

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

Научно-теоретический журнал
Издаётся с марта 1958 г.
Выходит один раз в месяц

№ 8 (656)

Август 2013 г.

Главный редактор В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.Л. Баладинский, д-р техн. наук, проф.
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
П.А. Дмитриев, д-р техн. наук, проф.
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф.
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)
Е.М. Лобанов, д-р техн. наук, проф.
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.И. Морозов, д-р техн. наук, проф.
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф.
Ю.П. Правдинец, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.
И.Б. Соколов, д-р техн. наук, проф.
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
Тел./факс +7(383)266-28-59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru
Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 26.08.13. Формат 70×108¹/16
Усл. печ. л. 10,33+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 4300

ООО «Партнеры Сибири»,
630009, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2013

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Барков М.С., Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Деордиеv С.В., Рожков А.Ф. Исследования напряженно-деформированного состояния древесины в узлах ферм при различных технических решениях упорных элементов с переменной изгибной жесткостью 5

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Дукарт А.В., Олейник А.И. О влиянии нелинейности параметров подстроичного звена двухмассового динамического гасителя на его эффективность при гармоническом воздействии с нестабильной частотой 13

Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Проверка геометрической неизменяемости конструкций на основе ослабления связей 22

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Гарькина И.А., Данилов А.М. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования 28

Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К. Комплексное изучение процессов повреждения цементного камня растворами карбоновых кислот 34

Абдрахимов В.З., Колпаков А.В. Инновационные направления использования кальцийсодержащего нанотехногенного сырья: осадок-отхода сточных вод, отхода пыли-уноса асфальтобетонных заводов, шлама от водоочистки воды и гальванического шлама в производстве кирпича	41
Завадская Л.В., Бердов Г.И., Агалакова Я.С., Шишмакова Е.А. Упрочнение гипсового камня с введением дисперсных минеральных добавок	47
ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА	
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Анферов В.Н., Недавний О.И., Базилевич С.В., Кузнецов С.М. Повышение организационно-технологической надежности проектирования строительных объектов	51
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Шиляев М.И., Пеняевский В.В. Экспериментальное определение констант универсального метода расчета инерционных пылеуловителей	64
Бройда В.А. Расчет параметров работы теплообменника фанкойла с учетом устанавливающегося состояния воздуха в помещении	72
Семенов В.Н., Сазонов Э.В., Китаев Д.Н., Тертычный О.В., Щукина Т.В. Влияние энергосберегающих технологий на развитие тепловых сетей	78
СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ	
Столбов Ю.В., Столбова С.Ю., Нагаев Д.О. Исследование точности высотного положения поверхностей конструктивных слоев дорожных одежд при разных шагах нивелирования	84
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Гладышев Г.В., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Чубаров П.В. Результаты исследования рабочего процесса физико-математической модели пневмоударного механизма с дополнительными проточными камерами	89
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Бардаханов С.П., Говердовский В.Н., Труфанов Д.Ю., Павленко А.М., Михаэлис М.В. Разделение наноразмерных частиц в суспензии под действием объемной силы	97
Калугин Ю.Б. Особенности и сущность расчета вероятностных временных параметров отдельной работы (технологического процесса)	104
Сенющенкова И.М. Методологические аспекты акустического воздействия на окружающую среду в период строительства	110

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION
OF CONSTRUCTION
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**NEWS OF HIGHER
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**
CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal
Published since March 1958
Monthly

N 8 (656)

August 2013

Editor-in-Chief V.G. Sebeshev, PhD, Prof.,
Honour. Mem. RAACS

Editorial Board:

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.L. Baladinsky, DSc (Eng), Prof.
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS,
P.A. Dmitriyev, DSc (Eng), Prof.
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
Ye.M. Lobanov, DSc (Eng), Prof.
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS
Yu.P. Pravdivetz, DSc (Eng), Prof.
V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS
I.B. Sokolov, DSc (Eng), Prof.
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS

Barkov M.S., Inzhutov I.S., Dmitriev P.A., Deordiev S.V., Rozhkov A.F. Researches of the is intense-deformed condition of wood in knots of farms at various technical decisions of persistent elements from a variable rigidity 5

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

Dukart A.V., Oleinik A.I. Effect of nonlinear trimmer link of two-mass dynamic absorber to its efficiency under harmonic excitation with unstable frequency 13

Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Verification of the stability of geometrical shape of structures based on weakening of constraints ... 22

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Garkina I.A., Danilov A.M. Experience the design of composite materials: some aspects of mathematical modeling 28

Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K. Comprehensive study of the process of damage cement matrix solution of the carboxylic acids 34

Abdrakhimov V.Z., Kolpakov A.V. Innovate ways of using the nano calcium-industrial raw material: sludge-waste sewage, dust-ash



The editorial office's address:
113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008
Phone number/fax +7(383)266-28-59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

waste of coating plants, sludge from water purification and galvanic sludge in brick production	41
Zavadskaya L.V., Berdov G.I., Agalakova Ya.S., Shishmakova E.A. Strengthening gypsum with the introduction disperse mineral supplements	47
ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION.	
AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY	
Anferov V.N., Nedavniy O.I., Bazilevich S.V., Kuznetsov S.M. Increase of organizational-technological reliability of erection of objects	51
SANITARY ENGINEERING	
Shilyaev M.I., Penyavsky V.V. Experimental definition of constants of a universal method of colculation of inertial	64
Broyda V.A. Calculation of operating parameters for fancoil heat exchanger considering steady indoor conditions for the air	72
Semenov V.N., Sazonov E.V., Kitaev D.N., Tertychny O.V. Shchukina T.V. The influence of energy-saving technologies on the development of the structure of thermal networks	78
CONSTRUCTION OF MOTOR ROADS AND BRIDGES	
Stolbov Yu.V., Stolbova S.Yu., Nagaev D.O. Research of accuracy of high-rise position of surfaces of constructive layers of road clothes at different steps of levelling	84
BUILDING AND ROAD MACHINES	
Gladyshev G.V., Abramenkov D.E., Abramenkov E.A., Dedov A.S., Chubarov P.V. Results of working process physical-mathematical models pneumoshock mechanism with extra flow chamber	89
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Bardakhanov S.P., Goverdovsky V.N., Trufanov D.Yu., Pavlenko A.M., Mihaelis M.V. Separation of nanoscale particles in suspension under the body force action	97
Kalugin Yu.B. Features and essence of calculation of probabilistic temporary parameters for work (technological process)	104
Senyushchenkova I.M. Methodological aspects of acoustic environmental impact during construction	110

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.011.1

**М.С. БАРКОВ, И.С. ИНЖУТОВ, П.А. ДМИТРИЕВ, С.В. ДЕОРДИЕВ,
А.Ф. РОЖКОВ**

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В УЗЛАХ ФЕРМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ УПОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния древесины зоны контакта в узлах ферм при различных упорных элементах с переменной жесткостью. Исследовано влияние увеличения площади контакта упора с древесиной на распределение и величину концентраторов напряжений и влияние жесткостных характеристик упорных элементов на деформации древесины в зоне контакта.

Ключевые слова: концентрация напряжений, переменная жесткость, приведенная жесткость, упорный элемент.

В тяжело нагруженных узлах ферм и арок наблюдается большая концентрация напряжений под упорами постоянной жесткости, приводящая впоследствии к образованию трещин в древесине элементов и разрушению конструкции. Внимание к исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) древесины в узлах привлек неудачный опыт применения в покрытии зданий деревометаллических безраскосных ферм (еще называемых треугольными арками) средних пролетов. В процессе эксплуатации таких покрытий в деревянных элементах верхних поясов ферм отмечалось появление продольных трещин. Это, в свою очередь, зачастую приводило к аварийному состоянию многих построенных зданий. Данное обстоятельство побудило многих специалистов заняться исследованием местных напряжений в узлах деревянных конструкций.

Вопросам оценки напряженно-деформированного состояния при передаче усилий на торцы деревянных элементов посвящены работы В.И. Аганина, П.А. Дмитриева, Б.В. Лабудина, Д.В. Лоскутовой, О.А. Михайленко, А.Я. Найчука, Р.Б. Орловича, С.Б. Турковского и др. В большей части работ внимание уделено учету концентраций напряжений под кромками упорных элементов постоянной жесткости.

В работах О.А. Михайленко изучаются конструктивные приемы предотвращения возникновения концентраций напряжений путем применения упорных элементов переменной жесткости. Исследуется влияние геометрических размеров упоров на НДС древесины под ними [1].

© Барков М.С., Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Деордиев С.В., Рожков А.Ф., 2013

Руководствуясь СП 64.13330.2011 [2], авторы аналитическим расчетом деревянного элемента на смятие упором установили требуемые геометрические размеры упора № 1 (рис. 1). Они оказались равными $250 \times 180 \times 100$ мм при действующем продольном усилии в 581,7 кН, которое предварительно определялось статическим расчетом большепролетной фермы пролетом 48 м (фермы в покрытии поставлены с шагом 12 м). В этом случае согласно нормативной методике сжимающее усилие в верхнем поясе фермы должно создать равномерное распределение напряжений, сминающих древесину под упором. Их значение не должно превышать 14 МПа. Заметим, что упор № 1 выполнен с постоянной жесткостью по его длине.

Для проверки работоспособности нормативной методики с помощью программного комплекса SolidWorks выполнен расчет этого сопряжения. Расчетная модель включала в себя деревянный элемент, упорные подушки и центрирующий валик. Анализ результатов расчета узла позволил выявить концентраторы напряжений под краями упора, где возникают максимальные деформации $\delta_{\text{экв}} = 0,002$ мм (рис. 1, б) и значения сминающих эквивалентных напряжений достигают $\sigma_{\text{экв}} = 21$ МПа (рис. 1, а), что больше расчетного сопротивления древесины смятию вдоль волокон $R_{\text{см}} = 14$ МПа.

У конструкторов сложилось представление, что одним из конструктивных приемов по снижению концентрации напряжений в древесине может служить подрезка углов торцов деревянных элементов верхнего пояса в узлах. Однако анализ результатов расчета позволил сделать вывод о том, что подрезка не оказывает влияния на характер распределения напряжений и возникновение концентраторов. Так, в зоне концен-

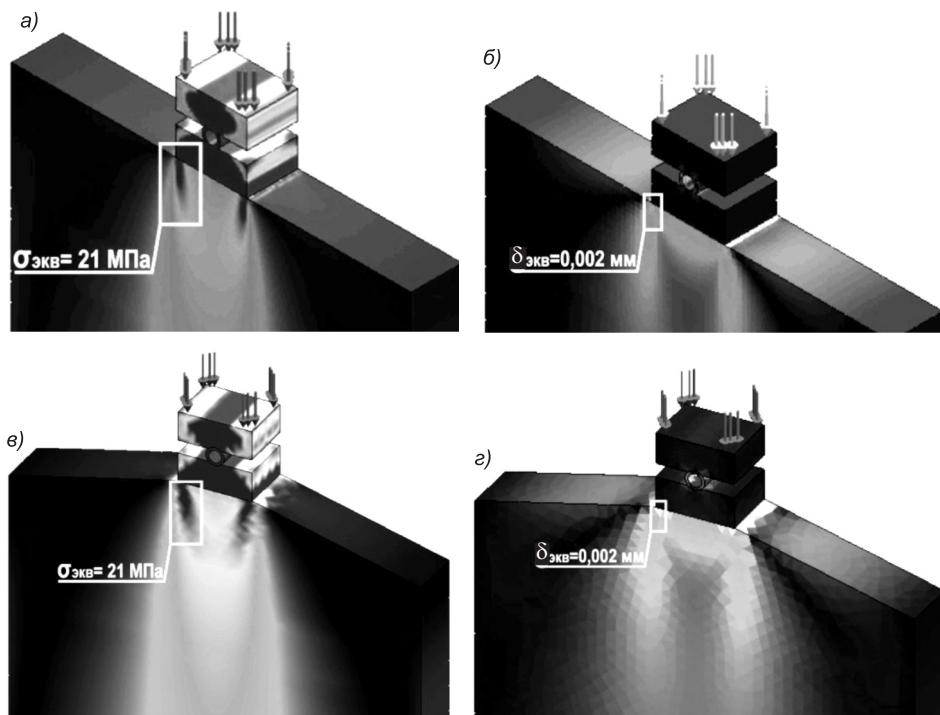


Рис. 1. Конечно-элементная расчетная модель с упором № 1
а, в — изополя эквивалентных напряжений; б, г — изополя эквивалентных деформаций

Приведенная жесткость упорных элементов $EI_{y,p} \times 10^4$ Н · м

Упоры	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11
Приведенная жесткость	848,1	13,5	17,3	95,1	69,4	101,9	168,5	229,2	333,1	758,9

трации эквивалентные напряжения смятия составляют $\sigma_{\text{экв}} = 21$ МПа (рис. 1, в), максимальные эквивалентные деформации $\delta_{\text{экв}} = 0,002$ мм (рис. 1, г).

