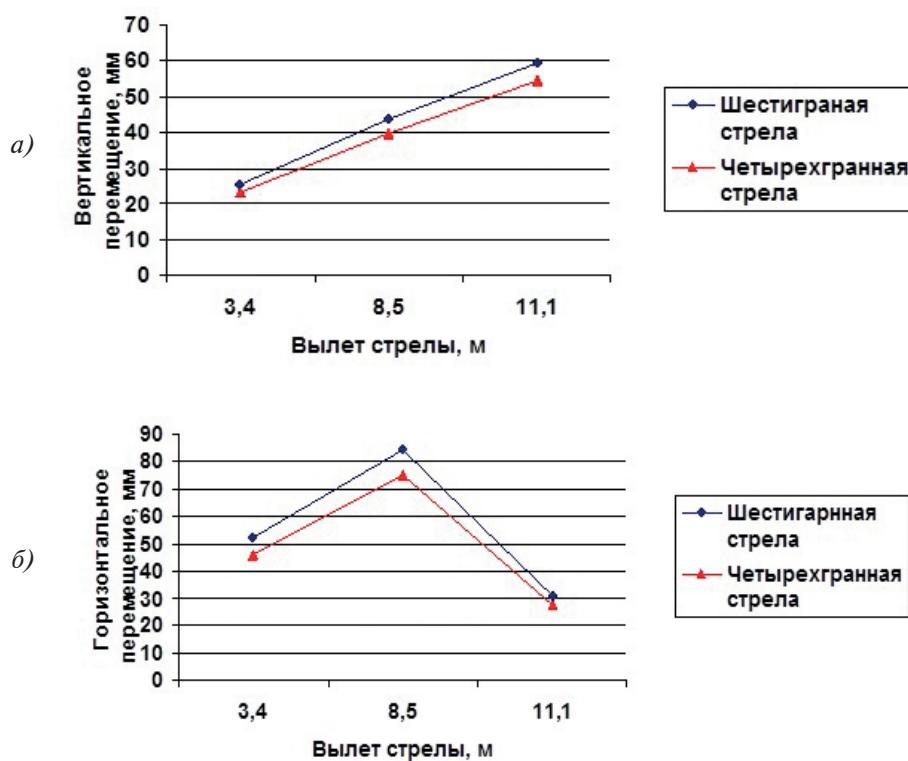


Рис. 6. Перемещения оголовка стрелы (полностью выдвинутой) в зависимости от вылета стрелы:  
а – вертикальные перемещения; б – горизонтальные перемещения

Таким образом, шестигранная стрела является более прочной, но в тоже время, имеет бульшую деформативность по сравнению с четырехгранной стрелой, в вертикальной плоскости разница составляет 9 %, а в горизонтальной – 11 %.

Если же сравнить массы стрел, то шестигранная стрела оказалась легче и составила 870 кг, а четырехгранная – 930 кг, что на 6,5 % больше шестигранной. Следовательно, оптимальной по массовым параметрам является шестигранная стрела.

При сохранении грузоподъемности крана, заданной в исходной характеристике (см. рис. 2), изменились значения вылета и высоты подъема вследствие деформативности стрелы. Далее с учетом полученных значений перемещений можно уточнить грузовысотные характеристики рассматриваемых стрел. На рис. 7 показаны штриховыми линиями грузовысотные характеристики с учетом перемещений оголовка стрелы под нагрузкой. Причем, на этом рисунке приведены данные для шестигранной стрелы. Для четырехгранной стрелы грузовысотные характеристики строятся аналогично.

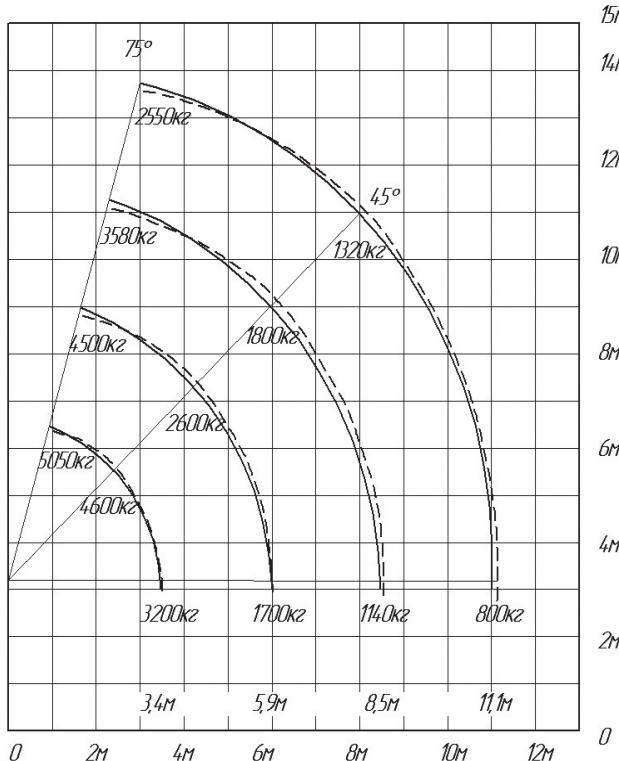


Рис. 7. Грузовысотные характеристики тросового крана-манипулятора с шестигранной стрелой:  
— первоначальная; - - - - - уточненная

Можно описать графики построения грузовой и высотной характеристик в виде следующих зависимостей:

1) грузовая характеристика – зависимость грузоподъемности от вылета:

– грузоподъемность

$$Q_i = \frac{M_o - G_C g \left( \ell \cos \alpha_i - \frac{K}{2} \right)}{k \left( L_C \cos \alpha_i + \Delta_x - \frac{K}{2} \right) g}, \quad (1)$$

– вылет

$$L_i = L_C \cdot \cos \alpha_i + \Delta_x, \quad (2)$$

2) высотная характеристика – зависимость высоты подъема от вылета:

$$H_i = L_C \sin \alpha_i - \Delta_y + h, \quad (3)$$

где  $Q_i$  – грузоподъемность на  $i$ -том вылете стрелы, кг;  $L_i$  –  $i$ -тый вылет стрелы (формула (2) дана при допущении, что пята закрепления стрелы совпадает с осью вращения крана), м;

$M_o$  – восстанавливющий момент, который создается силами тяжести элементов крана без стрелы относительно ребра опрокидывания (величина постоянная для всех вылетов), Н·м;

$G_C$  – масса стрелы, кг;

$l$  – расстояние от пяты стрелы до ее центра тяжести, м;

$\alpha_i$  – угол наклона стрелы к горизонту на  $i$ -том вылете, град;

$K$  – расстояние между выносными опорами крана, м;

$L_C$  – длина стрелы, м;

$k$  – коэффициент запаса грузовой устойчивости;

$H_i$  – высота подъема груза на  $i$ -том вылете стрелы, м;

$h$  – высота закрепления пяты стрелы от уровня земли, м;

$\Delta_x$  – горизонтальное приращение вылета стрелы, м;

$\Delta_y$  – вертикальное перемещение оголовка стрелы, м.

Причем, грузоподъемность на соответствующем вылете можно оставить, как в исходной характеристике крана, но при этом необходимо проверить стрелу на прочность, а кран – на устойчивость. В результате получаются уточненные характеристики вылета и высоты подъема при требуемых значениях грузоподъемности.

Таким образом, в настоящей работе получены следующие выводы:

1. Выполнен анализ существующих конструкций стрел кранов-манипуляторов. Установлено, что для них характерна повышенная деформативность при нагружении.

2. Выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния телескопической стрелы четырехгранного и шестигранного поперечного сечения для тросового крана-манипулятора. Установлено, что по металлоемкости предпочтение следует отдавать шестигранным стрелам, причем их деформативность незначительно превышает податливость четырехгенных стрел.

3. Уточнены грузовысотные характеристики тросового крана-манипулятора с четырехгранной и шестигранной стрелой. Получены аналитические зависимости построения данных характеристик.

#### Список литературы

1. Бандурин, Р. А. Рынок кранов-манипуляторов в России / Р. А. Бандурин // Проблемы современной экономики. – 2015. – № 26. – С. 138-142. – Текст : непосредственный.

2. Лагерев, И. А. Сравнительный анализ гидравлических кранов-манипуляторов транспортно-технологических машин и гидравлических манипуляторов промышленных роботов / И. А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2016, № 3. – С. 16-49. – Текст : непосредственный.
3. Протасов, С. Стрела – исполнительный элемент КМУ/ С. Протасов // Основные средства, № 03, 2013. – С. 64- 69. – Текст : непосредственный.
4. Гурко, А. Г. Исследование положений стрелы двухзвенного автогидроподъемника / А. Г. Гурко, Н. В. Розенфельд, Ю. А. Доля // Технология приборостроения 1' 2015. – С. 58-61. – 2014. – № 196-2. – С. 41-50. – Текст : непосредственный.
5. Луцко, Т. В. Грузовые характеристики тяжелых стреловых кранов типа СКР с учетом деформативности конструкции / Т. В. Луцко // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2007: материалы Международной научно-технической конференции, 11-14 сентября 2007 г., Самара / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. – Самара. 2007. – С.59-63. – Текст : непосредственный.
6. Щербаков, В. С. Автоматизация моделирования оптимальной траектории движения рабочего органа строительного манипулятора: монография / В. С. Щербаков, И. А. Реброва, М. С. Корытов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2009. – 106 с. – Текст : непосредственный.
7. PALFINGER AG : краны-манипуляторы : сайт. – Санкт-Петербург, 2021. – Текст : электронный. – URL : <https://www.palfinger.com> (дата обращения: 14.04.2022).

# ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРЯМОЗУБОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И УСЛОВИЙ ЕЕ РАБОТЫ

**В. М. Даценко, к.т.н., доцент; А. Г. Водолажченко; Я. Р. Четвериков; П. Э. Сербинов**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

**Аннотация.** В работе для определения конструктивных требований к высокоэффективной зубчатой передаче используется метод расчета потерь мощности в цилиндрических прямозубых колесах для широкого диапазона геометрических параметров и условий работы. Показана зависимость величины коэффициента полезного действия (КПД) от размеров цилиндрического прямозубого колеса, модуля, передаточного числа, окружной скорости на делительном диаметре и нагрузки. Для иллюстрации применения предлагаемого метода использовались «ковровые» диаграммы. Установлено, что максимальный КПД выше у мелкомодульных зубчатых колес с большими диаметрами делительной окружности. На потери холостого хода приходится существенная доля общих потерь мощности в зацеплении. Результаты расчета коэффициента полезного действия (КПД) приведенным методом оценки потерь мощности в одной точке линии зацепления с точностью до 0,1 % совпадают с результатами экспериментов, проведенных Андерсоном и Левенталем. Единственным исключением является случай слабого нагружения при высоких окружных скоростях (40 м/с), когда отсутствие поправочного температурного коэффициента, ограничивающего толщину упругогидродинамической пленки, приводит к увеличению погрешности до 1 %.

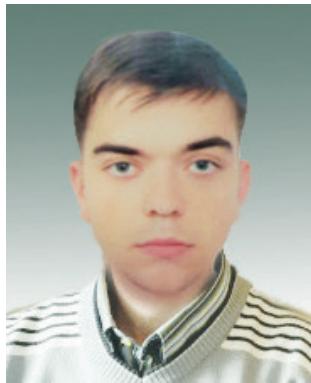
**Ключевые слова.** Зубчатая передача, коэффициент полезного действия, модуль, окружная скорость, делительный диаметр.



**Даценко  
Виталий Михайлович**



**Водолажченко  
Александр Григорьевич**



**Четвериков  
Ярослав Романович**



**Сербинов  
Павел Эдуардович**

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В современном строительстве все процессы производства земляных работ, выполнения работ по перемещению грузов, монтажу строительных конструкций, бетонные работы и ряд других процессов выполняются при помощи машин и механизмов. В конструкциях строительных машин довольно широко используются прямозубые зубчатые передачи, которые могут входить в состав различных редукторов, а также выполняться в виде открытых передач. Так, например, в механизмах поворота одноковшовых экскаваторов, стреловых самоходных и башенных кранов, в механизмах передвижения козловых и башенных кранов используются открытые прямозубые передачи. Определение параметров прямозубой передачи, которые позволяют повысить КПД, способствует улучшению экономичности строительных машин за счет снижения расхода топлива или электроэнергии.

В большинстве случаев расчет зубчатых передач ведется в направлении отыскания наилучшего компромисса между прочностью зубьев, износостойкостью поверхности и стоимостью. В виде дополнения можно было бы выполнить также и расчет потерь мощности. Некоторые геометрические параметры колес, при определенных режимах работы передачи, могут существенно влиять на потери мощности при ее работе.

До работы [1] влияние широкого диапазона геометрических параметров зубчатого колеса и условий работы на КПД зубчатой передачи не исследовалось.

Для оценки КПД зубчатой передачи предложено много методов [2-6], они не отработаны в такой степени, чтобы с их помощью можно было оценить влияние всех переменных геометрических параметров и условий работы на общий КПД зубчатой передачи. Кроме того, в большинстве этих методов серьезно недооцениваются потери мощности зубчатой передачи при неполной нагрузке, поскольку они не учитывают потери, зависящие от скорости, т. е. потери, связанные с об разованием упругогидродинамической (УГД) пленки (трение качения), аэродинамические потери зубчатых колес и потери в опорных подшипниках. Эти зависящие от скорости потери дают значительный вклад в совокупные потери мощности многих машин, работающих большую часть времени на неполных уровнях мощности.

Наиболее полный анализ КПД прямозубых цилиндрических колес изложен в работе [6], в которой мгновенные значения потерь мощности на скольжение и качение были проинтегрированы по всей длине зацепления и усреднены. В этом анализе учитывалось влияние геометрии зубчатого колеса.

Метод, предложенный в работе [7], учитывает не только потери зубчатого колеса на трение скольжения и трение качения, но и влияние сопротивления воздуха (аэродинамическое сопротивление) и потери в подшипниках качения.

Цель статьи – определение рациональных геометрических и эксплуатационных переменных, обеспечивающих получение максимального КПД зубчатой передачи.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Существует четыре основных источника потерь мощности в зубчатой передаче: скольжение, качение, сопротивление воздуха и потери в опорных подшипниках. Метод расчета потерь мощности применим для цилиндрических прямозубых колес с нормальными размерами зубьев, работающих в условиях струйной смазки или смазки разбрзгиванием. В предлагаемом анализе рассматриваются потери на скольжение, являющиеся результатом действия сил трения, возникающих при скольжении зубьев друг по другу. Потери на качение имеют место при образовании УГД-пленки, т. е. при сдавливании масла между зубьями с последующей герметизацией. В дополнение к потерям на скольжение и качение было выведено уравнение, учитывающее сопротивление воздуха и потери в шарикоподшипниках [8-10].

В этом расчете усредненные потери мощности по линии зацепления вычислялись алгебраически, исходя из средних скоростей качения и скольжения зацепления. Была принята простая схема распределения нагрузки на зуб, показанная на рис. 1 [12].

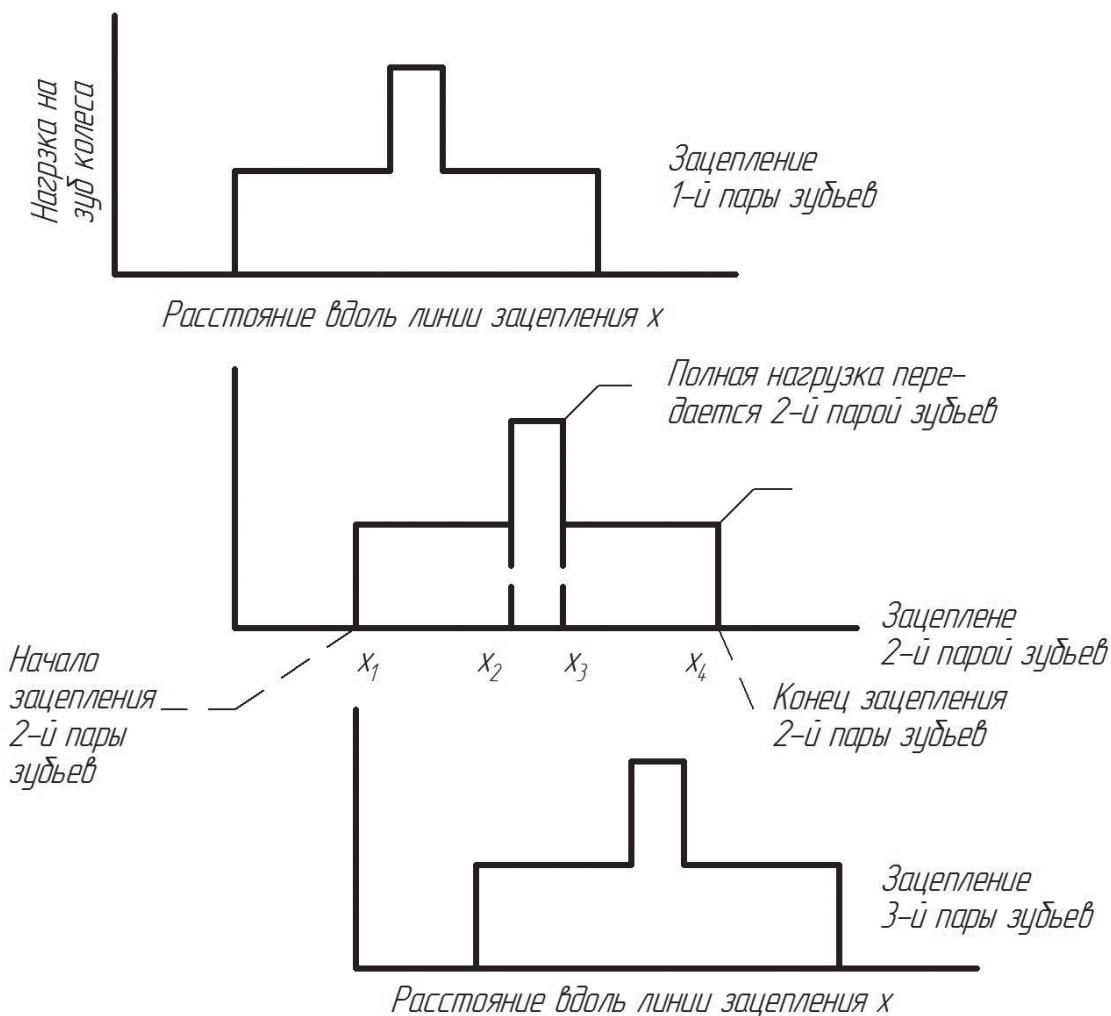


Рис. 1. Диаграмма распределения нагрузки на зубья

Для расчета потерь мощности по длине линии зацепления использовали метод численного интегрирования, который был впоследствии упрощен до шагового вычисления. Здесь же этот метод упрощается еще больше – до одного уравнения потерь, описывающего усредненные потери по длине зацепления.

На рис. 2 приведены сравнительные данные мгновенных и средних скоростей, а также мгновенных и средних потерь мощности.

Потери на скольжение и качение можно найти из уравнений:

$$P_s = C_1 f \bar{W}_s, \quad (1)$$

$$\bar{P}_R = C_2 \bar{h} \bar{V}_T b C R, \quad (2)$$

где  $C_1 = 2 \cdot 10^{-3}$  и  $C_2 = 9 \cdot 10^4$  – коэффициенты пропорциональности;

$\bar{V}_s$  и  $\bar{V}_T$  – средние скорости скольжения и качения, м/с;

$\bar{W}$  – средняя нормальная составляющая нагрузки, Н;

$f$  – коэффициент трения;

$\bar{h}$  – толщина УГД-пленки в центре пятна контакта, м;

$b$  – ширина рабочей поверхности зуба, м;

$CR$  – коэффициент перекрытия.

Упрощенные значения потерь мощности (рис. 2) аппроксимируют площадь под кривыми мгновенных значений потерь с высокой степенью точности, таким образом, реализуется точный и простой метод определения потерь в зубчатом зацеплении. Для диапазона изменения переменных, приводимых в настоящей

работе, это упрощенное выражение дает решение, которое, как оказалось, лишь на 0,1 % отличается от решения, полученного численным интегрированием [7]. Единственное исключение имеет место при самых легких нагрузках (коэффициент  $K$  равен 10) и высоких скоростях (более 40 м/с), когда ошибка в некоторых случаях может возрасти до 1 %. Это объясняется тем, что не учитывался температурный поправочный коэффициент на предельную толщину УГД-пленки при высоких скоростях.

Для учета наличия масла в внутреннем пространстве редуктора корректировали значения плотности и вязкости внутренней атмосферы редуктора применительно к соотношению 1 часть масла на 34,25 частей воздуха [15]. Было установлено, что аэродинамические потери для шестерни и колеса описываются следующими выражениями:

$$P_{WIII} = C_3 \left( 1 + 2.3 \frac{b}{R_p} \right) n_p^{2.8} R_p^{4.6} (0.028\mu + C_4)^{0.2}, \quad (3)$$

$$P_{WK} = C_3 \left( 1 + 2.3 \frac{b}{R_g} \right) \left( \frac{n_p}{u} \right)^{2.8} R_g^{4.6} (0.028\mu + C_4)^{0.2}, \quad (4)$$

где  $C_3 = 2.82 \cdot 10^{-7}$  и  $C_4 = 0.019$  – коэффициенты пропорциональности;

$R$  – радиус делительной окружности, м;

$n$  – частота вращения, об/мин;

$u$  – передаточное отношение;

$\mu$  – абсолютная вязкость смазочного материала,  $\times 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ .

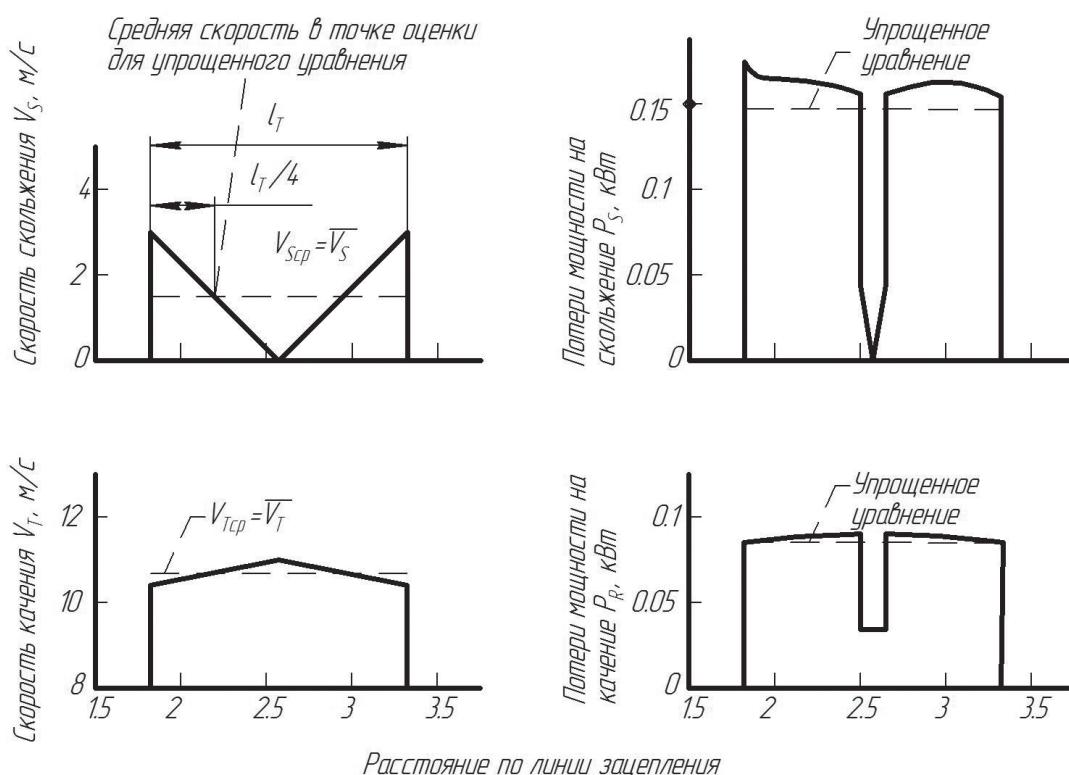


Рис. 2. Мгновенные и усредненные значения скорости скольжения, скорости качения и потерь мощности вследствие сопротивления скольжению и качению на линии зацепления испытуемых зубчатых колес

В работе учитывались также потери в подшипниках, это делали с помощью приближенного метода, описанного Харрисом [10]. Потери энергии в шарикоподшипнике зависят от среднего диаметра подшипника, допустимой статической нагрузки, вязкости смазки, частоты вращения вала и нагрузки на подшипник. Уравнения, описывающие эти зависимости, имеют вид:

$$P_{BRG} = C_5 (M_{\text{ш}} n_{\text{ш}} + M_K n_K), \quad (5)$$

где  $C_5 = 2.10 \cdot 10^{-4}$  – коэффициент пропорциональности;

$M_{\text{ш}}$ ,  $M_K$  – соответственно уменьшение крутящего момента на шестерне и колесе, складывающееся из компоненты, зависящей от нагрузки, и компоненты, обусловленной вязкостью:

$$M_H = 0.0009 \frac{F_{ST}^{1.5}}{C_s^{0.5}} D_m, \quad (6)$$

$$(7) \quad M_B = \begin{cases} C_6 f_0 (vn)^{2/3} D_m^3 & \text{при } vn > 2000, \\ C_7 f_0 D_m^3 & \text{при } vn \leq 2000. \end{cases}$$

где  $C_6 = 9.79 \cdot 10^{-2}$  и  $C_7 = 24.1$  – коэффициенты пропорциональности;

$F_{ST}$  – статическая эквивалентная нагрузка на подшипник, Н;

$C_s$  – номинальная допустимая статическая нагрузка на опорный подшипник, Н;

$D_m$  – средний диаметр подшипника, м.

Суммарные потери мощности в системе:

$$P_{\text{пот}} = P_s + P_R + P_{W\text{ш}} + P_{W\text{к}} + P_{BRG}, \text{ кВт} \quad (8)$$

Коэффициент полезного действия зубчатой передачи:

$$\eta = (P_{B\text{х}} - P_{\text{пот}}) / P_{B\text{х}} \cdot 100, \quad (9)$$

При проведении расчета потерь мощности с помощью упрощенного метода, геометрические параметры и эксплуатационные условия соответствуют случаю, проиллюстрированному на рис. 2.

На рис. 3 сравнивались результаты расчета потерь мощности по приведенной методике с экспериментальными данными, которые были получены на испытательном стенде [16]. В качестве переменных параметров выбрали частоту вращения, крутящий момент, расход масла, ширину зубчатого колеса и вязкость смазки. Экспериментальные данные работы [7] показывают, что смазка вне зон зацепления (т. е. в случае, когда струя масла направлена в зону выхода из зацепления) может уменьшить потери мощности на несколько сотых киловатта.