Это потребовало увеличения площади контакта упора и подбора изгибной жесткости, при которой исключается возникновение концентраторов напряжений.

Для подбора эффективной конструкции авторами рассмотрено и за-проектировано десять упорных элементов с различной изгибной жесткостью.

Подбор изгибной жесткости упоров осуществляли варьированием толщин, длин пластин, составляющих упорный элемент, включением в работу треугольной траверсы. Для обеспечения удобства сопоставления для каждого упорного элемента вычислили приведенную жесткость (см. таблицу).

Приведенную жесткость получили следующим образом:

- на чертеже вертикально, по линии симметрии расположили фронтальные виды упорных элементов;

- в местах изменения геометрических характеристик каждого элемента провели линии (пунктирные) и получили семь сечений для каждого упора. Затем для каждого сечения вычислили жесткость EI_y . В итоге получили значения семи ступеней изгибной жесткости для каждой детали. В связи с тем, что конструкции деталей симметричные, жесткостные значения определяли для сечений по одну сторону от линии симметрии;

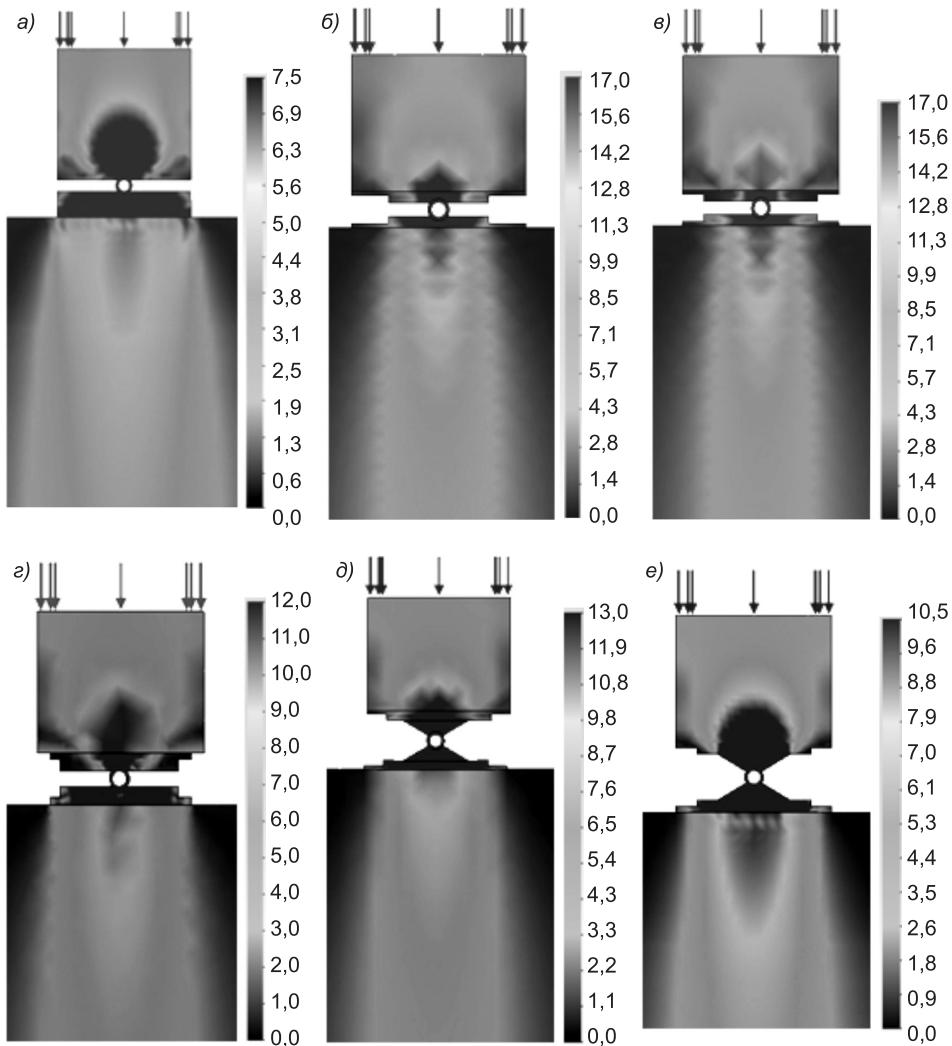
- для оценки и сравнения жесткостных характеристик упоров вывели приведенную жесткость каждого путем суммирования значений жесткости каждого характерного сечения и делением на $1/2$ длины упорной подушки.

На рис. 3 показаны эпюры жесткостных характеристик для упомянутых технических решений упорных элементов (с левой стороны относительно центра упора).

В упорном элементе № 2 при приведенной жесткости $EI_{y,p} = 848,1 \times 10^4$ Н · м увеличение площади контакта с древесиной позволило уменьшить напряжения, однако при этом не удалось исключить концентраторы. Эквивалентные напряжения по краям упорного элемента составили $\sigma_{\text{экв}} = 6,5$ МПа (рис. 2, а). Они не превышают расчетного сопротивления древесины смятию вдоль волокон $R_{\text{см}} = 14$ МПа, что удовлетворяет СП 64.13330.2011 [1]. Возникновение концентраторов напряжений под краями упора свидетельствует о его достаточно большой жесткости.

Следует отметить, что для улучшения визуализации изополей напряжений (рис. 2) принятые различные масштабы графической шкалы.

Расчеты контактного соединения древесины с упором № 3 свидетельствуют о его недостаточной изгибной жесткости ($EI_{y,p} = 13,5 \times 10^4$ Н · м).



Максимальные главные напряжения под валиком (рис. 2, б) достигают значения $\sigma_{\text{экв}} = 17 \text{ МПа}$. Края упора по 80 мм с каждой стороны не включены в работу. Об этом свидетельствует отсутствие напряжений под ними. Это связано с малой жесткостью указанных консолей.

При увеличении в упоре № 4 длины верхней пластины толщиной 20 мм на 80 мм его жесткость возросла до $EI_{y,\text{п}} = 17,3 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, но главные напряжения снизились незначительно, всего лишь до $\sigma_{\text{экв}} = 16,8 \text{ МПа}$ (рис. 2, в). Пластина толщиной 12 мм частично включилась в работу.

Путем варьирования толщины t , длины верхних пластин l , а также включения в работу опорных ребер, вследствие чего увеличилось количество ступеней изгибной жесткости, удалось снизить концентрацию напряжений и достичь эффективного соотношения геометрических характеристик в упорных элементах № 5, 6.

В деревянном элементе под упором № 5 с жесткостными характеристиками $EI_{y,\text{п}} = 95,1 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ максимальные напряжения составили $\sigma_{\text{экв}} = 11,5 \text{ МПа}$ (рис. 2, г), под упором № 6 с $EI_{y,\text{п}} = 69,4 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ — $\sigma_{\text{экв}} = 11,7 \text{ МПа}$ (рис. 2, д).

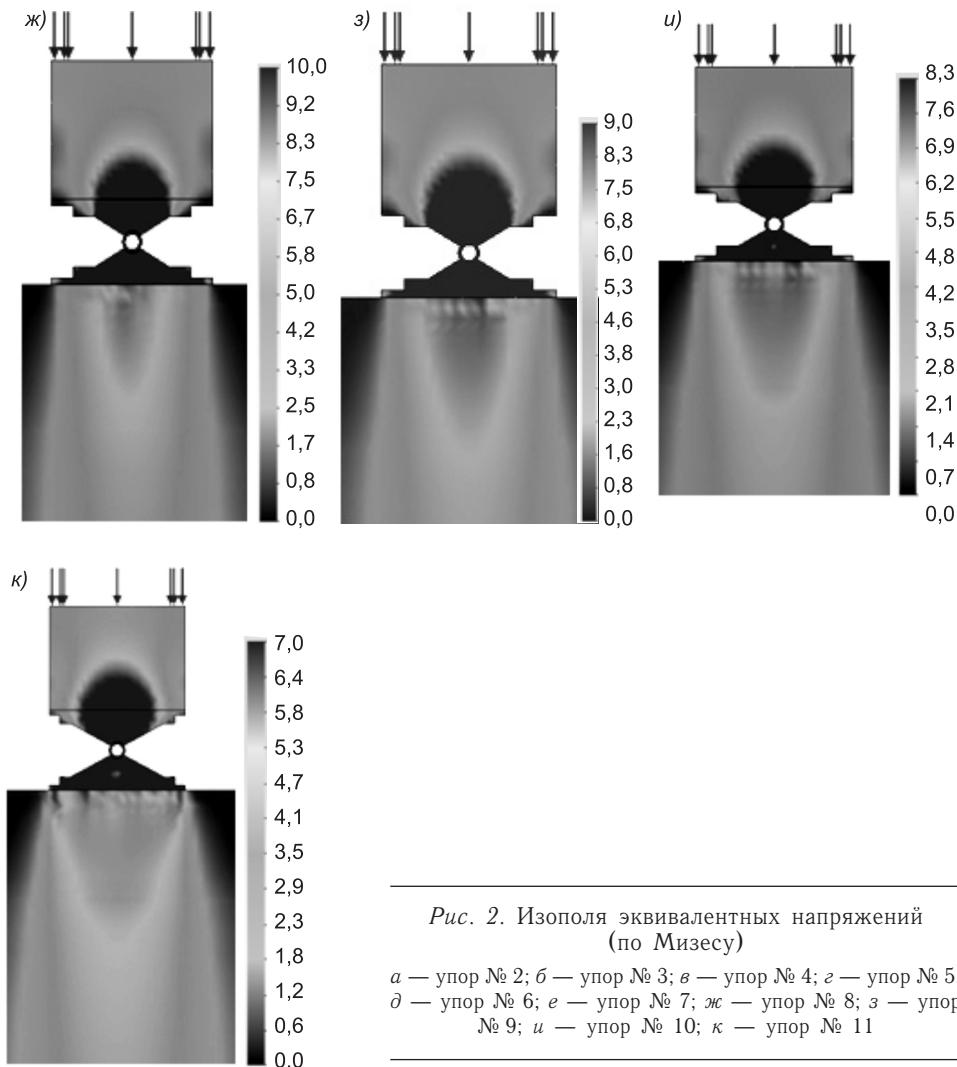


Рис. 2. Изополя эквивалентных напряжений
(по Мизесу)

а — упор № 2; *б* — упор № 3; *в* — упор № 4; *г* — упор № 5;
д — упор № 6; *е* — упор № 7; *ж* — упор № 8; *з* — упор
№ 9; *и* — упор № 10; *к* — упор № 11

Для установления влияния формы упора с различными жесткостными характеристиками на НДС древесины в зоне контакта дополнительно проанализированы пять упоров.

В упорном элементе № 7 увеличением толщины пластины, контактирующей с древесиной до 20 мм, удалось повысить приведенную жесткость до $EI_{y,p} = 101,9 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и при этом напряжения уменьшились до $\sigma_{\text{экв}} = 10,5 \text{ МПа}$ (рис. 2, *е*).