На рис. 3 показаны также теоретические и экспериментальные зависимости для потерь мощности, они несколько отличаются, что объясняется главным образом недостаточной точностью выражения, выбранного для расчета коэффициента трения.

С помощью метода, изложенного в работе, можно оценить влияние различных геометрических параметров зубчатых колес и условий их работы на коэффициент полезного действия зубчатой передачи.

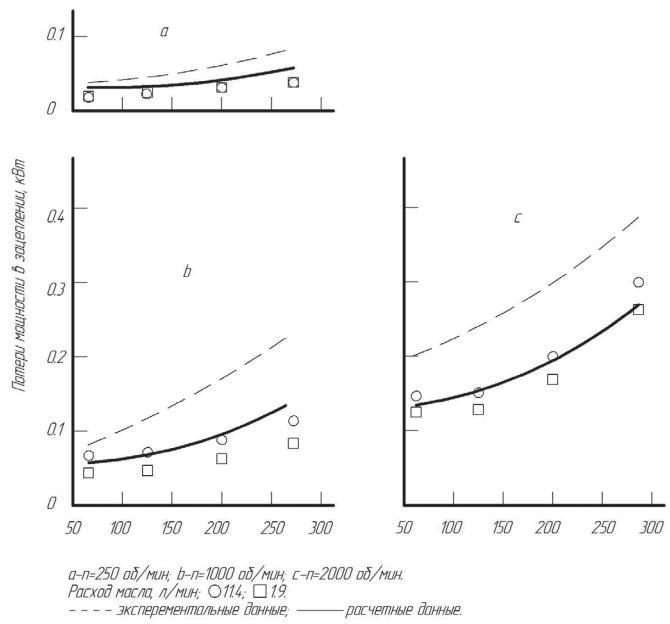


Рис. 3. Сравнение расчетных потерь мощности для случая подачи смазки в зону зацепления с экспериментальными данными

Полученные результаты показаны на рис. 4-8. В значениях КПД зубчатых передач, показанных на этих фигурах, не учитывается влияние потерь в подшипниках.

Влияние нагрузки на зубчатое колесо. Влияние величины крутящего момента на КПД зубчатой передачи показано на рис. 4а для зубчатых колес с тремя различными диаметрами делительной окружности. Показанные здесь общие характеристики являются типичными для широкого диапазона рассмотренных геометрических параметров зубчатых колес и условий работы. При очень низких значениях крутящего момента КПД будет низким из-за потерь холостого хода, но он быстро возрастает даже при небольшом увеличении крутящего момента. При более высоких уровнях крутящего момента КПД зубчатой передачи будет относительно нечувствительным к нему.

Влияние диаметра делительной окружности на КПД при низких уровнях крутящего момента является значительным, в этом случае, чем меньше диаметр зубчатого колеса, тем выше его КПД. При более высоких уровнях крутящего момента эта разница сильно уменьшается.

На рис. 4, б эти кривые перестроены в зависимости от коэффициента нагрузки зубчатой передачи К.

$$K = \frac{C_8 \omega (u+1)}{b D_p u}, \quad (10)$$

где  $C_8 = 1.45 \cdot 10^{-4}$  – коэффициент пропорциональности.

Допустимые значения коэффициента К для косозубых и цилиндрических прямозубых колес, как правило, находятся в диапазоне от  $\sim 100$  для стальных зубчатых колес с низкой твердостью до  $\sim 1000$  для закаленных, шлифованных высокоскоростных колес. Номинальное значение коэффициента К для промышленных приводов общего назначения со стальны-

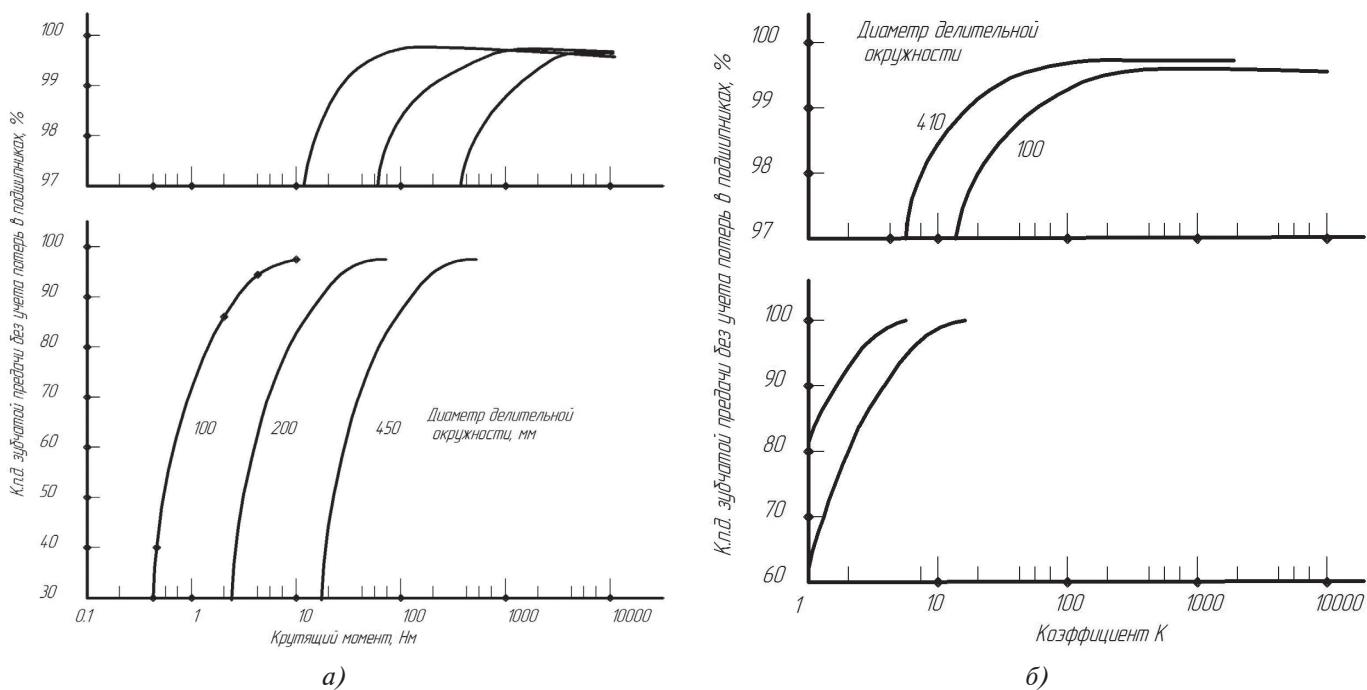


Рис. 4. Влияние модуля и диаметра делительной окружности на зависимость КПД зубчатой передачи от крутящего момента (а) и коэффициента К (б) при окружной скорости на делительной окружности 20,3 м/с

ми зубчатыми колесами, имеющими твердость НВ 300 и передающими равномерную нагрузку при окружной скорости на делительной окружности не более 15 м/с, обычно располагается в диапазоне от 275 до 375. С помощью коэффициента К обычно нормируют значения КПД, приведенные на рис. 4, а. Анализ рис. 4, б показывает (как и в случае, изображенном на рисунке 4, а), что более высокий максимальный КПД имеют зубчатые колеса большего диаметра. Однако при одинаковых низких значениях коэффициента К зависимость, изображенная на рис. 4, а (т.е. больший КПД у зубчатых колес малого диаметра при одинаковых малых крутящих моментах) на рис. 4, б будет обратной. Это, вероятно, объясняется тем, что при равных коэффициентах К более крупная зубчатая передача работает при значительно более высоком уровне крутящего момента (когда КПД существенно повышается), чем зубчатая передача малого размера.

Влияние модуля, диаметра делительной окружности, окружной скорости на делительной окружности и передаточного числа. «Ковровые» диаграммы, изображенные на рис. 5-8, иллюстрируют одновременное влияние трех переменных: модуля, диаметра делительной окружности и окружной скорости на КПД зубчатой передачи (без учета потерь в опорных подшипниках). Эти переменные и нагрузка на зубчатую передачу, как оказалось, влияют на КПД больше, чем передаточное число или ширина рабочей поверхности зуба. Были выбраны два типа нагрузки: легкая ( $K = 10$ ) и среднетяжелая ( $K = 300$ ). Величина и ход кривых КПД, соответствующих  $K = 1000$  и  $K = 300$ , являются совершенно одинаковыми и здесь не показаны.

На рис. 5, а коэффициент К является постоянным и равным 300, а передаточное число равно 1. На этой и последующих ковровых диаграммах все три ключевые

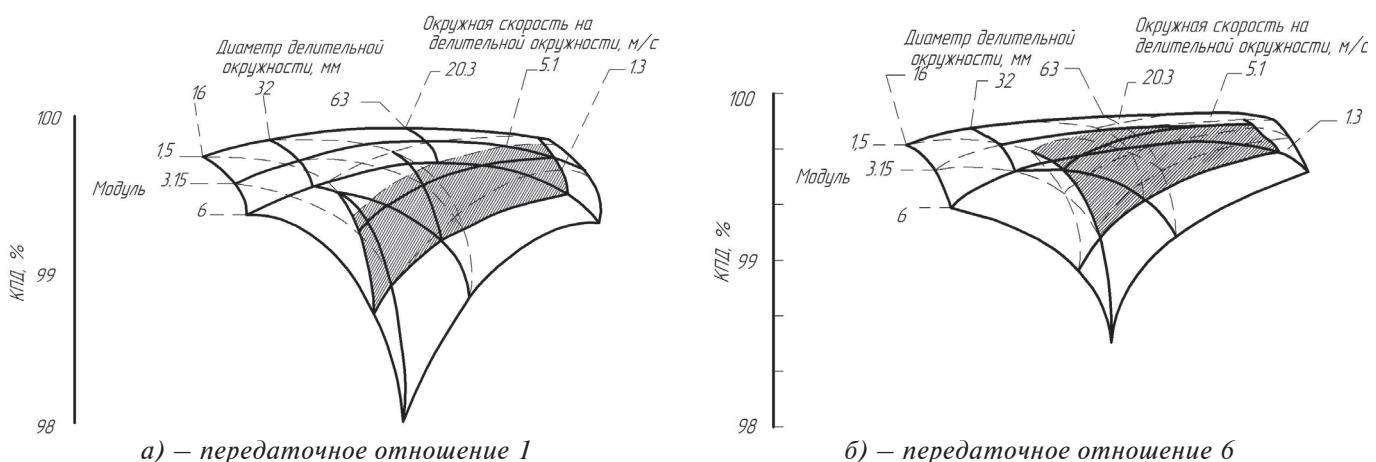


Рис. 5. Влияние диаметра делительной окружности, модуля и окружной скорости на делительной окружности на КПД зубчатой передачи при  $K = 300$

переменные представлены в ортогонально пересекающихся плоскостях. Для каждой из трех переменных приводится три значения. КПД при любой комбинации этих величин определяется в точке пересечения. Таким образом, КПД при промежуточных значениях можно легко найти путем интерполяции между плоскостями. Тремя значениями окружной скорости, приведенными на рис. 5, а (вдоль затененных плоскостей), являются 1,3; 5,1 и 20,3 м/с. Диаметр делительной окружности меняется с 16 до 63 мм, а модуль — с 1,5 до 6 мм.

Наиболее эффективную комбинацию диаметра делительной окружности и модуля дает самое мелкомодульное зубчатое колесо наибольшего диаметра. И наоборот, наименее эффективной зубчатой передачей будет передача крупномодульными колесами наименьшего диаметра. При этом значении коэффициента К увеличение окружной скорости ведет к увеличению КПД особенно для небольших крупномодульных колес. Хотя здесь это и не показано, КПД продолжает увеличиваться при скоростях до 40,6 м/с, но значительно медленнее. Максимальное увеличение КПД составило 0,21 % при диаметре шестерни 16 мм, модуле 1,5 мм.

Модуль имеет наибольшее влияние на КПД при любых скоростях и размерах колеса. При постоянном значении модуля 6 мм изменение диаметра делительной окружности и окружной скорости не оказывают почти никакого влияния на КПД, однако при модуле 1,5 мм роль обоих этих параметров очень велика. Повышение КПД у мелкомодульных зубчатых колес обусловлено, прежде всего, более низкими скоростями скольжения, а следовательно, и меньшими потерями мощности.

Как показано на рис. 4, зубчатые колеса большего диаметра обычно имеют более высокие эксплуатационные характеристики. При постоянной окружной скорости частота вращения с увеличением диаметра уменьшается. Это вызывает снижение скорости скольжения, которая в свою очередь ограничивает потери мощности на скольжение. Таким образом, увеличение КПД, имеющее место при увеличении диаметра,

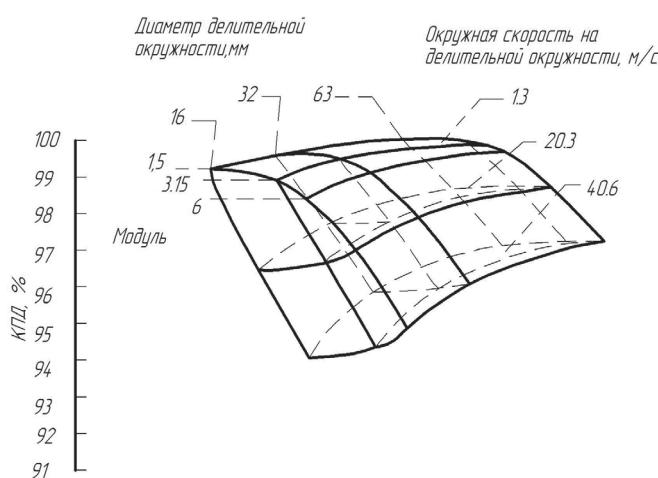
обусловлено уменьшением величины скорости скольжения.

На рис. 5, а показано также, что увеличение окружной скорости на делительной окружности приводит к увеличению КПД, с увеличением окружной скорости возрастают скорости скольжения и качения. Увеличение любой из этих скоростей приводит к уменьшению коэффициента трения, в результате чего в свою очередь снижаются потери мощности, обусловленные сопротивлением скольжению, так что эти потери не увеличиваются непосредственно с ростом окружной скорости на делительной окружности, как это имеет место в случае входной мощности.

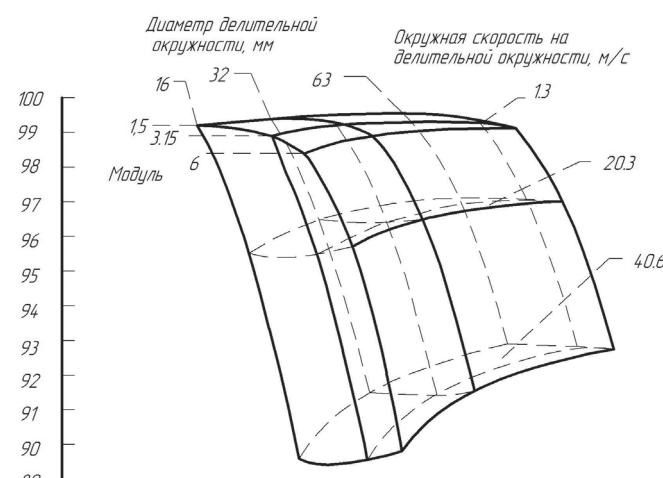
На рис. 5, б представлены результаты с передаточным числом 6 при К = 300. Поскольку диаметр делительной окружности шестерни остается постоянным, изменение передаточного числа равнозначно изменению диаметра делительной окружности колеса. Сравнение рисунков 5, а и 5, б показывает, что зависимость КПД от передаточного числа является пренебрежимо малой при окружной скорости на делительной окружности 20,3 м/с и незначительной — при более низких скоростях. Насколько можно судить, в целом зависимость КПД от передаточного числа оказалась довольно слабой.

На рис. 6, а коэффициент К уменьшили до 10, а передаточное число оставили равным единице. Здесь мы по существу имеем дело с ненагруженной зубчатой передачей, и все потери являются почти исключительно потерями холостого хода — на сопротивление качению и сопротивление воздуха. Влияние переменных при К = 10 проявляется существенно иначе, чем при К = 300. Наибольший КПД реализуется при минимальной окружной скорости, причем с увеличением этой скорости происходит резкое уменьшение величины КПД. Это объясняется тем, что потери холостого хода сильно зависят от частоты вращения. Значения КПД существенно уменьшаются, поскольку передаваемая мощность является очень низкой.

Явление повышения КПД при увеличении диаметра делительной окружности сохраняется и для



а) — передаточное отношение 1



б) — передаточное отношение 6

Рис. 6. Влияние диаметра делительной окружности, модуля и окружной скорости на делительной окружности на КПД зубчатой передачи при К = 10

случаю слабо нагруженной зубчатой передачи. При столь низком коэффициенте  $K$  зависимость КПД от модуля заметно ослабевает. Лишь в случае минимальных окружных скоростей на делительной окружности (1,3 м/с), когда потери, обусловленные трением скольжения, все еще остаются значительными, обнаруживается заметное повышение КПД у мелкомодульных зубчатых колес. При более высоких окружных скоростях, когда потери на сопротивление скольжению становятся пренебрежимо малыми по сравнению с потерями на сопротивление качению, модуль не оказывает практически никакого влияния на величину КПД. Данные по КПД, рассчитанные при окружной скорости 5,1 м/с, сознательно не были представлены на рис. 6, поскольку они не более чем на 0,5 % отличаются от данных, соответствующих скорости 1,3 м/с.

В случае, изображенном на рис. 6, б, передаточное число увеличили до 6 при том же значении  $K$ . Как уже упоминалось выше, это равносильно шестикратному увеличению диаметра делительной окружности зубчатого колеса. При окружной скорости 1,3 м/с передаточное число не оказывает практически никакого влияния на КПД, однако при скорости 20,3 м/с увеличение передаточного числа приводит к снижению КПД на ~0,5 %, а при 40,6 м/с КПД падает весьма существенно — на ~4 %. Таким образом, влияние передаточного числа на КПД оказывается наиболее сильным при высоких окружных скоростях на делительной окружности и небольших нагрузках, т. е. в тех случаях, когда основными источниками потерь мощности являются трение качения и сопротивление воздуха.

*Влияние ширины рабочей поверхности зуба и размеров колеса.* В предыдущих ковровых диаграммах отношение оставалось постоянным: равным 0,5. На рис. 7 показано влияние отношения на КПД при различных значениях окружной скорости на делительной окружности и коэффициента  $K$ .

В большинстве случаев в интервале значений изменения КПД оказывается очень незначительным (не более 0,2 %). Однако при окружных скоростях более 20,3 м/с и низких значениях коэффициента  $K$  (порядка 10) изменение КПД в функции является несколько более ощутимым, что обусловлено главным образом аэродинамическими потерями. Максимальное изменение КПД имеет место при 40,6 м/с, когда зубчатые колеса с минимальной шириной рабочей поверхности дают КПД на 4,1 % ниже, чем колеса с максимальной шириной. Однако для широкого диапазона эксплуатационных условий КПД не зависит сколько-нибудь существенно от отношения  $b/B$ .

Распределение потерь мощности в зубчатой передаче. На рис. 8 показано расчетное распределение отдельных составляющих общих потерь мощности в зубчатой передаче применительно к экспериментальному зубчатому зацеплению, исследованному в работе [7]. При малых частотах вращения (рис. 8, а) большая часть потерь мощности в системе приходится на сопротивление скольжению. Однако с повышением частоты

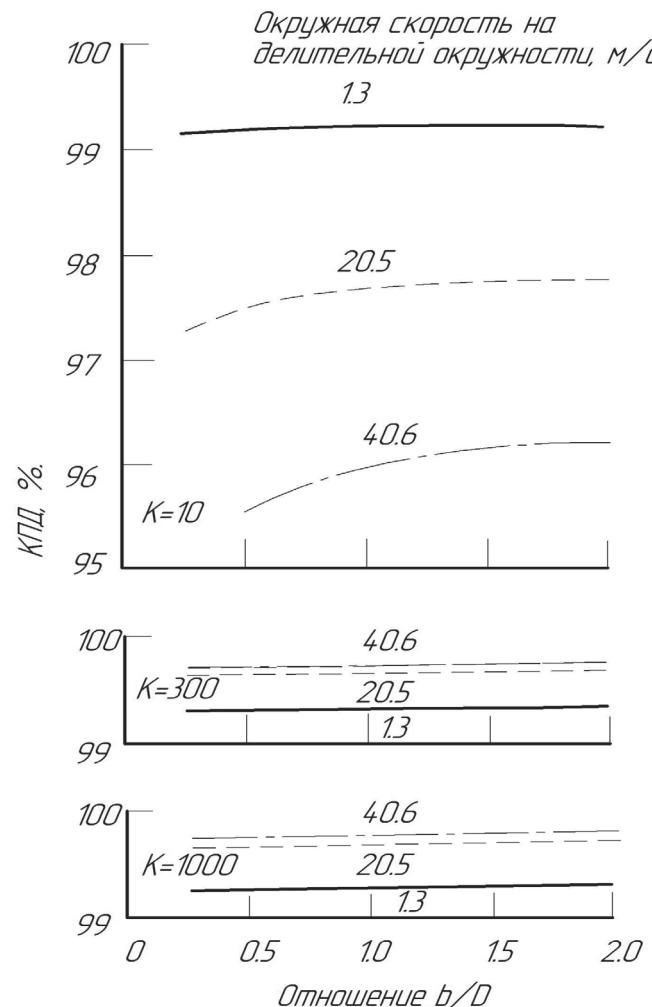


Рис. 7. Зависимость КПД зубчатой передачи от отношения при различных значениях коэффициента  $K$

вращения (рис. 8, б и в) все большую роль начинают играть потери мощности в подшипниках. При частоте вращения 2 000 об/мин на аэродинамические потери колеса и шестерни (которыми обычно пренебрегают) приходится до 10 % суммарных потерь мощности в системе, так что их уже нельзя не учитывать.

При низких крутящих моментах потери, обусловленные трением скольжения, будут довольно низкими, поскольку они не зависят непосредственно от нагрузки. Потери, обусловленные трением качения, практически не зависят от величины крутящего момента (поскольку они пропорциональны толщине смазочной пленки), так что при малых моментах они являются основным источником потерь мощности, особенно при высоких скоростях.

На рис. 8, в наглядно иллюстрируется явление возникновения ошибки в результате пренебрежения скоростными потерями при расчете суммарных потерь мощности в зубчатой передаче (что, к сожалению, слишком часто имеет место на практике). Даже при полной нагрузке, когда потери, обусловленные трением скольжения, являются максимальными, на скоростные потери приходится около половины сум-

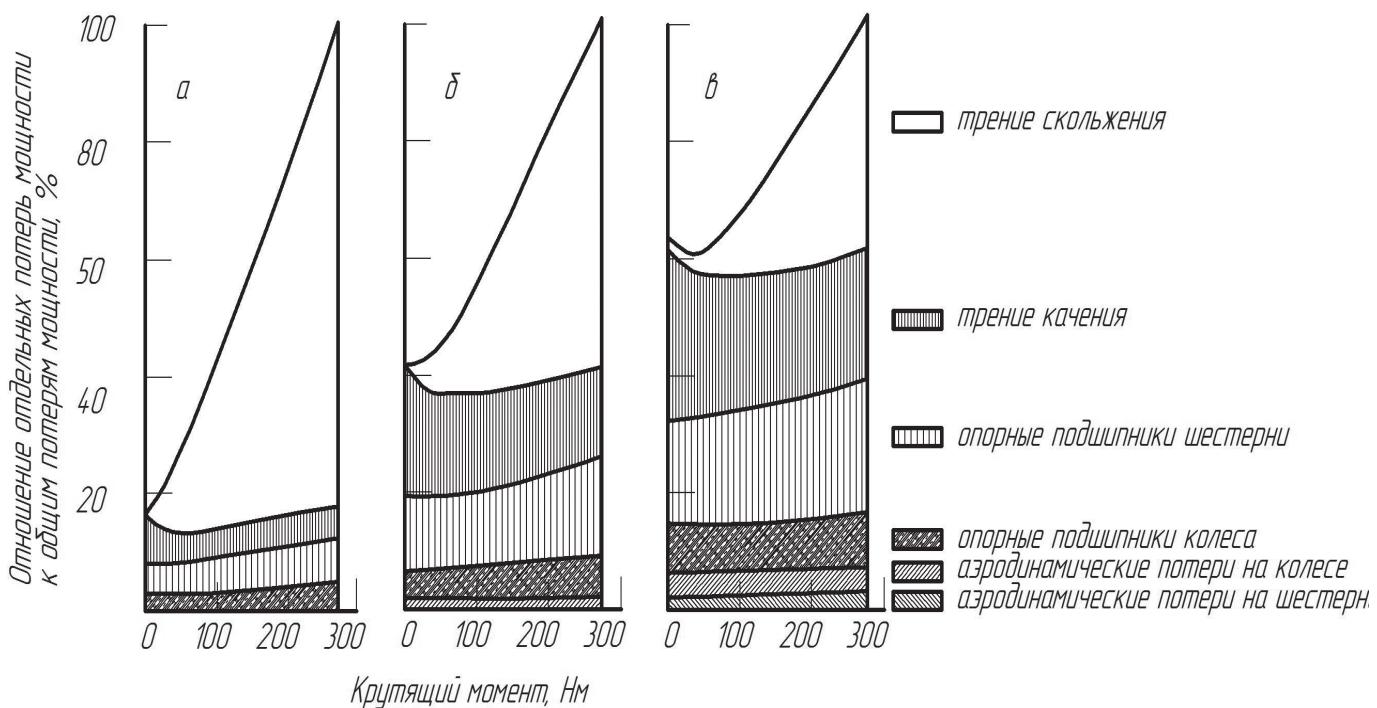


Рис. 8. Распределение отдельных потерь мощности в зубчатой передаче в зависимости от крутящего момента при частотах вращения ведущей шестерни, равных 250 об/мин (а), 1 000 об/мин (б), 2 000 об/мин (в)

марных потерь мощности в зацеплении (без учета потерь на подшипниках). Интересно также отметить, что при таких эксплуатационных условиях потери в подшипниках составляют почти 80 % потерь, обусловленных сопротивлением скольжению. Правильная оценка потерь, обусловленных трением качения, аэродинамических потерь и потерь в подшипниках играет важнейшую роль для точного определения потребления мощности в редукторе.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты расчета КПД приближенным методом оценки потерь мощности в одной точке линии зацепления с точностью до 0,1 % совпадают с результатами чисто численного интегрирования. Единственным исключением является случай слабого нагружения при высоких окружных скоростях (40 м/с), когда отсутствие поправочного температурного коэффициента, ограничивающего толщину УГД-пленки, приводит к увеличению погрешности до 1 %.