Повышение приведенной жесткости упоров № 8, 9 до $EI_{y,p} = 168,5 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $EI_{y,p} = 229,2 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ соответственно путем увеличения толщины второй пластины до 32 мм и толщины опорных ребер до 20 мм обусловило снижение напряжений в древесине $\sigma_{\text{экв}} = 8,6 \text{ МПа}$ (рис. 2, *ж*) и $\sigma_{\text{экв}} = 8,5 \text{ МПа}$ (рис. 2, *з*). Жесткость упора № 9 на 26,6 % превышает жесткость упора № 8, однако в величине напряжений и характере их распределения в древесине существенной разницы нет. Изменение толщины ребра с 10 до 20 мм не оказалось влияния на НДС древесины. Выполнив дополнительную серию расчетов на проверку устойчивости ребер, определили, что недопустимые деформации происходят при

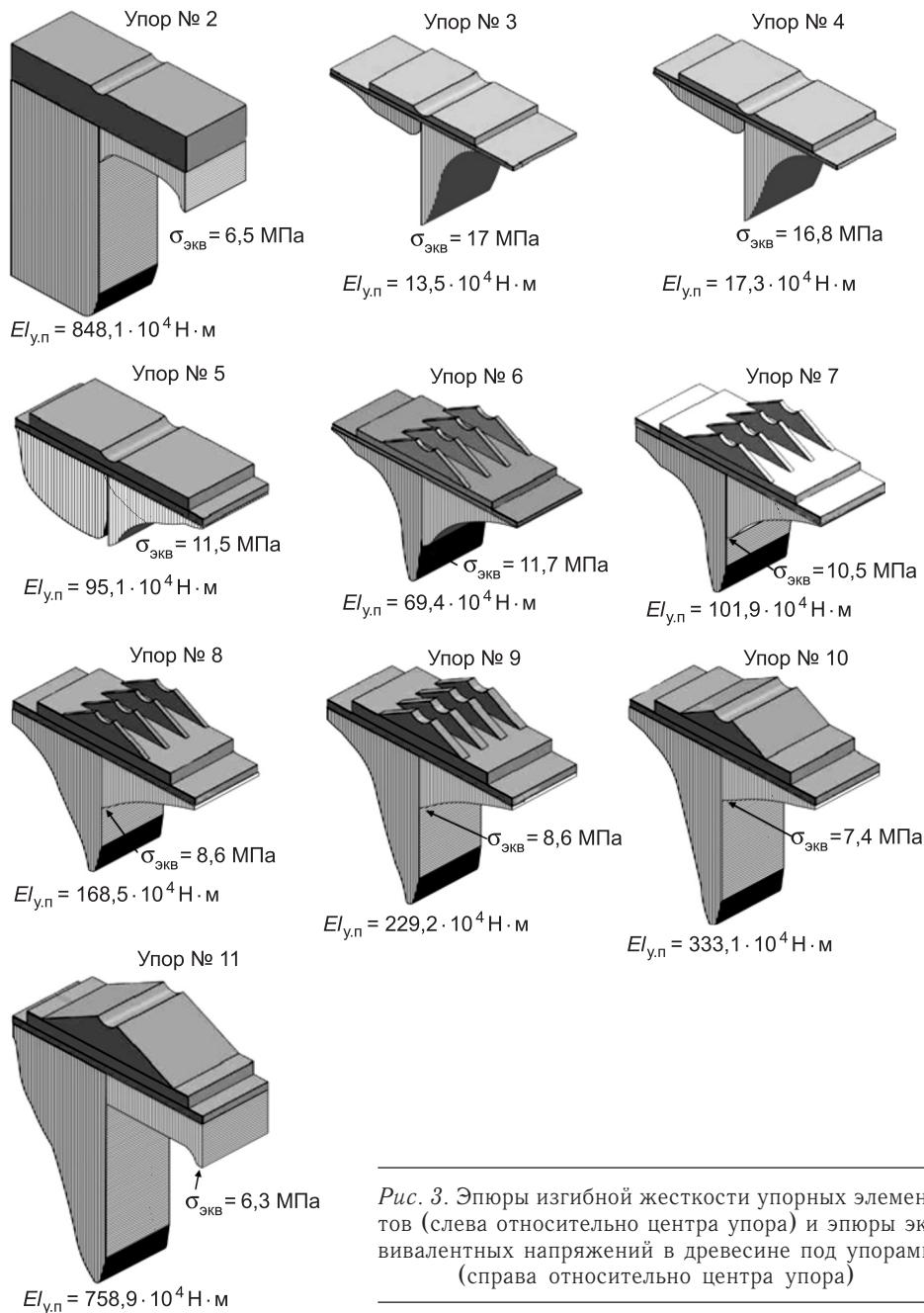


Рис. 3. Эпюры изгибной жесткости упорных элементов (слева относительно центра упора) и эпюры эквивалентных напряжений в древесине под упорами (справа относительно центра упора)

нагрузке, равной 1000 кН. Таким образом, толщина ребер 10 мм достаточно для восприятия усилия 581,7 кН.

В упорной подушке № 10 для увеличения приведенной жесткости до $EI_{y,p} = 333,1 \times 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ взамен четырех распределительных ребер использовалась цельная монолитная траверса. На рис. 2, *и* видно, что площадь распределения напряжений увеличилась по длине упора. Эквивалентные напряжения снизились до $\sigma_{экв} = 7,4 \text{ МПа}$.

С целью поиска ответа на вопрос, при каких жесткостных характеристиках упоров в древесине возникают концентраты напряжений, продолжили модификацию упора № 10: длину второй пластины увеличили

на 60 мм, длину траверсы — до 360 мм, а высоту до 84 мм. В результате приведенная жесткость упора № 11 $EI_{y,p} = 758,9 \times 10^4$ Н · м приблизилась к жесткости упора № 2 с $EI_{y,p} = 848,1 \times 10^4$ Н · м (рис. 3).

Согласно изополям напряжений (рис. 2, *κ*) в древесине под краями упора № 11 образовались концентраторы напряжений. В зоне концентрации $\sigma_{\text{экв}} = 6,3$ МПа.

Проследив эволюцию упоров (рис. 3), можно утверждать, что увеличение площади контакта упора с древесиной не приводит к исключению концентраторов напряжений, а лишь только к общему снижению напряжений. Основной параметр, от которого зависит величина напряжений и наличие концентраторов, — приведенная жесткость упорных элементов.

С увеличением приведенной изгибной жесткости упора в древесине снижаются напряжения, вследствие чего повышается несущая способность соединения. Следует отметить, что при увеличении приведенной изгибной жесткости до $EI_{y,p} = 650 \times 10^4$ Н · м $\div EI_{y,p} = 850 \times 10^4$ Н · м несущая способность соединения существенно снижается (на 20–25 %) за счет образования в древесине по краям упора концентраторов напряжений (см. рис. 3, упор № 2, 11).

Таким образом, использовать упоры с высокой приведенной жесткостью оказывается не рационально.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дмитриев, П.А. О работе и расчете опорных узлов деревометаллических треугольных безраскосных ферм (Сообщение 2) [Текст] / П.А. Дмитриев, О.А. Михайленко // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 1. — С. 4–9.
2. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.

БАРКОВ Максим Сергеевич, канд. техн. наук, ассист.; E-mail: barkovms@gmail.com

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ИНЖУТОВ Иван Семенович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: ivaninzhutov@gmail.com

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ДМИТРИЕВ Петр Андреевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: dpr.dpr@rambler.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ДЕОРДИЕВ Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: deordievs@yandex.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

РОЖКОВ Александр Федорович, канд. техн. наук, доц.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено 22.07.13

Barkov Maksim Sergeevich, candidate of technical sciences, assistant; E-mail: barkovms@gmail.com, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Inzhutov Ivan Semenovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: ivaninzhutov@gmail.com, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Dmitriev Petr Andreevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: dpr.dpr@rambler.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Deordiev Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: deordievs@yandex.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Rozhkov Aleksandr Fedorovich, candidate of technical sciences, assistant professor;
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**RESEARCHES OF THE IS INTENSE-DEFORMED CONDITION
OF WOOD IN KNOTS OF FARMS AT VARIOUS TECHNICAL
DECISIONS OF PERSISTENT ELEMENTS FROM
A VARIABLE RIGIDITY**

Results of research of the is intense-deformed condition of wood of a zone of contact in knots of farms are presented at various persistent elements with variable rigidity. Influence of increase in the area of contact of an emphasis with wood on distribution and size of concentrators of pressure, and influence characteristics of persistent elements on wood deformation in a contact zone is investigated.

Key words: stress concentration, variable stiffness, reduced stiffness, stop element.

REFERENCES

1. Dmitriev, P.A. On the work and wood-based support units triangular bezraskosnyh farms (Report 2) [Text] / P.A. Dmitriev, O.A. Mikhaylenko / / News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 1. — P. 4–9.
 2. SP 64.13330.2011. Wooden structures. Updated edition of CN&R II-25-80.
-

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.042:534.014.2

А.В. ДУКАРТ, А.И. ОЛЕЙНИК

О ВЛИЯНИИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТРОЕЧНОГО ЗВЕНА ДВУХМАССОВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ГАСИТЕЛЯ НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С НЕСТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТОЙ

Рассматриваются стационарные колебания одномассовой защищаемой конструкции, оборудованной нелинейным двухмассовым динамическим гасителем при гармонической возмущающей нагрузке. Предполагается, что мягкая нелинейность гасителя связана с переменностью массы подстроичного звена. Для определения движения системы используется способ разложения функций перемещений масс в ряды по ортогональным полиномам Чебышева. При анализе поведения защищаемой конструкции с гасителем принимается, что возмущающая нагрузка обладает нестабильной частотой. Показано, что введение нелинейности мягкого типа в подстроичном звене гасителя заметно (до 20 %) повышает эффективность виброзащиты и существенно (примерно вдвое) снижает уровень колебаний массы подстроичного звена.

Ключевые слова: защищаемая конструкция, двухмассовый динамический гаситель колебаний, нелинейность мягкого типа, гармоническая нагрузка, стационарные колебания, ортогональные полиномы Чебышева.

Включение в структуру динамических гасителей колебаний (ДГК) нелинейных связей [1, 2] существенным образом влияет на их работу. Вместе с тем характер влияния нелинейности параметров гасителей на свойства многомассовых ДГК недостаточно изучен. В данной статье рассматриваются возможности включения нелинейных звеньев в структуру многомассовых ДГК каскадного типа. В отличие от ранее исследованных гасителей с нелинейностями жесткого типа [1], здесь анализируется влияние на работу многомассовых ДГК нелинейностей мягкого типа одного из звеньев. Такая нелинейность свойственна различным реальным ситуациям, например: одно из звеньев гасителя представляет собой математический или физический маятник, совершающий колебания с большими амплитудами; в связи с использованием в гасителях одной или нескольких масс, величины которых увеличиваются с ростом амплитуд их колебаний. В частности, увеличение массы гасителя может происходить, если она выполнена в виде гайки, движущейся по направляющей с нерегулярной винтовой нарезкой, или в случае вращательного движения массы гасителя, возникающего вследствие преобразования движения и сопровождающегося намоткой на нее массивной нити.

В качестве модели исследования примем двухмассовый динамический гаситель колебаний каскадного типа с нелинейным подстроичным

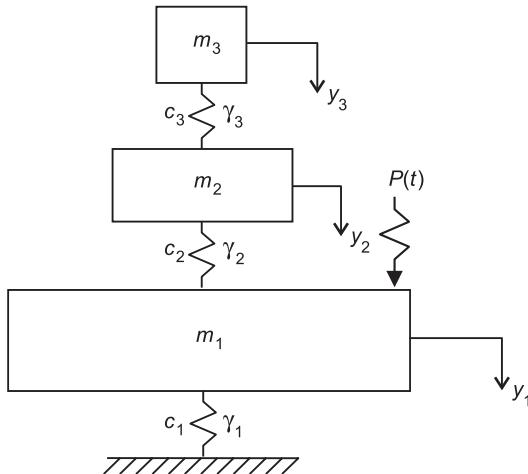


Рис. 1. Двухмассовый динамический гаситель колебаний с нелинейным подстроичным звеном

звеном (рис. 1). Предполагается, что защищаемая конструкция моделируется системой с одной степенью свободы. Возмущающая нагрузка $P(t)$ является гармонической, имеет постоянную амплитуду P_0 и нестабильную частоту θ , т.е. $P(t) = P_0 \sin \theta t$. Демпфирование в звеньях системы учтено в соответствии с ранней гипотезой частотно-независимого трения Е.С. Сорокина¹. Решаемая задача в первом приближении может рассматриваться также как частный случай переходного режима, характеризуемого медленным прохождением системы через резонанс, т.е. является квазистационарной задачей. Изучение квазистационарных режимов колебаний имеет важное значение для решения нестационарных задач виброзащиты конструкций с помощью многомассовых ДГК с нелинейными связями.

Известно [2], что при стационарных колебаниях защищаемой конструкции линейный двухмассовый гаситель с последовательным соединением звеньев эффективнее одномассового ДГК. Вместе с тем ограничением в применении двухмассового гасителя является высокий уровень резонансных колебаний, совершаемых малой (подстроичной) массой. Как будет показано ниже, использование в подстроичном звене гасителя нелинейных элементов позволяет значительно снизить амплитуды колебаний подстроичной массы.

Обозначим через m_j , c_j , γ_j , y_j соответственно массу, квазиупругий коэффициент, коэффициент неупругого сопротивления и абсолютную координату защищаемой конструкции ($j = 1$), основного ($j = 2$) и подстроичного ($j = 3$) звеньев гасителя (см. рис. 1). Для определенности будем считать, что нелинейность рассматриваемой системы связана с подстроичным звеном, масса которой в зависимости от амплитуды ее относительных колебаний изменяется по закону

$$m_3^* = m_3[1 + e(y_3 - y_2)^2], \quad (1)$$

где e — малый параметр.