2. При средних и больших нагрузках ( $K = 300$ ) повышению КПД зубчатой передачи способствует уменьшение модуля, диаметра делительной окружности и окружной скорости на делительной окружности. Однако при малых нагрузках ( $K = 10$ ) увеличение окружной скорости приводит к снижению КПД, а уменьшение модуля вызывает лишь очень незначительное повышение КПД (главным образом при низких окружных скоростях).

3. Передаточное число и отношение ширины рабочей поверхности зуба к диаметру делительной окружности, как правило, оказывает слабое влияние на величину КПД, за исключением случаев малых

нагрузок, когда увеличение передаточного числа и уменьшение ширины рабочей поверхности приводят к снижению КПД зубчатой передачи, особенно при высоких окружных скоростях (более 20 м/с).

4. Потери мощности, обусловленные трением качения, потери в подшипниках и аэродинамические потери в меньшей степени влияют на величину суммарных потерь мощности в зубчатом зацеплении. На рабочей частоте вращения потери холостого хода могут достигать 65 % потерь мощности максимально нагруженной зубчатой передачи.

## Список литературы

- Anderson, N. E. Effect of Geometry and Operating Conditions on Spur Gear System Power Loss / N. E. Anderson, S. H. Loewenthal // ASME Journal of Mechanical Design. – 1981. – Jan. – Vol. 103, № 1. – P. 151-160.
- Shipley, E. E. Loaded Gears in Action / E. E. Shipley // Gear Handbook. – New York : McGraw-Hill, 1962. – ch. 14. – P. 14-60.
- Buckingham, E. Efficiencies of Gears / E. Buckingham // Analytical Mechanics of Gears. – New York : Dover, 1963. – ch. 19. – P. 395-425.
- Merritt, H. E. Efficiency and Testing / H. E. Merritt // Gear Engineering. – New York : Wiley, 1972. – ch. 22. – P. 345-357.
- Martin, K. F. A Review of Friction Predictions in Gear Teeth / K. F. Martin // Wear. – 1978. – Aug. – Vol. 49, № 2. – P. 201-238.
- Chiu, Y. P. Approximate Calculation of Power Loss in Involute Gears / Y. P. Chiu // ASME Paper 75-PTG-2. – 1975. – Oct. – P. 134-157.
- Anderson, N. E. Spur-Gear-System Efficiency at Part and Full Load / N. E. Anderson, S. H. Loewenthal // NASA TP-1622, AVRACOM TR 79-46, 1980. – P. 87-103.

8. Манн, Р. В. Вязкое трение дисков с лопатками в зависимости от числа Рейнольдса, осевого и радиального зазоров / Р. В. Манн, С. Ш. Морстон – Текст : непосредственный // Техническая механика. – 1961. – № 3. – С. 719-723.
9. Daily, J. W. Chamber Dimension Effects on Induced Flow and Frictional Resistance of Enclosed Rotating Disks / J. W. Daily, R. E. Nece // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Mar. – Vol. 82, № 1. – P. 217-232.
10. Harris, T. A. Rolling Bearing Analysis / T. A. Harris. – New York : Wiley, 1984. – 315 p.
11. Михайлов, А. Н. Разработка методов повышения несущей и компенсирующей способности зубчатых муфт : специальность 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Михайлов Александр Николаевич; Донецкий политехнический институт. – Донецк, 1985. – 259 с. – Текст : непосредственный.
12. Литвин, А. Ф. Теория зубчатых зацеплений / А. Ф. Литвин. – Москва : Наука, 1968. – 584 с. – Библиогр.: с. 571-580. – 7600 экз. – Текст : непосредственный.
13. Hamrock, B. J. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts. III – Fully Flooded Results / B. J. Hamrock, D. Dowson // ASME Journal of Lubrication Technology. – 1977. – Apr. – Vol. 99, № 2. – P. 264-276.
14. Финиченко, В. А. Пространственная модификация зубьев цилиндрических зубчатых колес / В. А. Финиченко – Текст : непосредственный // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. – 2004. – Вып. 5(47). – С. 97–100.
15. Планетарные передачи: справочник / под ред. В. Н. Кудрявцева, Ю. Н. Кудрявцева. – Ленинград: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977 – 536 с. – Текст : непосредственный.
16. Wellauer, E. J. Load Rating of Gears / E. J. Wellauer // Gear Handbook. – New York : McGrawHill, 1962. – ch. 13. – P. 1-48.

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ АРХИТЕКТУРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕДЕЙСТВУЮЩИХ УГОЛЬНО-ОТРАСЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ ДОНБАССА

А. Э. Ступина

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

**Аннотация.** В статье рассмотрены экологические предпосылки, определяющие современные требования к архитектурно-планировочной организации предприятий по производству строительных материалов и конструкций на основе использования территорий и остаточных фондов<sup>1</sup> недействующих угольно-отраслевых объектов на территории Донбасса. Приведены сведения об особенностях их градостроительного положения, об экологической оценке их состояния после закрытия, что позволяет моделировать комплекс требований на подготовительном этапе их реновации. Анализируются нормативные требования документов, регламентирующих проектирование, строительство и эксплуатацию предприятий отрасли производства строительных материалов и конструкций. Это, в свою очередь даёт возможность их учёта при разработке принципов и приёмов архитектурно-планировочной организации зданий, сооружений и их комплексов данных предприятий. Рассматриваются также вопросы типологии недействующих угольно-отраслевых предприятий, особенности их регионально-территориального и градостроительного размещения в структуре населённых мест. Сформулированы основные современные экологически обусловленные требования к архитектурно-планировочной организации зданий, сооружений и их комплексов вышеназванных предприятий строительного производства на базе недействующих угольно-отраслевых объектов.

**Ключевые слова:** экологические предпосылки, недействующие угольно-отраслевые предприятия и объекты, архитектурное формирование, комплексы зданий и сооружений, предприятия по производству строительных материалов и конструкций.



Ступина  
Ангелина Эдуардовна

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Только на территории Донецко-Макеевской агломерации на данный момент закрыто или консервировано в связи с их неперспективностью достаточно большое количество промышленных предприятий, в том числе угольной промышленности.

Анализ последних публикаций. Данная статья логически продолжает серию публикаций автора по проблеме архитектурно-градостроительного освоения территорий и комплексов зданий и сооружений недействующих предприятий на территории Донбасса, в том числе путём создания на их основе объектов различного функционального назначения, включая жильё [4, 9, 10]. Тема экологичности промышленных объектов всегда была актуальна и затрагивалась ранее [3]. Но вопрос экологичности при выборе промышленных объектов под жильё не особо изучен. Необходимость реконструкции зданий и сооружений (в том числе в проекции на недействующие промышленные предприятия и необходимость их реновации) обосновали В. А. Симагин [8], С. Г. Хохлачева [10].

## ЦЕЛИ

Целью статьи являются экологические вопросы современной реорганизации зданий и сооружений недействующих предприятий донецкого региона.

<sup>1</sup> Здания (архитектурно-строительные объекты, предназначенные для создания необходимых условий труда – производственные корпуса цехов, депо, гаражи, складские помещения, производственные лаборатории и т.д.); сооружения (инженерно-строительные объекты, предназначенные для технологических функций процесса производства – насосные станции, тоннели и т.д.); передаточные устройства (с помощью которых передается энергия различных видов) [Ермолович Л. Л. Анализ хозяйственной деятельности предприятия: учеб. пособие / Л. Л. Ермолович [и др.]; под общ. ред. Л. Л. Ермолович. – Минск: Эксперспектива, 2001. – 685 с.]

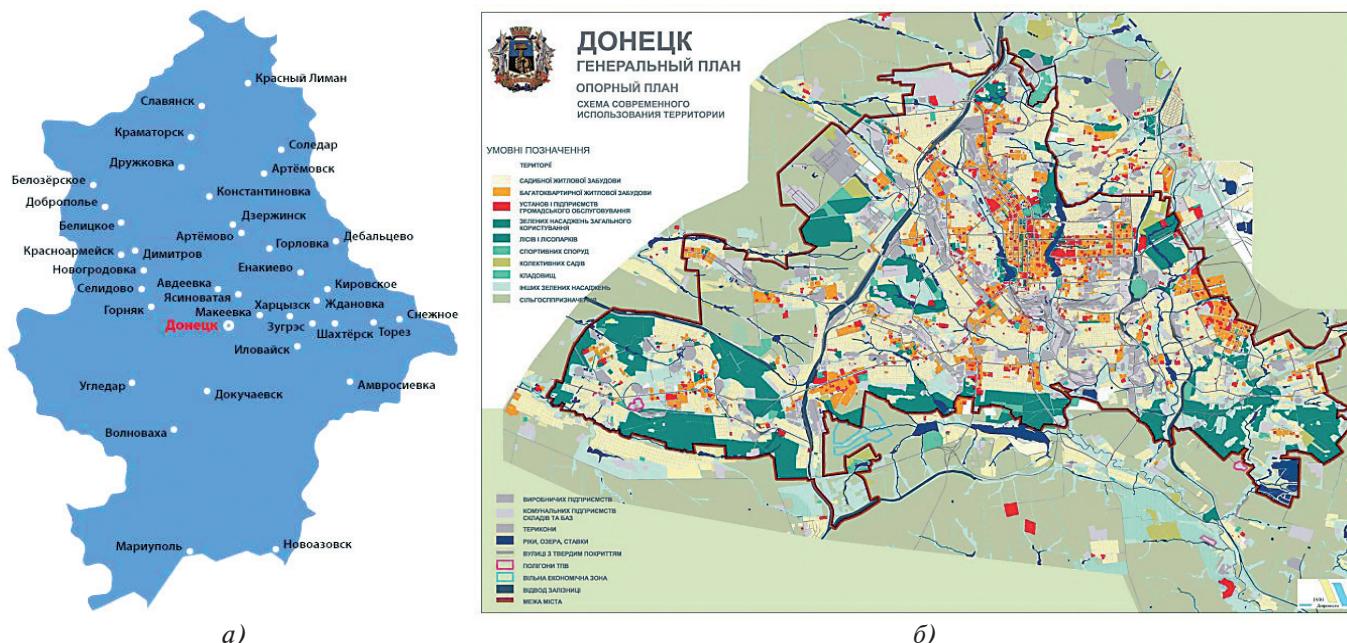


Рис. 1. Градостроительное положение недействующих угольно-отраслевых объектов на территории Донбасса: а – размещение шахтёрских населенных мест на территории Донецкой Народной Республики; б – размещение предприятий угольной промышленности, в том числе недействующих на территории города (на примере г. Донецка)



Рис. 2. Архитектурно-градостроительное формирование предприятий по производству строительных материалов и конструкций на основе недействующих угольно-отраслевых объектов: общий вид технологического парка на территории бывшей шахты (Advanced Manufacturing Park (AMP) – это производственный технологический парк площадью 150 акров (61 га) в Уэверли, Ротерхэм, Англия)

**Основной материал.** Промышленные объекты причиняют существенный вред окружающей нас среде в течение всей промышленной цепочки – начиная от добычи сырья, а также первичной переработки, вплоть до реализации производственных процессов и удаления отходов.

Промышленные здания легко переоборудуются под самые востребованные на сегодняшний день функции: бизнес, торговля, спорт, развлечения. Однако адаптация производственных и промышленных зданий не может решить проблему в целом, так как территория промышленного предприятия представ-

ляет собой еще и большую санитарно-защитную зону, которая сегодня значительно сокращается за счет применения современных технологий. Использование нефункционирующих промышленно-защитных зон для формирования естественной составляющей архитектурно-ландшафтной среды города является способом существенного улучшения экологической обстановки в крупных городах. Такой подход позволит значительно увеличить площадь зеленых насаждений в структуре экологически чистых зон и городов, а значит, снизить уровень загрязнения атмосферного воздуха и зон шумового воздействия.

Важным резервом для организации новых планировочных структур в крупных и крупнейших городах являются многочисленные промышленные предприятия и зоны, утратившие свое значение под влиянием научно-технического прогресса, изменения экономической ситуации, ужесточения экологических требований.

Дефицит строительных площадок и ухудшающаяся из года в год экология города заставляют искать выход из ситуации путем реорганизации производственных объектов, а также выноса за пределы города промышленных зон и объектов. Инвесторам нужно место для строительства, городу нужно сохранять рабочие места, а предприятиям нужно поддерживать свой бизнес на плаву. Необходимо соблюдать разумный баланс интересов всех заинтересованных сторон и находить пути решения проблем, возникающих при реорганизации промышленных территорий, выявлять ключевые ошибки при реорганизации предприятий, на практических примерах выявлять преимущества и недостатки проектов, рассматривать эффективные пути минимизации рисков при перебазировании производства. Целесообразность реорганизации промышленности и введения новых альтернативных функций определяется социальными, экономическими, эколо-



*Рис. 3. Использование территорий санитарно-защитных зон недействующих промышленных предприятий*

гическими, психологическими, историческими и эстетическими факторами.

Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений, промышленного назначения – сложный процесс. Промышленные предприятия, здания и сооружения, которые подвергаются реконструкции, обязаны отвечать абсолютно всем действующим правилам и нормам, в первую очередь строительным, гигиеническим, а также природоохранным и экологическим.