Отметим, что аналогичным может быть характер мягкой нелинейности упругой связи подстроичного звена

$$c_3^* = c_3[1 - e(y_3 - y_2)^2].$$

С учетом (1) вынужденные колебания рассматриваемой системы описываются дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1(t) + \bar{c}_1 y_1(t) - \bar{c}_2 [y_2(t) - y_1(t)] - P_0 \sin \theta t &= 0; \\ m_2 \ddot{y}_2(t) + \bar{c}_2 [y_2(t) - y_1(t)] - \bar{c}_3 [y_3(t) - y_2(t)] &= 0; \\ m_3^* \ddot{y}_3(t) + \bar{c}_3 [y_3(t) - y_2(t)] &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{c}_j = c_j(1 + i\gamma_j)$; $j = 1, 3$.

¹ Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Стройиздат, 1960. 131 с.

Вводя безразмерные параметры

$$\mu = m_2/m_1; \alpha = m_3/m_2; \bar{f}_j = c_j/(m_j\omega_0^2); v = \theta/\omega_0; \tau = \omega_0 t, \quad (3)$$

перепишем систему уравнений (2) в виде:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1(\tau) + (\bar{f}_1 + \mu \bar{f}_2)y_1(\tau) - \mu \bar{f}_2 y_2(\tau) - y_{1,\text{ct}} \sin v\tau &= 0; \\ \ddot{y}_2(\tau) + (\bar{f}_2 + \alpha \bar{f}_3)y_2(\tau) - \bar{f}_2 y_1(\tau) - \alpha \bar{f}_3 y_3(\tau) &= 0; \\ \{1 + e[y_3(\tau) - y_2(\tau)]^2\} \ddot{y}_3(\tau) + \bar{f}_3[y_3(\tau) - y_2(\tau)] &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

В (3) и (4) $\omega_0 = \sqrt{c_1/m_1}$ — частота собственных колебаний защищаемой конструкции без гасителя;

$y_{1,\text{ct}} = P_0/c_1$ — статическое перемещение защищаемой конструкции;

$$\bar{f}_j = f_j(1 + i\gamma_j).$$

Решение системы уравнений (4) может быть найдено аналитическими и численными методами² [3]. Для конструкций с гасителями при гармонических внешних воздействиях имеет смысл исходную систему дифференциальных уравнений привести к системе нелинейных алгебраических уравнений. С этой целью целесообразно использовать подходы, основанные на методе гармонического баланса² [3]. В частности, решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (4) может быть найдено с помощью разложений разыскиваемых функций перемещений в ряды по ортогональным полиномам Чебышева³ [4]. Использование такого подхода обосновывается высокой сходимостью таких рядов, а также тем, что полиномы Чебышева сами являются степенными функциями и хорошо описывают нелинейные степенные зависимости.

В общем случае функции перемещений масс системы могут быть записаны в виде³ [4]

$$y_i = \sum_{n=1}^{\infty} [A_{in} T_{2n}(x/a) + B_{in} T_{2n+1}(x/a)], \quad (5)$$

где $T_n(x/a)$ — полиномы Чебышева;

A_{in}, B_{in} — постоянные;

$$x = v\tau; a = \pi; -1 \leq x/a \leq 1.$$

Произвольная функция $f(u)$ может быть разложена в ряды по полиномам Чебышева, т.е. представлена выражением

$$f(u) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i u^i = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \sum_{n=0}^i [H_n T_{2n+1}(x/a) + G_n T_{2n}(x/a)]. \quad (6)$$

Здесь α_i, H_n, G_n — константы.

В соответствии с (6) возмущающую нагрузку $P(t) = y_{1,\text{ct}} \sin x$ представим в виде ряда

$$y_{1,\text{ct}} \sin x = y_{1,\text{ct}} \sum_{n=0}^{\infty} D_n(a) T_{2n+1}(x/a), \quad (7)$$

где $D_n(a)$ — коэффициенты разложения.

² Коловский М.З. Нелинейная теория виброзащитных систем. М.: Наука, 1966. 320 с.

³ Пашковский С. Вычислительные применения многочленов и рядов Чебышева. М.: Наука, 1983. 384 с.

Для последующих преобразований примем во внимание следующие известные зависимости³ [4]:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{2n}(x)}{dx} &= 4n \sum_{k=0}^{n-1} T_{2k+1}(x); \\ \frac{dT_{2n+1}(x)}{dx} &= (2n+1) + 2(2n+1) \sum_{k=1}^n T_{2k}(x); \\ \frac{d^2T_{2n}(x)}{dx^2} &= 4n^3 T_0(x) + 8n \sum_{k=1}^{n-1} (n^2 - k^2) T_{2k}(x); \\ \frac{d^2T_{2n+1}(x)}{dx^2} &= 4(2n+1) \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n+1+k) T_{2k+1}; \\ T_m(x)T_n(x) &= \frac{1}{2}(T_{m+n}(x) + T_{m-n}(x)). \end{aligned} \quad (8)$$

Учитывая, что влияние высших гармоник на амплитуды резонансных колебаний, в частности для рассматриваемого основного резонанса, неизначительно, в разложениях (6)–(8) удержим полиномы с индексами $n \leq 5$. Тогда функции перемещений масс системы могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} y_1 &= B_1 T_0(x/a) + B_2 T_1(x/a) + B_3 T_3(x/a) + B_4 T_5(x/a); \\ y_2 &= B_5 T_0(x/a) + B_6 T_1(x/a) + B_7 T_3(x/a) + B_8 T_5(x/a); \\ y_3 &= B_9 T_0(x/a) + B_{10} T_1(x/a) + B_{11} T_3(x/a) + B_{12} T_5(x/a), \end{aligned} \quad (9)$$

где B_i — константы, подлежащие определению; $i = \overline{1,12}$.

В (9) слагаемые, содержащие функции $T_0(x/a)$, учитывают влияние дополнительных констант, обусловленных нелинейностью системы уравнений (4). Слагаемые, содержащие функции $T_1(x/a)$, $T_3(x/a)$, $T_5(x/a)$, по аналогии с разложением (7), определяют синусоидальные функции вынужденных гармонических колебаний масс системы. Подставим функции (9) в дифференциальные уравнения (4). Учитывая соотношения (8) и удерживая только полиномы с индексами $n \leq 5$, произведем замену переменной $z = x/a$. Каждое из уравнений, полученных в результате такой подстановки, умножим поочередно на функцию $(1-z^2)^{-1/2} T_n(z)$ при $n = 0, 1, 3, 5$ и проинтегрируем по аргументу z в интервале $[-1, 1]$, учитывая условия ортогональности полиномов Чебышева [4]:

$$\int_{-1}^1 (1-z^2)^{-1/2} T_n(z) T_m(z) dz = \begin{cases} 0 & \text{при } m \neq n; \\ \pi/2 & \text{при } m = n \neq 0; \\ \pi & \text{при } m = n = 0. \end{cases} \quad (10)$$

В результате указанных преобразований получим систему 12 нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных B_i ($i = \overline{1,12}$). К ним необходимо добавить уравнения связи коэффициентов разложения (9). В соответствии с [4] при $a = \pi$ для коэффициентов разложений синусоидальных функций (7) выполняется условие

$$\sum_{n=0}^{\infty} D_n(\pi) = 0. \quad (11)$$

Из (11) следует:

$$B_2 + B_3 + B_4 \cong 0; B_6 + B_7 + B_8 \cong 0; B_{10} + B_{11} + B_{12} \cong 0.$$

С учетом приведенных соотношений получим относительно констант B_i систему нелинейных уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned}
& (\bar{f}_1 + \mu \bar{f}_2)B_1 - \mu \bar{f}_2 B_5 = 0; \\
& \frac{24v^2}{\pi^2} B_3 + 120 \frac{v^2}{\pi^2} B_4 + (\bar{f}_1 + \mu \bar{f}_2)B_2 - \mu \bar{f}_2 B_6 = y_{1,\text{ct}} D_0; \\
& 80 \frac{v^2}{\pi^2} B_4 + (\bar{f}_1 + \mu \bar{f}_2)B_3 - \mu \bar{f}_2 B_7 = y_{1,\text{ct}} D_1; \\
& (\bar{f}_1 + \mu \bar{f}_2)B_4 - \mu \bar{f}_2 B_8 = y_{1,\text{ct}} D_2; \\
& B_2 + B_3 + B_4 = 0; \\
& (\bar{f}_2 + \alpha \bar{f}_3)B_5 - \bar{f}_2 B_1 - \alpha \bar{f}_3 B_9 = 0; \\
& \frac{24v^2}{\pi^2} B_7 + 120 \frac{v^2}{\pi^2} B_8 + (\bar{f}_2 + \alpha \bar{f}_3)B_6 - \bar{f}_2 B_2 - \alpha \bar{f}_3 B_{10} = 0; \\
& 80 \frac{v^2}{\pi^2} B_8 + (\bar{f}_2 + \alpha \bar{f}_3)B_7 - \bar{f}_2 B_3 - \alpha \bar{f}_3 B_{11} = 0; \\
& (\bar{f}_2 + \alpha \bar{f}_3)B_8 - \bar{f}_2 B_4 - \alpha \bar{f}_3 B_{12} = 0; \\
& B_6 + B_7 + B_8 = 0; \\
& \frac{v^2 e}{\pi^2} (24B_{11} + 120B_{12})(B_9 - B_5)(B_{10} - B_6) + \\
& + 80 \frac{v^2 e}{\pi^2} B_{12}(B_9 - B_5)(B_{11} - B_7) + \bar{f}_3(B_9 - B_5) = 0; \\
& \frac{v^2}{\pi^2} (24B_{11} + 120B_{12}) + \frac{v^2}{\pi^2} (24B_{11} + 120B_{12})e \left[(B_9 - B_5)^2 + \frac{3}{2}(B_{10} - B_6)^2 + \right. \\
& + \frac{1}{2}(B_{11} - B_7)^2 + \frac{1}{2}(B_{12} - B_8)^2 + \frac{1}{2}(B_{10} - B_6)(B_{11} - B_7) + \\
& \left. + \frac{1}{2}(B_{12} - B_8)(B_{11} - B_7) \right] + 80 \frac{v^2 e}{\pi^2} B_{12} \left[\frac{1}{4}(B_{12} - B_8)^2 + (B_{10} - B_6)(B_{11} - B_7) + \right. \\
& \left. + \frac{1}{2}(B_{10} - B_6)(B_{12} - B_8) + (B_{12} - B_8)(B_{11} - B_7) \right] + \bar{f}_3(B_{10} - B_6) = 0; \\
& 80 \frac{v^2}{\pi^2} B_{12} + \frac{v^2}{\pi^2} (24B_{11} + 120B_{12})e \left[\frac{1}{2}(B_{10} - B_6)^2 + (B_{10} - B_6)(B_{11} - B_7) + \right. \\
& + \frac{1}{2}(B_{12} - B_8)(B_{10} - B_6) + \frac{1}{2}(B_{12} - B_8)(B_{11} - B_7) \left. \right] + \\
& + 80 \frac{v^2 e}{\pi^2} B_{12} \left[(B_9 - B_5)^2 + \frac{1}{2}(B_{10} - B_6)^2 + \frac{3}{2}(B_{11} - B_7)^2 + \frac{1}{2}(B_{12} - B_8)^2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{2}(B_{10} - B_6)(B_{12} - B_8) \right] + \bar{f}_3(B_{11} - B_7) = 0;
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{v^2}{\pi^2} (24B_{11} + 120B_{12})e \left[\frac{1}{4}(B_{11} - B_7)^2 + \frac{1}{2}(B_{10} - B_6)(B_{11} - B_7) + \right. \\
& \left. + (B_{12} - B_8)(B_{10} - B_6) \right] + 80 \frac{v^2 e}{\pi^2} B_{12} \left[\frac{1}{4}(B_{10} - B_6)^2 + \right. \\
& \left. + \frac{1}{2}(B_{10} - B_6)(B_{11} - B_7) + 2(B_{11} - B_7)(B_{12} - B_8) \right] + \\
& + \bar{f}_3(B_{12} - B_8) = 0; \\
& B_{10} + B_{11} + B_{12} = 0.
\end{aligned} \tag{12}$$

Здесь в соответствии с (11)

$$D_0 = 0,56923; D_1 = -0,66691; D_2 = 0,10428.$$

Решение системы уравнений (12) найдем градиентным методом⁴. При известных константах B_i , являющихся комплексными числами, с помощью выражений (9) определяются амплитудные значения отклонений масс системы y_i для значений x в интервале $-a \leq x \leq a$. Безразмерные амплитуды колебаний масс $A_i = \max|y_i|/y_{i,\text{ст}}$.

На рис. 2, 3 представлены АЧХ колебаний масс защищаемой конструкции и подстроичного звена гасителя соответственно. Они свидетельствуют о том, что нелинейная характеристика подстроичного звена гасителя при оптимальных значениях его параметров (кривые 1) значительно снижает амплитуды колебаний как массы защищаемой конструкции, так и самого подстроичного звена гасителя ($A_{1,\text{max}} = 4,15; A_{3,\text{max}} = 25,59$) по сравнению с линейным двухмассовым ДГК [2] ($A_{1,\text{max}} = 4,91; A_{3,\text{max}} = 58,104$). Резюмируя полученные результаты, можно отметить, что введение нелинейности мягкого типа в подстроичном звене гасителя, с одной стороны, примерно на 20 % повышает эффективность виброзащиты (происходит своеобразная отстройка защищаемой конструкции от резонанса), с другой — существенно (более чем вдвое) снижается уровень амплитуд колебаний подстроичного звена гасителя.

В нелинейных системах большое значение приобретают вопросы исследования устойчивости стационарных режимов движений. При использовании приведенной методики численного расчета неустойчивым режимам соответствуют физически нереализуемые значения констант B_i ($i = 1,2$), определяемых из решения системы нелинейных уравнений (12). Амплитудные кривые, приведенные на рис. 2, 3, получены при значениях настроичных параметров гасителя, которым соответствуют устойчивые режимы колебаний.

Выполним исследование устойчивости режима вынужденных колебаний подстроичного звена гасителя, предполагая ввиду малости массы m_3 , что остальные массы системы совершают квазигармонические колебания. Неустойчивость колебаний подстроичного звена вносит соответствующие возмущения, определяющие неустойчивость движения системы в целом.

Отделим подстроичное звено с нелинейными параметрами от основной массы гасителя. Рассеяние энергии учтем по гипотезе линейно-вяз-

⁴ Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Выш. шк., 2005. 840 с.

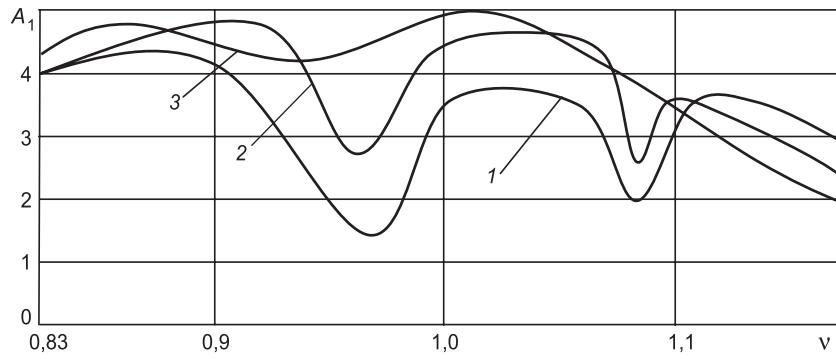


Рис. 2. АЧХ колебаний массы защищаемой конструкции при $\mu = 0,05; \alpha = 0,05; \gamma_1 = 0,05; f_1 = f_2 = f_3 = 1: 1 — e = 0,008; \gamma_2 = 0,17; \gamma_3 = 0,27; 2 — e = 0,008; \gamma_2 = \gamma_3 = 0,25; 3 — e = 0,0; \gamma_2 = 0,17; \gamma_3 = 0,27$

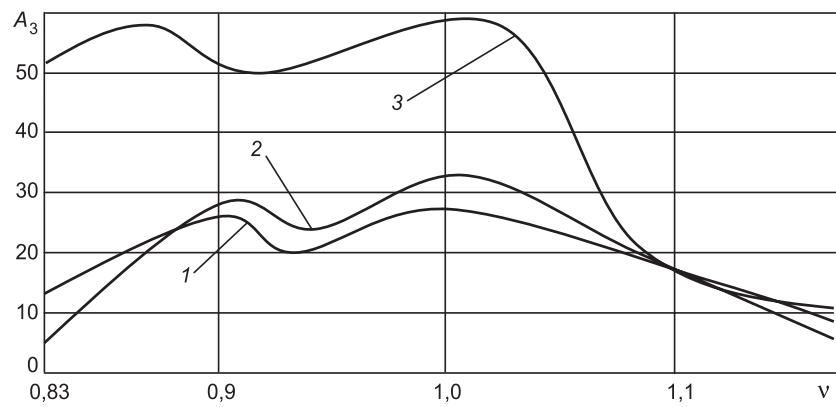


Рис. 3. АЧХ колебаний массы подстроичного звена гасителя (значения параметров те же, что на рис. 2)

кого трения. Дифференциальное уравнение движения подстроичной массы гасителя может быть приведено к виду

$$\ddot{y}_3(1+ey_3^2) + y_3 + \beta\dot{y}_3 = P\cos t, \quad (13)$$

где β — коэффициент демпфирования;

P — амплитуда внешней нагрузки, создаваемой кинематическим возбуждением подстроичного звена.

Для решения рассматриваемой задачи воспользуемся методом медленно меняющихся амплитуд [3]. Перепишем уравнение (13)

$$\ddot{y}_3 + y_3 = -ey_3^2\dot{y}_3 - \beta\dot{y}_3 + P\cos t. \quad (14)$$

Разыскивая решение уравнения (14) в виде $y_3 = A\cos(\tau + \theta)$, имеем укороченные уравнения для определения амплитуды и фазы колебаний массы m_3

$$\dot{A} = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mu_0 f(A, \theta, \tau) \sin \tau_1 d\tau_1; \quad A\dot{\theta} = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mu_0 f(A, \theta, \tau) \cos \tau_1 d\tau_1, \quad (15)$$

где $f(A, \theta, \tau)$ — функция правой части нелинейного уравнения; $\tau_1 = \tau + \theta$; μ_0 — параметр.

В данном случае для (14) имеем следующие укороченные уравнения

$$\begin{aligned}\dot{A} &= -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(e \frac{A^3}{2} \cos \tau_1 + \beta A \sin \tau_1 + P \cos(\tau_1 - \theta) \right) \sin \tau_1 d\tau_1; \\ A\dot{\theta} &= -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(e \frac{A^3}{2} \cos \tau_1 + \beta A \sin \tau_1 + P \cos(\tau_1 - \theta) \right) \cos \tau_1 d\tau_1.\end{aligned}\quad (16)$$

Выполнив в (16) интегрирование, получим систему укороченных уравнений

$$\dot{A} = -\frac{1}{2}(P \sin \theta + \beta A); \quad \dot{\theta} = -\frac{1}{2A} \left(\frac{1}{2} A^3 e + P \cos \theta \right). \quad (17)$$

Из условий $\dot{A} = 0$ и $\dot{\theta} = 0$ следуют уравнения относительно стационарной амплитуды A_0 и фазы θ_0 вынужденных колебаний массы подстроечного звена.

$$P \sin \theta_0 = -\beta A_0; \quad P \cos \theta_0 = -e A_0^3 / 2. \quad (18)$$

Для оценки устойчивости решения воспользуемся методом возмущений [3]. Задаваясь вариациями амплитуды и фазы вблизи стационарных значений A_0 и θ_0 в виде $A = A_0 + \zeta$ и $\theta = \theta_0 + \eta$, получим систему укороченных уравнений для вариаций

$$\dot{\zeta} = -\frac{1}{2}(P \sin \theta_0 \eta + \beta \zeta); \quad \dot{\eta} = -\frac{1}{2A_0} \left(\frac{3}{2} A_0^2 e \zeta - P \sin \theta_0 \eta \right). \quad (19)$$

Представим вариации в виде

$$\zeta = \zeta_0 e^{\lambda \tau}; \quad \eta = \eta_0 e^{\lambda \tau}, \quad (20)$$

где λ — характеристический показатель, являющийся в общем случае комплексным числом.

Подставляя (20) в (19) и учитывая соотношения (18), приходим к системе однородных уравнений относительно ζ_0 , η_0

$$\zeta_0 \left(\lambda + \frac{\beta}{2} \right) - e \frac{A_0^3}{4} \eta_0 = 0; \quad \zeta_0 e \frac{3}{4} A_0 + \left(\lambda + \frac{\beta}{2} \right) \eta_0 = 0. \quad (21)$$

Составляя определитель системы уравнений (21) и приравнивая его нулю, из условия нетривиальности решения найдем выражение для характеристического показателя

$$\lambda = -\frac{\beta}{2} \pm i e \frac{A_0^2 \sqrt{3}}{4}. \quad (22)$$

Так как действительная часть характеристического показателя отрицательна, то рассматриваемая система с демпфированием является устойчивой при любых амплитудах колебаний массы подстроичного звена гасителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Дукарт, А.В. Об эффективности некоторых типов нелинейных многомассовых динамических гасителей колебаний при прохождении через резонанс [Текст] / А.В. Дукарт, А.И. Олейник // Изв. вузов. Строительство. — 2001. — № 11. — С. 28–36.

2. Коренев, Б.Г. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения [Текст] / Б.Г. Коренев, Л.М. Резников. — М. : Наука, 1988. — 304 с.
3. Вибрации в технике [Текст]: справочник. — Т. 2: Колебания нелинейных механических систем под ред. И.И. Блехмана. — М. : Машиностроение, 1979. — 351 с.
4. Люк, Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации [Текст] / Ю. Люк. — М. : Мир, 1980. — 608 с.

*ДУКАРТ Адам Вилебальдович, д-р техн. наук, проф.
Московский государственный строительный университет
ОЛЕЙНИК Александр Иванович, д-р техн. наук, доц.
Рудненский индустриальный институт, Казахстан*

Получено 09.07.13

Dukart Adam Vilebaldovich, doctor of technical sciences, professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia
Oleinik Aleksandr Ivanovich, doctor of technical sciences, assistant professor, Rudnii Industrial Institute, Kazakhstan

EFFECT OF NONLINEAR TRIMMER LINK OF TWO-MASS DYNAMIC ABSORBER TO ITS EFFICIENCY UNDER HARMONIC EXCITATION WITH UNSTABLE FREQUENCY

The stationary oscillations of a single-mass protected structure, equipped with two-mass nonlinear dynamic absorber, under harmonic excitation are considered. It is assumed that the soft absorber nonlinearity is associated with the variability of the trim mass. To determine the motion of the system, the oscillations of the masses are expanded in a series of orthogonal Chebyshev polynomials. In analyzing the behavior of the protected structure, it is assumed that the frequency of the exciting force is unstable. It is shown that the presence of non-linearity in the soft type trimmer link absorber increases (up to 20 %) the efficiency of vibration isolation and significantly (about half) reduces vibrations of the trim mass.

Key words: protected structure, dynamic two-mass absorber, soft type nonlinearity, harmonic load, steady-state oscillations, Chebyshev orthogonal polynomials.

REFERENCES

1. Dukart, A.V. On the effectiveness of certain types of nonlinear multimass dynamic vibrations suppressor on Resonance passing [Text] / A.V. Dukart, A.I. Oleinik // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2001. — N 11. — P. 28–36.
2. Korenev, B.G. Dynamic vibration dampers: Theory and engineering applications [Text] / B.G. Korenev, L.M. Reznikov. — M. : Nauka, 1988. — 304 p.
3. Vibrations in technique [Text]: handbook. — Vol. 2: Oscillations in nonlinear mechanical systems / ed. I.I. Blechman. — M. : Mashinostroyeniye, 1979. — 351 p.
4. Luke, Yu. Mathematical functions and their approximations [Text] / Yu. Luke. — M. : Mir, 1980. — 608 p.

УДК 539.3

И.Н. СЕРПИК, А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ

ПРОВЕРКА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕИЗМЕНЯЕМОСТИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЯЗЕЙ*

Разрабатывается алгоритм исследования геометрической неизменяемости механических систем, предусматривающий затвердевание тел и замену жестких связей фиктивными упругими податливостями. Решение о геометрической неизменяемости, геометрической изменяемости или мгновенной изменяемости принимается по числу обусловленности матриц жесткости таких вспомогательных структур. Рассмотрены примеры анализа геометрической неизменяемости объектов с помощью предлагаемой вычислительной схемы.

Ключевые слова: геометрическая неизменяемость, отвердение материала, ослабление связей, матрица жесткости, число обусловленности.