Анализ международной архитектурно-градостроительной практики показывает, что не каждый промышленный объект после прекращения своего функционирования может быть использован в дальнейшем. В некоторых регионах они разрушены и их сносят, освобождая территорию для нового строитель-

ства, в других случаях их реконструируют либо реорганизовывают для других целей.

В зависимости от условий и факторов, которые оказывают большое влияние на формирование архитектурно-планировочной организации зданий, их можно условно разбить на:

- здания, требующие ряда серьезных модификаций;
- здания, требующие минимума перепланировки;
- здания, не подлежащие реконструкции под жилье или требующие затрат, несопоставимых с мероприятиями по реконструкции.

Включение бывших промышленных зданий и сооружений в архитектурно-градостроительную структуру

производственно-жилых образований. Разработанные аспекты формирования промышленных объектов могут стать основой концепции комплексных решений для переопределения городских территорий.

С экологической точки зрения важным вопросом является внедрение энергосберегающих и энергоактивных архитектурных решений, в том числе на основе системы пассивного использования солнечной энергии, включая освоение терриконов и территорий со сложным рельефом в городах Донбасса [6].

С позиции расширенного системного понимания экологии<sup>2</sup> представляется необходимым при рефункционализации и переформатировании территории и остаточных фондов недействующих угольно-отраслевых объектов сохранение их наиболее знаковых элементов (названий, зданий и сооружений, оборудования), играющих такую же знаковую и символичную роль в социо-культурной жизни нашего шахтёрского региона<sup>3,4</sup>.

Экологизация процесса архитектурно-градостроительного освоения территории и остаточных фондов угольно-отраслевых объектов методом формирования на их основе предприятий по производству строительных материалов, изделий и конструкций будет способствовать организация их по принципу технопарков, а также включение в их структуру подразделений социально-культурного назначения – музеев, рекреационных, спортивных и др.

Выводы. Промышленные предприятия в условиях Донбасса являются одним из основных градообразующих факторов, формирующих градостроительскую организацию городской застройки. В настоящее время многие из промышленных объектов не выполняют своих первоначальных функций, что диктует необходимость их архитектурно-градостроительного освоения, в том числе с целью создания современных высокотехнологичных промышленных предприятий, что будет коренным образом способствовать нормализации экологической ситуации среды населённых мест Донбасса.

Обеспечение экологической безопасности важно при строительстве, эксплуатации, ликвидации и реновации промышленных объектов для предотвращения вредных экологических и связанных с ними социальных, экономических и других последствий для поддержания оптимальных условий жизни населения. Экологичность производства способствует не только улучшению условий работы сотрудников, но и среди населённых мест.

Архитектурно-градостроительная организация предприятий по производству строительных материалов и конструкций, их комплексов зданий и сооружений на базе недействующих углеотраслевых объектов должна основываться на соблюдении всех правил, норм и требований, таких как экологические, гигиенические и строительные.

Адаптация территорий и остаточных фондов существующих предприятий в современных социально-экономических и geopolитических условиях становится приоритетно важной по сравнению с новым строительством по многим важным техническим, экономическим и социальным параметрам.

Экологические аспекты, направленные на сохранение и поддержание экологической структуры города, должны быть приоритетными в соответствии с парадигмой устойчивого развития.

### Список литературы

1. Акимова, Т. А. Природа – Человек – Техника: Учебник / Т. А. Акимова, А. П. Кузьмин, В. В. Хаскин. – Экология, 2007. – 510 с.
2. Губанов, Л. Н. Экологическая безопасность при строительстве. Часть 1 [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л. Н. Губанов, В. И. Зверева, А. Ю. Зверева. – Электрон. текстовые данные. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. – 101 с. – 2227-8397. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16074.html>.
3. Дьяконов, К. Н. Экологическое проектирование и экспертиза : учебник / К. Н. Дьяконов, А. В. Дончева. – Москва : Аспект Пресс, 2005. – 383с.
4. Лобов, И. М. Актуальные направления современной архитектурной реинтеграции зданий, сооружений и комплексов недействующих промышленных предприятий Донецкого региона (на основе международного опыта). Градостроительные предпосылки формирования лофта [Текст] / И. М. Лобов, А. Э. Ступина // Строитель Донбасса. Выпуск 2020-2(11). – Макеевка, 2020. – С. 65-69.
5. Наумец, С. С. Основные аспекты формирования генеральной схемы развития территории Донецкой Народной Республики на период 2019-2039 гг. [Текст] / С. С. Наумец, Л. В. Семченков // Строитель Донбасса. Выпуск 2019-1(6). – Макеевка, 2019. – С. 4-11.
6. Семченков, Л. В. Направления апробации универсальной системы пассивного использования солнечной энергии в

<sup>2</sup> Малхазова, С. М. Экология. Учебное пособие по курсу «Экология с основами биогеографии» / С. М. Малхазова, К. Б. Гонгальский. – М.: Географический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, 2021. – 166 с. ISBN 978-5-89575-255-5 – URL : [https://biogeogr.ru/wp-content/uploads/Docs/Ecology\\_Malkhazova\\_Gongalsky.pdf](https://biogeogr.ru/wp-content/uploads/Docs/Ecology_Malkhazova_Gongalsky.pdf) (дата обращения: 24.04.2022)

<sup>3</sup> Приходько, С. А. Перспективы создания посттехногенного ландшафтно-рекреационного парка на территории недействующих угольных шахт «Красный профинтерн» и «Юный коммунар» в г. Енакиево / С. А. Приходько, К. П. Воробьев, Е. А. Гайворонский, В. М. Остапко // В сб. материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня основания заповедника «Хомутовская степь» «Охрана, восстановление и изучение степных экосистем в XXI веке» : – Донецк: Издательство «Ноулидж», Донецкое отделение, 2016. – 216 с., – С. 43-45 (Электронный ресурс) – Режим доступа: <https://docplayer.ru/46982585-Ohrana-vosstanovlenie-i-izuchenie-stepnyh-ekosistem-v-xxi-veke.html>

<sup>4</sup> Гайворонский, Е. А. Композиционно-художественное решение архитектурных объектов, отражающих социально-культурное значение угольной промышленности в регионе [Текст] / Е. А. Гайворонский // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2012. Вип. 2012-4(94) : Проблеми містобудування і архітектури. С. 43-56.

- архитектурных решениях зданий и сооружений в городах Донбасса [Текст] / Л. В. Семченков, Е. А. Гайворонский // Современное промышленное и гражданское строительство. 2017. Том 13, Номер 1. С. 151-175
7. Симагин, В. А. Проблемы реконструкции промышленных предприятий (в 2-х частях) / Симагин В. А., Хохлачева С. Г., Князев С. Ю., Симагина Е. В. // Реконструкция промышленных районов и узлов: Уч. Пособие, ч.1. – Новосибирск: НГАС, 1995. – 84 с.
8. Смоляр, И. М. Экологические основы архитектурного проектирования : учебное пособие / И. М. Смоляр, Е. М. Микулина, Н. Г. Благовидова. – Москва : Академия, 2010. – 157 с.
9. Ступина, А. Э. Промышленные предприятия как объект для реновации / X Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство», 21-27 сентября 2018, Белгород.
10. Ступина, А. Э. Предпосылки архитектурно-градостроительной рефункционализации недействующих промышленных предприятий в городах Донецкого региона / Архитектурная школа Донбасса: наука и практика в условиях современного развития. Электронный сборник научных трудов республиканской очно-заочной научно-практической конференции (14 октября 2020 г., г. Макеевка) – Макеевка, 2020, С. 103-105.
11. Хохлачева, С. Г. Градостроительные проблемы реконструкции промышленных зон крупных городов / С. Г. Хохлачева: Изв. Вузов, Строительство, № 2, Новосибирск: НГАС, 1996. – 109-113 с.
12. Bell, D. The coming of post-industrial society: A venture of social forecasting The future of industrial buildings by Nicholas Grimshaw // Journal of the Royal Society of Arts – Vol. 133 – №5341 (December 1984) – С. 47-602.
13. Sazykina E.V. «Claster» as new typological form of architectural activity // INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL – № 12 (114) 2021 – p. 114-118. – [Электронный ресурс]. – URL : <https://research-journal.org/en/arch-en/klaster-kak-novaya-tipologicheskaya-forma-architekturno-prostranstvennoj-organizacii-proizvodstvennoj-deyatelnosti/> (дата обращения: 17.02.2022).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КЛАПАНОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ УМЗ-4216 ПОСЛЕ ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА В ТЯЖЕЛЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. Я. Бабанин<sup>1</sup>, д.т.н., доцент; А. В. Чухаркин<sup>1</sup>; Т. А. Кикош<sup>2</sup>; Ю. А. Любивый<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

<sup>2</sup> ООО «ФИРМА ВИ-ВА», г. Донецк

**Аннотация.** На основании выполненных визуальных и инструментальных исследований дефектов и величины износа клапанов и сопряженных поверхностей клапанов газораспределительного механизма (ГРМ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) УМЗ-4216, выработавшего свой ресурс на газовом топливе (компримированный природный газ) в тяжелых режимах эксплуатации, установлен и проанализирован ряд присутствующих дефектов. Определены величины изменения твердости поверхностного слоя характерных поверхностей клапанов в процессе их работы в двигателе.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, технологический узел «клапан – седло – направляющая втулка», износ деталей газораспределительного механизма, сопряженные поверхности, твердость поверхностного слоя.



Бабанин  
Анатолий Яковлевич



Чухаркин  
Артем Витальевич



Кикош  
Тарас Андреевич



Любивый  
Юрий Александрович

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Эксплуатационный характер работы автомобильного двигателя определяется комплексом нагрузочных, скоростных и тепловых параметров его работы, формируемым режимами разгона, движения с постоянной скоростью, торможения и холостого хода. При этом до 97 % времени эксплуатации автомобиля в условиях городского режима движения, до 90...95 % времени – при движении по грунтовым дорогам и до 30...35 % времени – при движении на автомагистралях приходится на неустановившийся режим работы. Нагрузка на двигатель при этом составляет 13...78 % от номинальной [1].

Автопроизводители относят использование автомобиля в городских режимах работы к тяжелым условиям его эксплуатации. Высокие переменные эксплуатационные нагрузки на двигатель автомобиля, значительная часть которых приходится на пониженные частоты вращения коленчатого вала, интенсифицируют износ деталей и ускоряют процесс снижения его работоспособности по сравнению с базовыми требованиями производителей [2]. Двигатель, коробка передач, сцепление и другие агрегаты работают в нестационарных режимах с переменными нагрузками, что снижает их долговечность. «Рваный» ритм движения пассажирского автомобильного транспорта в городских условиях, постоянные остановки, замедления и ускорения, езда на пониженных передачах значительно увеличивают расход топлива, нарушают температурный режим работы ДВС, что существенно влияет на снижение ресурса его работы.

Начиная с 2010 г. двигатели УМЗ-4216 производства Ульяновского моторного завода нашли широкое применение на автомобилях марки «ГАЗель», в частности автобусах особо малого класса ГАЗ-3221-288, малотоннажных грузовых ГАЗ-3302-288, их модификациях и моделях на их шасси (автобусах БАЗ-22155 «Дельфин» Бориспольского и Черниговского автозаводов, «Рута 25» Часовоярского ремонтного завода).

Основные характеристики ДВС УМЗ-4216 [3, 4]:

Рабочий объем – 2 890 см<sup>3</sup>;

Количество цилиндров – 4;

Порядок работы цилиндров – 1-2-4-3;

Степень сжатия – 9,2;

Количество клапанов – 8, OHV;

Диаметр цилиндра – 100 мм;

Ход поршня – 92 мм;

Мощность л.с. (кВт) – 123 (90,5) при 4 000 об/мин;

Крутящий момент – 235 Н·м при 2 200 – 2 500 об/мин.

Отличительными положительными особенностями двигателя 4216 является применение комплексной микропроцессорной системы управления впрыском топлива и зажиганием, имеющей обратную связь через датчики кислорода и детонации. Кроме того, при его проектировании закладывались необходимые требования для обеспечения устойчивой работы двигателя на газовом топливе, и установка газобаллонного оборудования не приводит к отказу производителя двигателя от выполнения гарантийных обязательств.

Следует обратить внимание, что в настоящее время практически все автомобили с двигателями 4216 эксплуатируются в тяжелых условиях, в частности, микроавтобусы используются для перевозки пассажиров в режиме городского пассажирского транспорта, малотоннажные – для перевозки грузов в городских условиях, что приводит к значительному снижению ресурса работы двигателя.

Поэтому исследование износа технологического узла «седло – клапан – направляющая втулка» ГРМ двигателя 4216 при работе на газовом топливе в тяжелых условиях эксплуатации является актуальной задачей.

## ЦЕЛЬ

Целью данной работы является определение образующихся дефектов и величины износа впускного и выпускного клапанов газораспределительного механизма двигателя 4216, выработавшего свой ресурс в тяжелых режимах эксплуатации, а также изменение твердости поверхностного слоя клапанов в процессе работы.

Методика проведения исследований. Для определения величин износа применялись микрометры серии МК. Для определения твердости применялся твердомер портативный комбинированный МЕТ-УД (ТУ 4271-004-18606393-04).

Твердомер предназначен для измерения твердости металлов и сплавов по всем стандартизованным в РФ шкалам твердости – Роквелла (HRC), Бринелля (HB), Виккерса (HV) и Шора (HSD), и позволяет проводить измерение твердости поверхностного слоя металла, подвергнутого наплавлению, напылению, механиче-

ской, термической или другим видам поверхностной обработки металла (так как не продавливает поверхностный слой), проводить экспресс-анализ твердости изделия непосредственно на месте его эксплуатации или производства.

Твердомер представляет собой малогабаритный прибор для измерения твердости, состоящий из электронного блока с подключенным к нему датчиком (рис. 1). Выбор между ультразвуковым и динамическим датчиком осуществляется в зависимости от массы, конфигурации, структуры, степени механической и термической обработки измеряемого изделия.



Рис. 1. Твердомер портативный комбинированный МЕТ-УД: 1 – электронный блок; 2 – датчик ультразвуковой У1; 3 – датчик динамический Д1

При проведении данных исследований применяли датчик ультразвукового принципа действия (метод ультразвукового контактного импеданса UCI), который представляет собой отдельно выполненное устройство, связанное с электронным блоком при помощи кабеля.

Датчик ультразвуковой (рис. 2) в основе своей использует стальной стержень с алмазной пирамидой Виккерса на конце (угол между гранями 136°), который является акустическим резонатором (вибратором) встроенного автогенератора ультразвуковой частоты. При внедрении пирамиды в контролируемое изделие под действием фиксированного усилия калиброванной пружины происходит изменение собственной частоты резонатора, определяемое твердостью материала. Относительное изменение частоты резонатора преобразуется электронным блоком в значение твердости выбранной шкалы и выводится на дисплей.

Данный метод подходит для измерений твердости на изделиях различной массы и толщины и, особенно, на готовых изделиях с глянцевой поверхностью, поскольку не оставляет видимых отпечатков после измерений. Конструкция датчика ультразвукового позволяет проводить измерения в труднодоступных местах (например, поверхность зубьев шестерён и пр.), а также на тонкостенных конструкциях (например, трубопроводах и пр.). Следует учитывать, что результат измерения ультразвуковым методом зависит от модуля упругости Е контролируемого изделия.

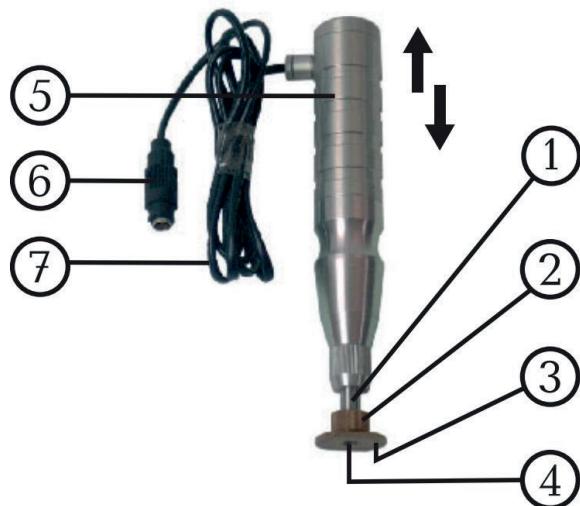


Рис. 2. Устройство ультразвукового датчика У1:

- 1 – втулка;
- 2 – прижимное кольцо насадки;
- 3 – нижняя плоскость насадки;
- 4 – торец втулки;
- 5 – корпус датчика;
- 6 – штекер разъёма датчика;
- 7 – соединительный кабель

Измерение твёрдости поверхностного слоя металла впускного и выпускного клапанов проводили именно ультразвуковым датчиком, так как клапаны ГРМ имеют небольшую массу и толщину металла, без нанесения механических повреждений («продавливания» поверхностного слоя) в последовательности, схематически показанной на рис. 3. Измерение производится на чистом, сухом, закрепленном неподвижно клапане ГРМ.

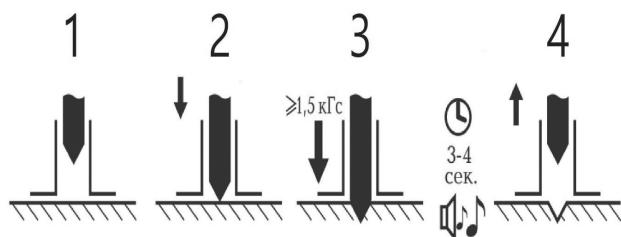


Рис. 3. Схема измерения твердости датчиком ультразвуковым У1: 1 – установка датчика; 2 – приложение небольшого усилия; 3 – увеличение усилия ( $\geq 14,7$  Н) и выдерживание его в течении 3...4 секунд до звукового сигнала и появления результата измерения на экране; 4 – прекращение усилия

Клапаны двигателя 4216 изготавливаются из жаропрочных сталей, в частности, впускной – из хромокремнистой, выпускной – из хромоникельмарганцовистой с азотированием. На рабочую фаску выпускного клапана дополнительно наплавляется жаростойкий хромоникелевый сплав. Диаметр стержня клапанов – 9 мм. Тарелка впускного клапана имеет диаметр 47 мм, а выпускного – 39 мм. Угол рабочей фаски обоих клапанов – 45 градусов.

В верхней части стержня клапана выполнена выточка для сухариков тарелки пружины клапана. Тарелки пружин клапанов и сухарики изготовлены из стали и подвергнуты поверхностному упрочнению.

На каждый клапан устанавливается по две пружины: наружная с переменным шагом с левой навивкой и внутренняя с правой навивкой. Пружины изготовлены из термически обработанной высокопрочной проволоки и подвергнуты дробеструйной обработке.

Под пружины устанавливаются стальные шайбы. Наружная пружина устанавливается вниз концом, имеющим меньший шаг витков. Клапаны работают в металлокерамических направляющих втулках. Втулки изготовлены прессованием с последующим спеканием из смеси железного, медного и графитового порошков с добавлением для повышения износостойкости дисульфида молибдена. Внутреннее отверстие втулок окончательно обрабатывается после их запрессовки в головку. Втулка впускного клапана снабжена стопорным кольцом, препятствующим самопроизвольному перемещению втулки в головке. Для уменьшения количества масла, просасываемого через зазоры между втулкой и стержнем клапана, на верхние концы всех втулок напрессованы маслостойкие колпачки, изготовленные из маслостойкой резины.

Для проведения данных исследований при проведении капитального ремонта двигателя 4216, выработавшего свой ресурс при работе на компримированном природном газе (КПГ) на автобусе особо малого класса БАЗ-22155 «Дельфин» в городском режиме пассажирского транспорта, были отобраны 7 клапанов: три впускных и четыре выпускных.

В результате визуальной дефектовки отработанных клапанов установлен ряд присутствующих дефектов, которые по снижению их отрицательного действия можно расположить в следующей последовательности: прогар клапана; перекос рабочей фаски тарелки клапана и раковины на ее поверхности, ее асимметрия и неравномерный износ, задиры и раковины на стержне клапана, удлинение клапана. Характерный вид поверхности клапанов, двигателя, выработавшего ресурс на метане, представлен на рис. 4.

Конструкция исследуемых клапанов двигателя 4216 с обозначениями его основных размеров и областей их замера представлена на рис. 5.



Рис. 4. Характерный вид выпускного клапана с направляющей втулкой (а) и состояния поверхности днища его тарелки (б) двигателя, выработавшего ресурс на КПГ

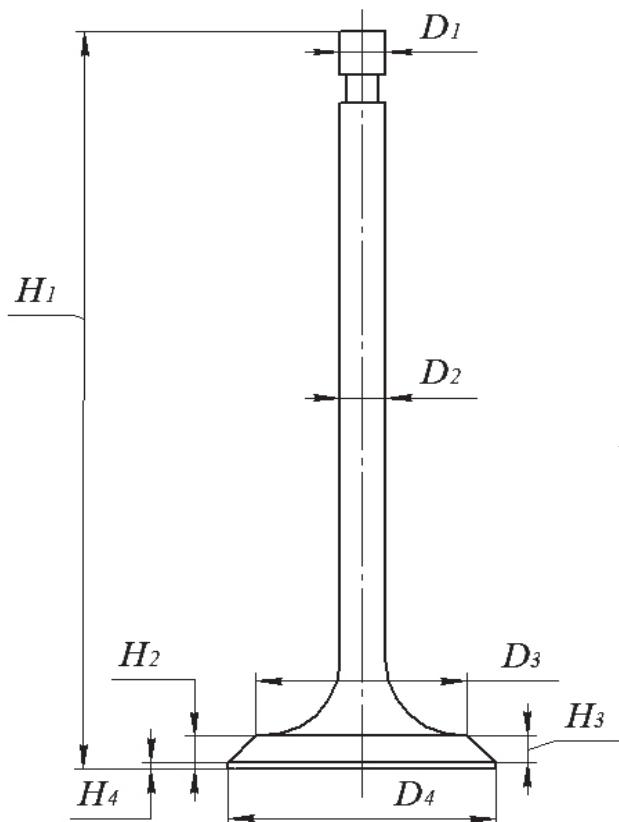


Рис. 5. Схематическое изображение конструкции клапана и обозначение его основных геометрических параметров

Результаты замера геометрических размеров и дефектовки клапанов двигателя представлены в таблице 1.

Таблица 1.  
Результаты замера основных геометрических размеров и дефектовки клапанов двигателя 4216,  
выработавшего ресурс на КПГ

Название образца	№ образца	Контролируемые диаметры, мм			Контролируемые высоты, мм			Дефекты клапанов	
		Диаметр стержня D1, мм	Диаметр рабочей части стержня под втулкой D2, мм	Диаметр верха фаски D3, мм	Диаметр низа фаски D4, мм	Высота клапана H1, мм	Высота тарелки H2, мм	Высота фаски H3, мм	Высота кромки H4, мм
Впускной клапан	1	8,93	8,83	41,5	47,24	117	4,1	3,6	0,5
Выпускной клапан	2	8,93	8,93	34,2	39,28	117,6	4,44	3,44	1
Впускной клапан	3	8,91	8,87	41	47,05	117	4	3	1
Выпускной клапан	4	8,9	8,82	34,5	38,97	117	3,74	3,24	0,5
Впускной клапан	5	8,92	8,91	37,7	44,05	117	4,67	3,17	1,5
Выпускной клапан	6	8,89	8,92	33,6	39,13	117,4	4,03	2,03	2
Выпускной клапан	7	8,89	8,88	33,6	39,18	117,1	3,71	1,71	2

Анализ представленных в таблице 2 данных свидетельствует, что дефекты образуются на стержне клапана и на фаске тарелки. Основными дефектами стержня клапана являются его чрезмерный

износ и задиры на поверхности под направляющей втулкой. В таблице 2 представлены данные об износе сопряженных поверхностей клапана с втулкой и седлом.

Таблица 2.

## Изменение геометрических размеров клапанов двигателя 4216, выработавшего свой ресурс на КПГ

№ образца	Геометрические размеры клапанов							
	Диаметр стержня, D <sub>1</sub> , мм	Диаметр рабочей части стержня под втулкой, D <sub>2</sub> , мм	Диаметр верхней фаски, D <sub>3</sub> , мм	Диаметр низа фаски, D <sub>4</sub> , мм	Высота клапана, H <sub>1</sub> , мм	Высота тарелки, H <sub>2</sub> , мм	Высота верхней кромки, H <sub>3</sub> , мм	Высота низа кромки, H <sub>4</sub> , мм
Впускные клапаны								
Стандарт	8,93	8,92	41,18	47,3	117,2	4,56	3,5	1,06
1	8,93	8,83	41,5	47,24	117	4,1	3,6	0,5
Износ, мм	0	0,09	-0,32	0,06	0,2	0,46	-0,1	0,56
3	8,91	8,87	41	47,05	117	4	3	1
Износ, мм	0,02	0,05	0,18	0,25	0,2	0,56	0,5	0,06
5	8,92	8,91	37,7	44,05	117	4,67	3,17	1,5
Износ, мм	0,01	0,01	3,48	3,25	0,2	-0,11	0,33	-0,44
Среднее значение износа	0,01	0,05	1,11	1,1867	0,2	0,30	0,2433	0,06
Выпускные клапаны								
Стандарт	8,9	8,89	35,1	39,15	117,2	3,8	1,8	2
2	8,93	8,93	34,2	39,28	117,6	4,44	3,44	1
Износ, мм	-0,03	-0,04	0,9	-0,13	-0,4	-0,64	-1,64	1
4	8,9	8,82	34,5	38,97	117	3,74	3,24	0,5
Износ, мм	0	0,07	0,6	0,18	0,2	0,06	-1,44	1,5
6	8,89	8,92	33,6	39,13	117,4	4,03	2,03	2
Износ, мм	0,01	-0,03	1,5	0,02	-0,2	-0,23	-0,23	0
7	8,89	8,88	33,6	39,18	117,1	3,71	1,71	2
Износ, мм	0,01	0,01	1,5	-0,03	0,1	0,09	0,09	0
Среднее значение износа	-0,0025	0,0025	1,125	0,01	-0,075	-0,18	-0,805	0,625

Основными дефектами тарелки является ее прогар, неравномерный износ фаски, перекос фаски и ее асимметрия.

Следует обратить внимание, что наиболее тяжелым дефектом, присутствующим как на впускном, так и выпускном клапане, оказывающим значительное отрицательное влияние на работу двигателя, является прогар фаски тарелки клапана. Анализ изменения геометрических размеров отработанных клапанов свидетельствует, что на клапанах с прогоревшей тарелкой наблюдается значительный износ стержня под направляющей втулкой. В частности, для образования прогара износ на впускном и выпускном клапанах составляет, соответственно, 0,04 и 0,08 мм.