При создании новых структурных схем зданий и сооружений, при разработке технологических карт монтажа строительных конструкций, в процессе выполнения расчетов деформируемых объектов приходится сталкиваться с вопросами проверки геометрической неизменяемости рассматриваемых систем. Существующие методы количественного и качественного кинематического анализа конструкций могут быть эффективно использованы только для ограниченного круга задач. В современных программных комплексах САЕ, как правило, выполняется исследование матрицы системы разрешающих уравнений метода конечных элементов в соответствии с аналитическим способом [1] подтверждения геометрической неизменяемости рассматриваемой дискретизированной структуры. Такая проверка фактически включает и анализ качества формирования конечно-элементной модели, что может затруднить изучение свойств самой конструкции.

В настоящей работе предлагается алгоритм проверки геометрической неизменяемости пространственных деформируемых систем с использованием методики ослабления связей, общие принципы которой приведены в статье [2]. Данный подход не требует выполнения дискретизации конструкций. В частных случаях этот алгоритм может реализовываться и для плоских объектов.

Алгоритм. Пусть система пространственных тел имеет ряд жестких опорных и внутренних связей S , с помощью каждой из которых исключается линейное или угловое перемещение. На рис. 1, а приведен пример сочлененной пространственной системы, состоящей из двух тел. Используем гипотезу отвердения материала [1], согласно которой наличие или отсутствие возможности деформаций дисков и связей не влияет на геометрическую изменяемость или неизменяемость системы. Будем считать каждое из тел абсолютно жестким диском. В то же время все связи S

* Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00457.

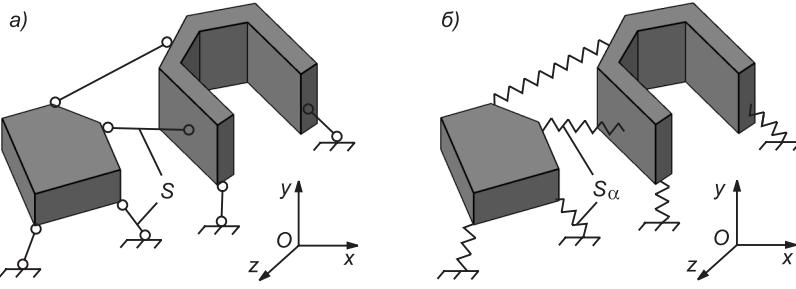


Рис. 1. Система двух тел с жесткими связями S (а) и соответствующий ей объект с фиктивными упругими связями S_α (б)

трансформируем в упругие связи S_α с фиктивными податливостями по соответствующим степеням свободы (рис. 1, б). Если у исходного объекта уже имеются податливые связи, то их можно рассматривать как связи S_α .

При этом для всех линейных связей S_α будем задавать жесткость

$$c = c_0 / (nm),$$

где c_0 — некоторая положительная величина;

$n=6$ — число степеней свободы каждого из дисков в пространственной системе с ослабленными связями;

m — число дисков.

Жесткость f каждой из угловых связей принимаем на основе зависимости

$$f = cl_{\max},$$

где l_{\max} — максимальный габаритный размер системы дисков.

Малое смещение каждого i -го диска задаем перемещением некоторого полюса O_i и вращением относительно этого полюса. Запишем вектор обобщенных перемещений, определяющий такое смещение, в виде

$$\{\delta\}_{Di} = \{u_i, v_i, w_i, \varphi_{xi}, \varphi_{yi}, \varphi_{zi}\}^T, \quad (1)$$

где u_i, v_i, w_i — проекции вектора перемещения полюса O_i на координатные оси Ox, Oy и Oz декартовой системы координат $Oxyz$;

$\varphi_{xi}, \varphi_{yi}, \varphi_{zi}$ — углы поворота диска относительно этих осей.

Вектору $\{\delta\}_{Di}$ будет соответствовать вектор обобщенных сил

$$\{R\}_{Di} = \{R_{xi}, R_{yi}, R_{zi}, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}\}^T, \quad (2)$$

где $R_{xi}, R_{yi}, R_{zi}, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}$ — проекции на оси координат главного вектора и главного момента сил для i -го диска.

Используя метод перемещений, запишем условие равновесия системы дисков в виде

$$[K]\{\delta\} = \{F\}, \quad (3)$$

где $[K]$ — глобальная матрица жесткости [3];

$\{\delta\}, \{F\}$ — векторы обобщенных перемещений и внешних сил.

Аналитический признак геометрической неизменяемости системы, в частности, можно представить в виде [1]

$$\det[K] \neq 0. \quad (4)$$

Другим важным аналитическим признаком геометрической неизменяемости является получение сравнительно малого числа обусловленности глобальной матрицы жесткости. Введем параметр

$$\alpha_{\text{cond}} = \text{cond}_{\infty}[K] / e^m, \quad (5)$$

где $\text{cond}_{\infty}[K] = \| [K] \|_{\infty} \times \| [K]^{-1} \|_{\infty}$ — число обусловленности матрицы $[K]$; $\| \cdot \|_{\infty}$ — обозначение бесконечной нормы матрицы.

Следует иметь в виду, что расчеты на компьютере выполняются с ошибками округления. На основании численных экспериментов было установлено, что при вводе 16 десятичных разрядов для вещественных чисел и задании полюсов O_i в центрах масс затвердевших тел выполнение условия $\alpha_{\text{cond}} < 10^2$ указывает на геометрическую неизменяемость объекта, $\alpha_{\text{cond}} > 10^{100}$ или прерывание счета вследствие получения $\det[K] = 0$ — на геометрическую изменяемость. Промежуточные результаты могут трактоваться как наличие мгновенной изменяемости исследуемой системы. Эти критерии используются нами в тестовых примерах.

Интерпретируем каждую из связей S_a как конечный элемент. Вектор обобщенных перемещений этого конечного элемента представим таким образом:

$$\{\delta_e\} = \begin{Bmatrix} \{\delta\}_{D_j} \\ \{\delta\}_{D_k} \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

где $\{\delta\}_{D_j}, \{\delta\}_{D_k}$ — векторы обобщенных перемещений связанных с ним дисков D_j и D_k (рис. 2).

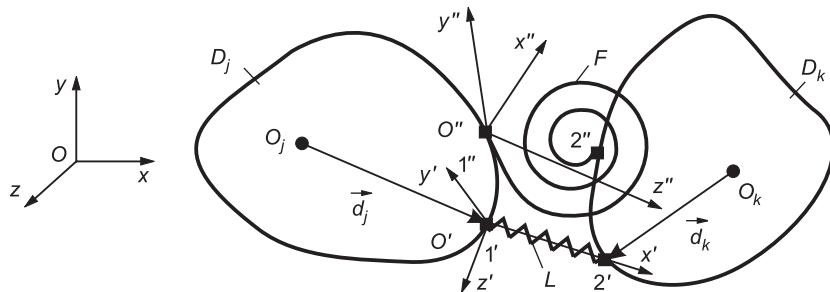


Рис. 2. Пример сочленения двух тел линейной L и угловой F связями

Первоначально будем формировать матрицы жесткости конечных элементов для местных систем осей $O'x'y'z'$, $O''x''y''z''$ соответственно линейной и угловой связей, рассматривая перемещения узлов $1', 2', 1'', 2''$, а затем перейдем к векторам $\{\delta_e\}$. Пусть связь L направлена вдоль оси $O'x'$, связь F имеет жесткость при повороте относительно оси $O''x''$. Векторы узловых перемещений для этих связей в локальных осях будут иметь вид

$$\{\delta'_e\}_L = \begin{Bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \end{Bmatrix}; \quad \{\delta''_e\}_F = \begin{Bmatrix} \varphi''_1 \\ \varphi''_2 \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

где u'_1, u'_2 — проекции перемещений узлов $1'$ и $2'$ на ось $O'x'$; φ''_1, φ''_2 — углы поворота узлов $1''$ и $2''$ относительно оси $O''x''$ (см. рис. 2).

Как известно, матрицы жесткости конечных элементов L и F в локальных осях описываются зависимостями

$$[K'_e]_L = \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix}; \quad [K'_e]_F = \begin{bmatrix} f & -f \\ -f & f \end{bmatrix}. \quad (8)$$

При переходе к векторам $\{\delta_e\}$ матрицы жесткости конечных элементов можно находить с помощью выражений [3]

$$[K_e]_L = [T]^T_L [K'_e]_L [T]_L; \quad [K_e]_F = [T]^T_F [K'_e]_F [T]_F, \quad (9)$$

где матрицы перехода $[T]_L$, $[T]_F$ определяются равенствами

$$\{\delta'_e\}_L = [T]_L \{\delta_e\}_L; \quad \{\delta''_e\}_F = [T]_F \{\delta_e\}_F; \quad (10)$$

$\{\delta_e\}_L$, $\{\delta_e\}_F$ — векторы $\{\delta_e\}$ для связей L и F .

Из геометрических соображений имеем

$$[T]_L = \begin{bmatrix} [T_{1L}] & 0 \\ 0 & [T_{2L}] \end{bmatrix}; \quad [T]_F = \begin{bmatrix} [T_{1F}] & 0 \\ 0 & [T_{2F}] \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где

$$[T]_{1L} = [l_{x'x} l_{y'y} l_{z'z} d_{ij} l_{x'z} - d_{jz} l_{x'y} d_{jx} l_{x'x} - d_{jx} l_{x'z} d_{jx} l_{x'y} - d_{iy} l_{x'x}]; \quad (12)$$

$$[T]_{2L} = [l_{x'x} l_{y'y} l_{z'z} d_{ky} l_{x'z} - d_{kz} l_{x'y} d_{kx} l_{x'x} - d_{kx} l_{x'z} d_{kx} l_{x'y} - d_{ky} l_{x'x}]; \quad (13)$$

$$[T]_{1F} = [T]_{2F} = [0 \ 0 \ 0 \ l_{x''x} \ l_{x''y} \ l_{x''z}]; \quad (14)$$

$l_{x'x}$ — косинус угла между осями $O'x'$ и Ox ;

d_{jx} — проекция вектора \vec{d}_j на ось Ox (см. рис. 2);

$l_{x''x}$ — косинус угла между осями $O''x''$ и Ox .

Остальные косинусы углов и проекции векторов в формулах (12)–(14) обозначены аналогично.

Данный алгоритм реализован в программе «GeomVar», разработанной авторами статьи. Программа написана на языке Delphi. Использовалось 16 десятичных разрядов для вещественных чисел.

Примеры. Выполнялась проверка геометрической неизменяемости двух плоских стержневых систем (рис. 3, *a*, *b*) и пространственного объекта (рис. 3, *в*). Сочлененная балка, приведенная на рис. 3, *a*, анализировалась в исходной конфигурации, при удалении угловой связи T , а также при совместном удалении этой связи и вертикальной связи H . Структура плоской двухъярусной системы (см. рис. 3, *б*) взята из книги [1]. Массив (см. рис. 3, *в*) имеет геометрию треугольной призмы. Связи C_1 расположены в плоскости Oxy основания призмы, связи C_2 перпендикулярны этой плоскости. Принимались во внимание такие сочетания значений углов Θ_1 , Θ_2 :

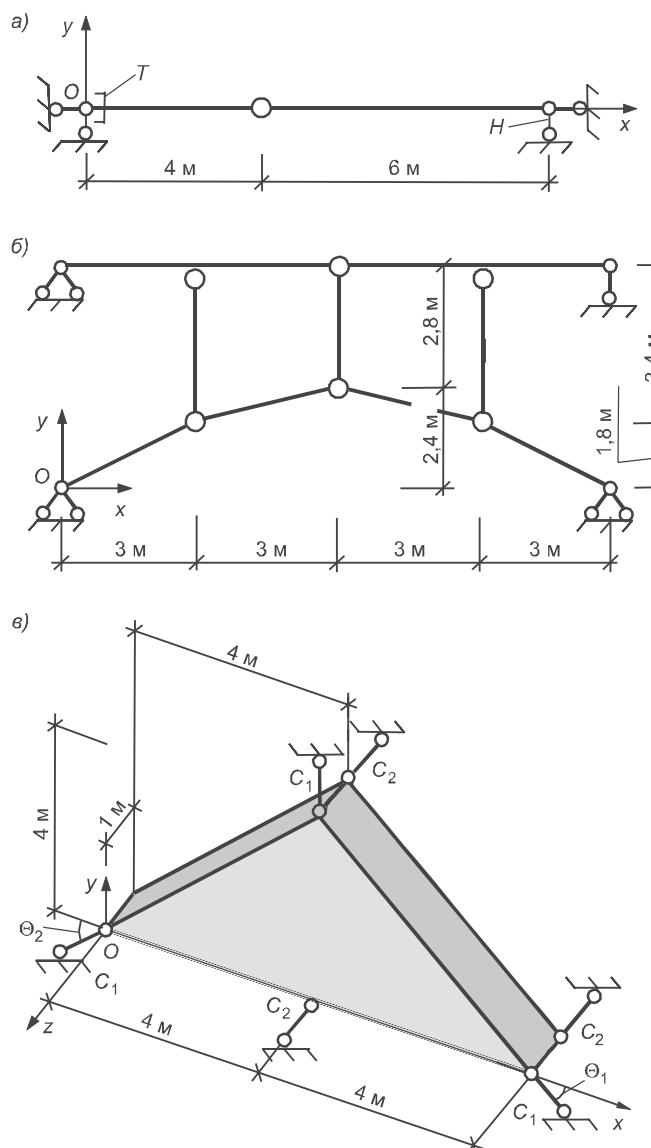
$$\Theta_1 = 90^\circ, \quad \Theta_2 = 45^\circ; \quad \Theta_1 = \Theta_2 = 45^\circ \text{ и } \Theta_1 = \Theta_2 = 90^\circ.$$

При выполнении расчетов все объекты рассматривались в трехмерном пространстве. При этом для структур, приведенных на рис. 3, *a*, *b*, дополнительно вводились связи, не допускающие смещения стержней из плоскости Oxy и повороты стержней относительно своих осей. Эти связи также подвергались ослаблению. Для всех примеров задавалось $c_0 = 100$ Н/м.