Таким образом, с точки зрения износа деталей, механизм прогара фаски клапана следующий. По мере износа сопрягающихся поверхностей клапана и направляющей втулки и увеличения между ними зазора увеличивается перекос клапана и его отклонение движения от направляющей оси. Это способствует увеличению зазора между фаской тарелки клапана и фаской седла, а, следовательно, и к снижению компрессии в цилиндре.

Кроме того, в результате просачивания под давлением горячих отработавших газов через образующийся зазор между сопряженными поверхностями фасок тарелки и седла происходит постоянный нагрев клапана,

ускоренное образование раковин и прогар фаски тарелки. Все это значительно сокращает ресурс работы клапана, а, следовательно, и двигателя.

Представленные данные свидетельствуют, что величина среднего износа сопряженных поверхностей впускного клапана составляет: диаметр рабочей части стержня под втулкой – 0,05 мм при норме 0,022 мм; диаметр верхней части фаски – 1,11 мм; диаметр нижней части фаски – 1,19 мм; высота тарелки – 0,30 мм, высота фаски – 0,24 мм.

Величина среднего износа сопряженных поверхностей выпускного клапана составляет: изменение диаметра рабочей части стержня под втулкой – от -0,4 до +0,7 мм при норме 0,022 мм: диаметр верхней части фаски – 1,13 мм; диаметр нижней части фаски – от -0,13 до +0,18 мм; высота тарелки – -0,18 мм, высота фаски – -0,81 мм.

Измерения твердости проводили на впускных и выпускных клапанах ГРМ стандартных (сравнительных) и стандартных, отработавших срок. На каждом из клапанов было произведено измерение твердости поверхностного слоя в шести позициях (рис. 6), в каждой позиции производилось измерение минимум пять раз, после чего данные измерений были собраны в таблицу 3. Из полученных данных были определены средние значения, исходя из которых можно делать выводы о твердости поверхностного слоя клапана ГРМ.

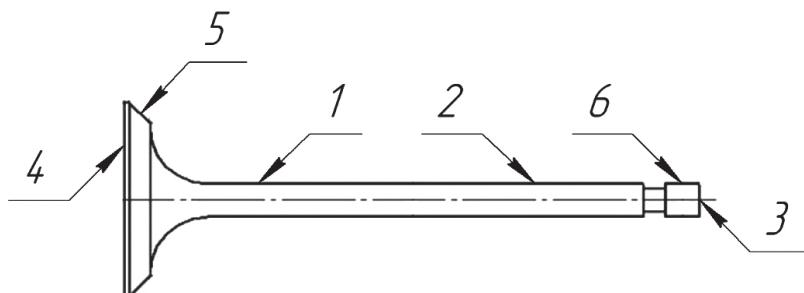


Рис. 6. Позиции замера твердости поверхности клапана ГРМ

Таблица 3.

Средние значения по позициям замеров твердости поверхностного слоя стандартного и стандартного отработанного клапанов выработавшего ресурс двигателя 4216

Позиции измерения твердости	Средние значения твердости по шкале Роквелла (HRC)		Разность значений твердости
	Клапан стандартный	Клапан стандартный отработанный	
Клапан впускной			
1	37,6	29,0	8,6
2	37,9	31,3	6,6
3	52,8	52,3	0,5
4	51,0	26,1	4,9
5	31,4	20,3	11,1
6	26,7	45,5	-18,8
Клапан выпускной			
1	37,9	36,5	0,6
2	39,6	44,1	-4,5
3	48,0	59,3	-11,3
4	48,6	46,6	2,0
5	38,6	36,7	1,9
6	38,6	41,3	-3,3

Представленные в таблице 4 результаты свидетельствуют об изменении твердости поверхностного слоя в процессе его работы в двигателе. Так, на впускном клапане по первым пяти позициям наблюдается снижение твердости поверхностного слоя, наибольшее на 8,6 и 11,1 ед. HRC, соответственно позиция 1 (сопрягающая поверхность стержня клапана и направляющей втулки) и позиция 5 (поверхность фаски клапана). В позиции 6 (верхняя часть стержня клапана) наблюдается значительное увеличение твердости на 18,8 ед. HRC, что следует объяснить образованием наклела поверхности в результате образующихся ударных нагрузок взаимодействия клапана и коромысла.

На выпускном клапане также наблюдается повышение твердости в верхней части стержня клапана, в частности на срезе верха стержня (позиция 3) на 11,3 ед. HRC, что следует объяснить образованием наклела поверхности в результате образующихся ударных нагрузок взаимодействия клапана и коромысла. В позиции 1 (сопрягающая поверхность стержня клапана и направляющей втулки) и позиция 5 (поверхность фаски клапана) твердость находится на одном уровне.

жающие ресурс его работы. К ним следует отнести и разместить по вредности следующие дефекты: прогар клапана; перекос рабочей фаски тарелки клапана и раковины на ее поверхности, асимметрия и неравномерный износ фаски, задиры и раковины на стержне клапаны, удлинение клапана. Определены величины среднего износа сопряженных поверхностей клапанов. Так средний износ выпускного клапана, как работающего в более тяжелых условиях составляет: изменение диаметра рабочей части стержня под втулкой – от -0,4 до +0,7 мм при норме 0,022 мм; диаметр верхней части фаски – 1,13 мм; диаметр нижней части фаски – от -0,13 до +0,18 мм; высота тарелки – -0,18 мм, высота фаски – -0,81 мм. Определены величины изменения твердости поверхностного слоя клапанов в процессе их работы в двигателе. На впускном клапане почти по всей поверхности наблюдается снижение твердости поверхностного слоя, наибольшее – на 8,6 и 11,1 ед. HRC, соответственно на сопрягающейся поверхности стержня клапана и направляющей втулки и на поверхности фаски клапана, а в верхней части стержня клапана в результате наклела от ударных нагрузок клапана и коромысла наблюдается значительное увеличение твердости на 18,8 ед. HRC. На выпускном клапане также наблюдается повышение твердости в верхней части стержня клапана, в частности на срезе верха клапана на 11,3 ед. HRC, что объясняется также образованием наклела. На сопрягающейся поверхности стержня клапана и направляющей втулки, а также на поверхности фаски твердость находится на одном уровне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований применительно к двигателю УМЗ-4216, работавшему в тяжелом режиме городского пассажирского транспорта на КПГ (метане), определены основные дефекты впускного и выпускного клапанов ГРМ, значительно сни-

**Список литературы**

1. Охотников, Б. Л. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания : учебное пособие / Б. Л. Охотников. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 140 с.
2. Паничкин, А. В. Оценка ресурса двигателя автобусов, работающих на газовом топливе, эксплуатируемых в режиме городских перевозок пассажиров / А. В. Паничкин, Н. В. Голубенко // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 3 (50). – С. 123-129.
3. УМЗ-4213, УМЗ-4216 : Устройство. Ремонт. Техническое обслуживание. – Ульяновск : ОАО «УМЗ», Автоальфа, 2008. – 66 с.
4. Двигатель 4216 и его исполнения : Руководство по эксплуатации 4216.3902010 РЭ. – Ульяновск : ОАО «УМЗ», 2007. – 45 с.

## УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Планируемый к изданию 20-й номер научно-практического журнала «Строитель Донбасса» будет включать статьи и сообщения, в которых излагаются результаты исследований и разработок по направлениям:

### СТРОИТЕЛЬСТВО

- теория расчета строительных конструкций;
- работа материала в составе конструкции, работа материала в условиях хрупкого разрушения, при циклических воздействиях и т.п.;
- проблемы формообразования и оптимальное проектирование зданий и сооружений;
- нагрузки и воздействия на конструкции, здания и сооружения;
- экспериментальные исследования строительных конструкций;
- изготовление строительных конструкций;
- теоретические основы надежности конструкций зданий и сооружений;
- обеспечение и прогнозирование эксплуатационной надежности уникальных сооружений;
- техническая диагностика и мониторинг конструкций зданий и сооружений;
- теория формирования и совершенствования строительных технологий;
- анализ технологических процессов при возведении, реконструкции, усиливании, восстановлении строительных объектов;
- системы комплексных строительных технологий при возведении зданий, сооружений и инженерных сетей;
- организация и управление строительным производством при возведении, реконструкции, усилении, восстановлении строительных объектов;
- технология и организация эксплуатации зданий и сооружений промышленных предприятий и инженерных сетей;
- технология и организация ведения работ при демонтаже (разборке) зданий и сооружений;
- анализ эффективности применения основных строительных машин и механизмов при осуществлении строительно-монтажных, реконструктивных и демонтажных работ;
- строительные материалы.

### ИНЖЕНЕРНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

- интенсификация процессов биологической очистки городских сточных вод;
- современные экологически безопасные технологии обработки осадка, инновационные подходы к разделению иловых смесей в биологических реакторах;
- повышение эффективности работы систем подачи и распределения воды;
- оптимизация режима работы теплогенерирующего оборудования систем теплоснабжения;
- использование низкопотенциальной теплоты в системах тепло- и холодоснабжения;
- энергосбережение в системах отопления, вентиляции и кондиционирования;
- обеспечение безопасности строительных объектов при возникновении ЧС техногенного характера;
- изучение методов предотвращения обрушения строительных объектов при катастрофах;
- повышение надежности систем городского хозяйства;
- развитие транспортных систем населенных пунктов;
- комплексная реконструкция территорий промышленных предприятий региона электротехника и автоматизация в строительстве.

### АРХИТЕКТУРА

- исследование проблем архитектуры, ее стилеобразования, эстетики и художественной выразительности;
- процессы формирования современной градостроительной среды объектов городской застройки;

- особенности развития садово-парковой и ландшафтной архитектуры в современных социально-экономических условиях;
- разработка основных положений и приоритетных подходов к сохранению и развитию архитектурно-исторической среды в рамках концепции устойчивого развития городских территорий;
- определение фундаментальных основ и приоритетных подходов развития и совершенствования жилищной архитектуры в условиях нового строительства и реконструкции;
- особенности формирования архитектурной среды жизнедеятельности и реабилитации маломобильных групп населения в городах промышленного типа;
- исследование региональных особенностей архитектуры зданий и сооружений и их комплексов, в том числе объектов историко-архитектурного культурного наследия;
- определение научных и практических направлений развития архитектурно-градостроительной реконструкции зданий и сооружений, городских территорий гражданского и промышленного назначения;
- прогнозные исследования в области архитектурной модернизации промышленных зданий и сооружений;
- теоретические и экспериментальные основы градостроительного использования нарушенных территорий в промышленных городах.

## **ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И НЕДВИЖИМОСТИ**

- актуальные вопросы экономики строительства и жилищно-коммунального хозяйства;
- теоретические и прикладные аспекты управления проектами;
- новое в экспертизе и управлении недвижимостью;
- инвестиционные проблемы развития промышленного и гражданского строительства;
- цифровая экономика в строительстве: перспективы развития;
- кадровое обеспечение строительства и жилищно-коммунального хозяйства;
- отраслевые приоритеты научных исследований в области экономики и управления строительством и жилищно-коммунальным хозяйством.

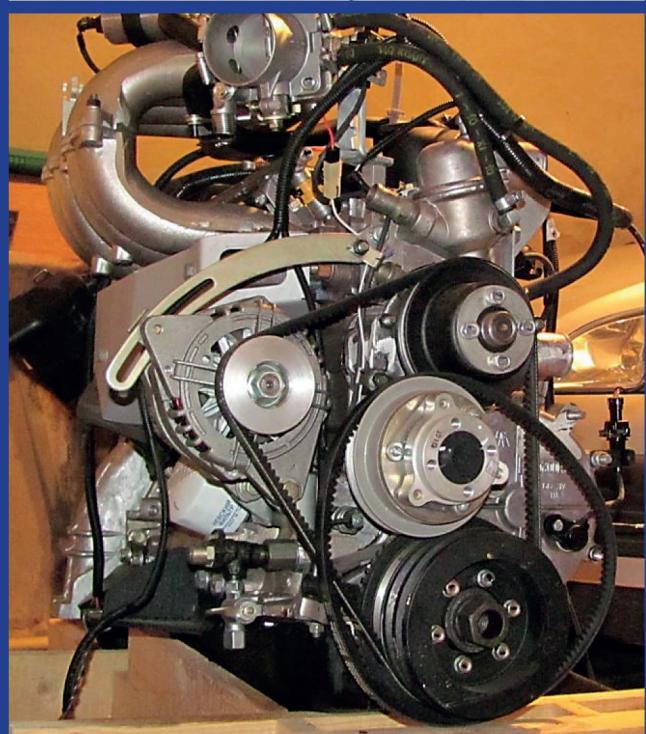
## **ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

- автотранспортное обеспечение строительного комплекса;
- совершенствование конструкции, рабочего процесса и технологии ремонта современных автотранспортных средств;
- эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов;
- подъёмно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование;
- повышение комплексной безопасности технологического процесса при использовании наземных транспортно-технологических машин;
- физико-химическое материаловедение транспортно-технологических машин и оборудования.

**Материалы просим направлять до 25 августа 2022 г. по адресу:  
286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, дом 2,  
ГОУ ВПО «ДОННАСА». Электронная почта: strdon@donnasa.ru**

**При подаче материалов придерживайтесь «Требований для авторов»  
с целью обеспечения наиболее быстрой публикации ваших статей.**

**С уважением, редакционная коллегия**





ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»



ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2



+38(0623) 43-70-33



[mailbox@donnasa.org](mailto:mailbox@donnasa.org)