В таблице приведены полученные значения $\det[K]$, α_{cond} и сделанные на основе параметра α_{cond} заключения, которые для систем, показан-

Результаты анализа геометрической неизменяемости

Позиция на рис. 3	<i>m</i>	Условия наложения связей	$\det[K]$	α_{cond}	Заключение: система является
a)	2	—	$1,12 \cdot 10^{19}$	19,4	Геометрически неизменяемой
		Нет связи <i>T</i>	212	$0,427 \cdot 10^{18}$	Мгновенно изменяемой
		Нет связей <i>T</i> и <i>H</i>	0	—	Геометрически изменяемой
b)	9	—	$2,65 \cdot 10^{24}$	51,4	Геометрически неизменяемой
в)	1	$\Theta_1 = 90^\circ, \Theta_2 = 45^\circ$	$1,34 \cdot 10^{10}$	67,5	Геометрически неизменяемой
		$\Theta_1 = \Theta_2 = 45^\circ$	$7,94 \cdot 10^{-22}$	$0,414 \cdot 10^{18}$	Мгновенно изменяемой
		$\Theta_1 = \Theta_2 = 90^\circ$	0	—	Геометрически изменяемой



Rис. 3. Рассматриваемые объекты

a — составная балка; *б* — двухъярусная стержневая система;
в — массив

ных на рис. 3, а, в, подтверждаются количественным и качественным кинематическим анализом, на рис. 3, б — данными работы [1].

Вывод. Представленный алгоритм позволяет идентифицировать аналитическим методом геометрически неизменяемые, геометрически изменяемые и мгновенно изменяемые системы без дискретизации деформируемых тел. Он может быть реализован в комплексах САПР объектов строительства и в пакетах программ конечно-элементного анализа. Эффект от применения рассматриваемого подхода будет особо существенным в случае, когда число уравнений, описывающих равновесие системы дисков, будет значительно меньше числа степеней свободы обычной конечно-элементной модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Себешев, В.Г. Кинематический анализ сооружений [Текст] / В.Г. Себешев. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2006. — 58 с.
2. Серпик, И.Н. Методика ослабления связей в анализе геометрической неизменяемости несущих систем [Текст] / И.Н. Серпик // Альманах современной науки и образования. — 2012. — № 2(57). — С. 57–58.
3. Zienkiewicz, O.C. The finite element method for solid and structural mechanics [Text] / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor // Fifth edition: The basic. — Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. — 631 p.

СЕРПИК Игорь Нафтульевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: iserpik@online.debryansk.ru

Брянская государственная инженерно-технологическая академия

АЛЕКСЕЙЦЕВ Анатолий Викторович, канд. техн. наук, доц.

Брянская государственная инженерно-технологическая академия

Получено после доработки 16.07.13

Serpik Igor Naftolevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: iserpik@online.debryansk.ru, Bryansk State Technological Academy of Engineering, Russia

Alekseytsev Anatoly Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Bryansk State Technological Academy of Engineering, Russia

VERIFICATION OF THE STABILITY OF GEOMETRICAL SHAPE OF STRUCTURES BASED ON WEAKENING OF CONSTRAINTS

An algorithm for study the stability of geometrical shape of the mechanical systems with use the hardening solids and replacement of hard constraints on the fictitious elastic compliance is developed. The conclusion about the stability of geometrical shape, dimensional instability or instantaneous variability is placed on the estimating the condition number of the stiffness matrices for such auxiliary structures. The examples of the stability analysis of geometrical shape of objects by using the proposed computational scheme are considered.

Ключевые слова: стабильность геометрической формы, упрочнение материала, ослабление ограничений, матрица жесткости, коэффициент условности.

REFERENCES

1. Себешев, В.Г. Кинематический анализ сооружений [Текст] / В.Г. Себешев. — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006. — 58 п.
2. Серпик, И.Н. Методика ослабления связей в анализе стабильности геометрической формы конструкций [Текст] / И.Н. Серпик // Альманах современной науки и образования. — 2012. — № 2(57). — П. 57–58.
3. Zienkiewicz, O.C. The finite element method for solid and structural mechanics [Text] / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor // Fifth edition: The basic. — Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. — 631 п.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.001

И.А. ГАРЬКИНА, А.М. ДАНИЛОВ

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предлагается алгоритм разработки композиционных материалов на основе их представления как сложной системы с использованием системного подхода. Основной упор делается на методологические аспекты математического моделирования.

Ключевые слова: композиционные материалы, проектирование, системный подход, математическое и компьютерное моделирование.

Основным недостатком в проектировании композиционных материалов, как отмечалось на сессии РААСН в 2000 г., является «разработка составов композиционных материалов», которая «традиционно носит лишь описательный характер, и назрела необходимость фундаментализации синтеза материалов». К настоящему времени многое изменилось. При анализе и синтезе начали широко использоваться математическое и компьютерное моделирование, а также различные аналитические методы. Однако в связи с размытостью представлений об идентификации как об особом типе человеческой деятельности идентификационный подход еще окончательно не оформлен. Пока в нем доминирует математический уровень строгости, а математический язык рассматривается как наилучшее средство представления системы. В большинстве работ ограничиваются лишь постановкой и исследованием математических задач и не затрагиваются содержательные и человеческие аспекты практической идентификации. Подобная избирательность во многом определяется тем, что при значительном объеме представлений о потенциально возможных способах исследователь не в состоянии разработать детальную общую схему идентификации, ориентированную на использование определенной системы научных понятий, достаточных с точки зрения большинства исследователей для обоснования. Понятия, отражающие роль человека при определении целей идентификации, теоретически пока не сформулированы.

Синтез материала как сложной системы должен начинаться с когнитивного моделирования [1]. Так как идентификация носит междисциплинарный характер, то в состав экспертов группы по разработке технического задания на проектирование должны включаться специалисты различного профиля (в частности, при синтезе радиационно-защитных материалов — материаловеды, физики, химики, математики, управляемцы, специалисты в области системного анализа и др.). Предполагается,

© Гарькина И.А., Данилов А.М., 2013

что каждый из представителей будет играть доминирующую роль при определении отдельных фрагментов системы, а межэлементные связи будут определяться группой в целом. Когнитивная модель позволяет до определенного уровня произвести декомпозицию материала и свести (приближенно) синтез целостной системы к решению задач синтеза подсистем. Когнитивные модели позволяют выявить класс математических моделей для последующего их использования при оптимизации структуры и свойств радиационно-защитных композитов (отдельные фрагменты должны рассматриваться как подсистемы с указанием способов измерения их свойств). При составлении когнитивной карты нельзя исключить пропуск некоторых связей, которыми иногда по существу и определяется рассматриваемое свойство (ошибочное представление причинно-следственных связей — нарушение принципа транзитивности). Как отметил Анри Пуанкаре: «...совершенно ничтожная причина, ускользающая от нас по своей малости, вызывает значительное действие, которого мы не можем предусмотреть, и тогда мы говорим, что это явление представляет собой результат случая». С этим и связана трудность определения числа частных критериев, которые и определяют требуемые эксплуатационные характеристики материала.

Почти всегда постулируется существование математической модели, позволяющей заменить в необходимых случаях объект идентификации (при многих уровнях в иерархической структуре материала ее получение практически недостижимо). Естественно, возникает задача формализации свойств материала (частные критерии; их совокупностью определяется и структура материала): структурная идентификация (выбор класса моделей), решение общей задачи идентификации в выбранном классе моделей, а также решение частной задачи идентификации (параметрической). Одно из главных требований к моделям — простота интерпретаций физического смысла входящих в модели коэффициентов (так, регрессионные модели в основном носят иллюстративный характер и, по существу, не используются при прогнозе и целенаправленном изменении значений факторов).

Каждая из эксплуатационных характеристик материала представляется в виде асимптотического значения решения (кинетический процесс формирования физико-механической характеристики) некоторого дифференциального уравнения. Такое представление не является единственным (при необходимости возможна замена пробного класса). К сожалению, как правило, возникает проблема корректности задачи. Игнорировать некорректность постановки задачи нельзя. Следует произвести корректную постановку задачи, основанную на привлечении дополнительной информации об искомом решении, либо воспользоваться управлением классическими алгоритмами для некорректно поставленной задачи.

Сравнение результатов экспериментальных исследований с теоретическими (дополнительная информация об искомом решении) при разработке композиционных материалов показало возможность моделирования основных кинетических процессов (набор прочности, изменение модуля упругости, контракция и усадка, нарастание внутренних напряжений, тепловыделение, химическая стойкость, водопоглощение и водостойкость) в классе обыкновенных дифференциальных уравнений

n -го порядка. А именно четвертого порядка с постоянными коэффициентами и с действительными корнями характеристического полинома [2].

Выбор характеристик объекта-оригинала, которые сохраняются и войдут в модель, определяется целями моделирования. Основное требование к моделям — их адекватность реальным процессам или объектам, которые замещает модель. Существенные черты объекта или процесса в математической модели определяются на языке уравнений или других математических средств. При компьютерном моделировании анализ, интерпретация и сопоставление результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта (а при необходимости и последующее уточнение модели) производятся на основе серии вычислительных экспериментов. При математическом моделировании не всегда предполагается компьютерная поддержка. Более того, всегда отдается предпочтение аналитическим методам исследования модели перед численными методами. К сожалению, часто практическая реализация аналитических методов сопряжена с большими трудностями, что и приводит к необходимости использования численных методов и компьютерного моделирования. Аналитические методы и компьютерное моделирование не только не противостоят друг другу; их взаимное проникновение способствует лучшему пониманию исследуемых процессов в динамике [3].

Известны немногочисленные попытки получения аналитических зависимостей, связывающих свойства компонентов композиционных материалов и их концентрацию в смеси со свойствами готового композита. Получение таких зависимостей принципиально позволяет определить концентрацию и гранулометрические характеристики ингредиентов материала в зависимости от предъявляемых к нему требований; приводится и методика определения критической концентрации, позволяющая оценить зависимость критической объемной концентрации от среднего значения гранулометрического состава заполнителя композитного материала. Определялась эффективная прочность композитных материалов (некоторая усредненная прочность материала в целом). Здесь же предлагалась и программа, позволяющая определить концентрацию, гранулометрический состав заполнителя и желаемую прочность материала, исходя из прочности чистого вяжущего, диапазона разброса гранулометрического состава заполнителя и значения желаемой прочности композита. Известны и работы по изучению процесса возникновения дефектов в композитных материалах (трещины, поры, раковины и т. п.) и оптимизации составов композитов (исходя из минимума трещинообразования, заданной пористости и др.).

При синтезе композиционных материалов в настоящее время используется некий симбиоз аналитических методов и компьютерного моделирования.

Исходя из предыдущего, как итог собственных исследований, так и других авторов, предлагается схема синтеза, включающая:

- моделирование отдельных свойств;
- выделение основных параметров моделей;
- зависимость параметров моделей от рецептурно-технологических характеристик;
- зависимость свойств от рецептурно-технологических параметров (метапараметров — функций параметров моделей);

- определение множества частных критериев;
- ранжирование свойств материалов;
- минимизацию размерности критериального пространства;
- многокритериальную оптимизацию качества материала и соответствующих оптимальных рецептурно-технологических параметров.

Укажем ряд наиболее важных задач:

- описание свойства как интегральной характеристики многофазного материала, состоящего из двух и более компонент (сохраняют свою индивидуальность; между компонентами существуют границы раздела; один из компонентов — матрица (связующее) — связным образом заполняет пространство; другие компоненты — включения — занимают изолированные области) от параметров матрицы (связующего), размеров включений и расстояний между ними;
- моделирование свойств композитов через кинетические процессы формирования эксплуатационных характеристик;
- построение многофакторных экспериментально-статистических моделей свойств материалов.

Параметры модели могут быть как геометрическими, так и характеризующими реологические свойства или определяющими кинетические процессы формирования каждого из основных физико-механических характеристик материала. С учетом многомерности и многосвязности материала как системы наиболее перспективно использование при исследованиях методов системного анализа [4]. Связь частных критериев качества материала от рецептурно-технологических параметров, в частности, может быть получена с использованием методов планирования эксперимента (экспоненциально-полиномиально-тригонометрические модели).

При определении зависимости параметров моделей и свойств от рецептурно-технологических характеристик на каждом структурном уровне и для каждого из свойств материала могут использоваться различные модели. Как правило, частные критерии качества (свойства) материала есть нелинейные функции рецептурно-технологических параметров (нормированных); линейные части являются основными составляющими; парные взаимодействия определяют синергетические составляющие (в ряде случаев могут превосходить линейные). Первоначально приоритеты критериев (являются не только противоречивыми, но и зависимыми) обычно устанавливаются на основе экспертных оценок. Их уточнение должно производиться с учетом корреляционных связей (коэффициентов корреляции) между некоторым обобщенным (глобальным) критерием и частными критериями (как правило, чем больше коэффициент корреляции, тем большим приоритетом обладает частный критерий). Для минимизации размерности критериального пространства может использоваться метод главных компонент.

При одинаково значимых критериях многокритериальная оптимизация сводится к оптимизации векторной целевой функции

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}) = (q_1(\mathbf{x}), q_2(\mathbf{x}), \dots, q_m(\mathbf{x})).$$

До определения всех основных свойств материала с полным истолкованием всех возможных взаимосвязей относительная значимость этих целей остается неизвестной. С возрастанием числа возможных целей возрастает и сложность структуры взаимосвязей, что вызывает трудность иден-

тификации материала как системы. Многое определяется интуицией исследователя и его предпочтениями в процессе оптимизации. Необходимые предпочтения в постановке задачи учитываются в виде числовых зависимостей. В общем случае многокритериальная оптимизация сводится к минимизации некоторого вектора целей $\mathbf{q}(\mathbf{x})$, на который накладываются дополнительные ограничения или указываются предельные значения (задача нелинейного программирования). Во многих случаях многокритериальную задачу минимизации вектора $\mathbf{q}(\mathbf{x})$ с использованием стратегии взвешенных сумм можно свести к скалярной задаче (принимается

$$q(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot q_i(x)^2.$$

Далее можно использовать стандартный алгоритм оптимизации без ограничений. Как показывает опыт, неплохие результаты дает построение множеств Парето (можно использовать, в частности, MATLAB).

Определение интегративных свойств систем на качественном уровне часто можно производить на основе автономных исследований сепаратных подсистем с определенной степенью автономности. Каждый элемент иерархической структуры системы, находящийся на определенном уровне, представляет собой модуль. С ростом уровня иерархии (понижение номера уровня) происходит объединение модулей в более крупные. Объединение сепаратных подсистем в единую систему производится с учетом межсистемных связей. А каждый элемент в иерархической структуре качества системы определяет автономно (без учета *всех* межсистемных связей) качество сепаратной системы. Межсистемные связи можно устранить введением настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам. Определение условий для переноса результатов автономных исследований на систему в целом определяется полнотой понимания процессов формирования структуры и свойств системы. Естественно возникает задача определения классов задач, позволяющих использование эталонных моделей (при определении некоторых свойств материала в зависимости от гранулометрического состава можно использовать ингредиенты из других материалов, но с тем же гранулометрическим составом, что и в синтезируемом материале). Настройку можно обеспечить с использованием экспериментальных данных на образцах. Традиционно используемые в строительном материаловедении данные о кинетических процессах формирования структуры и физико-механических характеристиках материала по существу являются автономными исследованиями отдельных сепаратных модулей. При этом требуемые параметры кинетических процессов определяются с учетом межсистемных связей. Здесь неявно присутствуют эталонные модели, предусматривающие одновременную децентрализацию по входам.

Примеры решения ряда из этих задач с использованием различных методов моделирования на основе универсального и специально разработанного автономного программно-алгоритмического обеспечения содержатся в [1–4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем [Текст] / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 3/4. — С. 30–37.

2. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения [Текст] / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 1. — С. 80–85.
3. Гарькина, И.А. Флокуляция в дисперсных системах [Текст] / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.А. Смирнов // Системы управления и информационные технологии. — 2008. — № 2.3(32). — С. 344–347.
4. Будылина, Е.А. Моделирование с позиций управления в технических системах [Текст] / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. — 2013. — № 2(16). — С. 138–143.

*Гарькина Ирина Александровна, д-р техн. наук, доц.
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Данилов Александр Максимович, д-р техн. наук, проф.
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено 08.07.13

Garkina Irina Alexandrovna, doctor of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia
Danilov Alexander Maksimovich, doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

EXPERIENCE THE DESIGN OF COMPOSITE MATERIALS: SOME ASPECTS OF MATHEMATICAL MODELING

Propose an algorithm for the design of composite materials based on their representation as a complex system using a systematic approach. The focus is on the methodological aspects of mathematical modeling.

Key words: composite materials, design, system approach, mathematical and computer modeling.

REFERENCES

1. Garkina, I.A. Cognitive modeling of composite materials for the synthesis of complex systems [Text] / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 3/4. — P. 30–37.
 2. Danilov, A.M. Methodology for the design of complex systems in the development of special purpose [Text] / A.M. Danilov, I.A. Garkina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 1. — P. 80–85.
 3. Garkina, I.A. Flocculation in disperse systems [Text] / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.A. Smirnov / / Control systems and information technology. — 2008. — N 2.3 (32). — P. 344–347.
 4. Budylina, E.A. Modelling the management of technical systems / Regional architecture and construction [Text] / E.A. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and construction. — 2013. — N 2 (16). — P. 138–143.
-

УДК 691.54:678.046.3:539.4

В.П. СЕЛЯЕВ, А.А. СЕДОВА, Л.И. КУПРИЯШКИНА, А.К. ОСИПОВ

**КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ
ПОВРЕЖДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ
РАСТВОРАМИ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ**

Изучено взаимодействие некоторых карбоновых кислот с наполненным цементным камнем; проанализированы повреждения строительных материалов на минеральных вяжущих при взаимодействии с агрессивными средами.

Ключевые слова: цементный камень, карбоновые кислоты, цеолитсодержащие породы, осадок, структура, кинетические кривые, прочность.

За последние годы строительная индустрия развивается быстрыми темпами. Особенно бурно расширяется производство различных видов бетонов, обладающих заданным набором эксплуатационных и физико-механических характеристик. При этом большое значение приобретают технологии производства бетонов, основанные на экономии ресурсов как материальных, так и энергетических. Перспективными являются направления исследований, связанных с разработкой составов бетонов, обеспечивающих снижение расхода цемента [1].

Широкое применение в производстве строительных материалов находят цеолитсодержащие породы, которые наряду с экономией цемента на 20–30 % позволяют улучшить ряд свойств бетонов. Значительно повышаются коррозионная стойкость, морозостойкость и прочность [2]. Дешевизна цеолитов, высокие адсорбционные и ионообменные свойства делают экономически целесообразным использование их в строительной индустрии [3].

В задачу настоящей работы входило изучение взаимодействия цементного камня, наполненного цеолитсодержащей породой (ЦСП) с растворами карбоновых кислот: винной, лимонной и щавелевой, моделирующих процессы повреждения минерального вяжущего. Проблема повреждения строительных конструкций под воздействием агрессивных сред в настоящее время является весьма актуальной. Различные колонии микроорганизмов, поселяясь на поверхности бетона, не только негативно влияют на эстетику помещений или стеновых конструкций, но и способствуют разрушению бетона.

Продуктами метаболизма (жизнедеятельности) микроорганизмов, поселяющихся на поверхности бетона, являются низкомолекулярные карбоновые кислоты, которые выделяются микроорганизмами в достаточно большом количестве. Они образуют на поверхности бетона кислую «пленку», pH которой зависит от природы кислоты, ее структуры. Взаимодействие карбоновых кислот с бетоном приводит к высвобождению из него ионов кальция, магния, железа и протеканию реакции комплексообразования на поверхности микротрещин бетона, которые постепенно расширяются и углубляются, что постепенно инициирует процесс разрушения поверхности бетона.

© Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., 2013

Цель настоящего исследования — комплексное изучение процессов, происходящих в системе «цементный камень — модельный раствор карбоновой кислоты».

Цементные композиты, изготовленные на основе портландцемента М400 и наполненные ЦСП Атяшевского месторождения со степенью наполнения 10, 20 и 30 %, дисперсностью 0,315, 0,63 и 1,25 мм, выдерживали в растворах винной, лимонной и щавелевой кислот концентрацией 0,5, 1,0 и 2,0 %, моделирующих процессы повреждения. Установлен вид и характер кинетических зависимостей $C_{\text{на}} = \tau, \text{сут}$; $\text{pH} = \tau, \text{сут}$.

Кинетические кривые $C_{\text{на}} = \tau$, сут свидетельствуют, что при контакте цементного камня с винной и лимонной кислотами происходит заметное снижение тартрат- и цитрат-ионов в течение 5–14 сут, и в дальнейшем концентрация перечисленных ионов снижается до минимума. Результаты анализа представлены на рис. 1, 2.

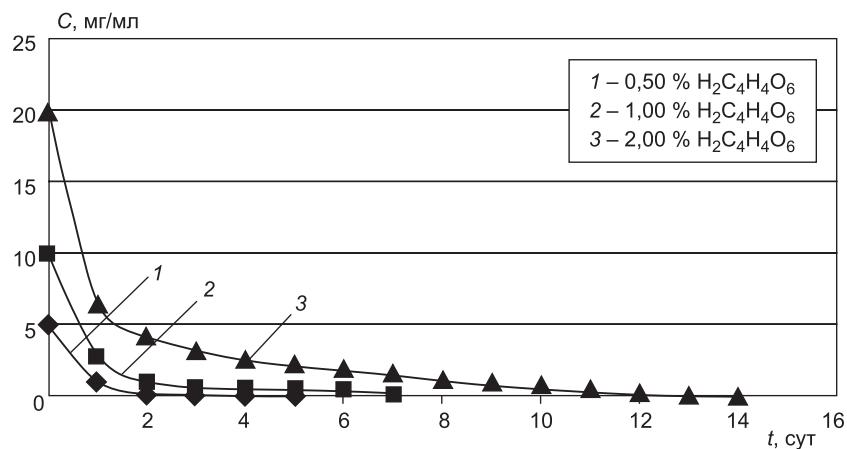


Рис. 1. Изменение концентрации винной кислоты от времени контакта с цементным камнем, наполненным ЦСП (10 % наполнения, диаметр гранул — 0,315 мм)

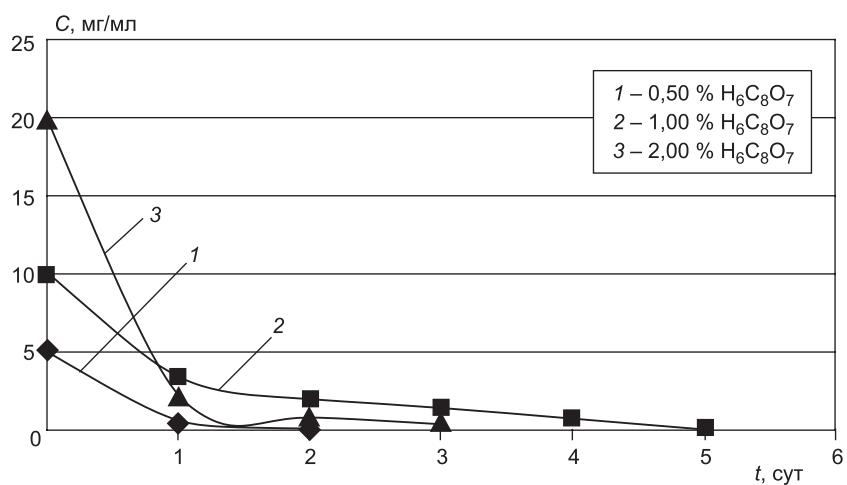


Рис. 2. Изменение концентрации лимонной кислоты от времени контакта с цементным камнем, наполненным ЦСП (10 % наполнения, диаметр гранул — 0,315 мм)

Кинетические кривые $C_{\text{на}} - \tau$, сут для щавелевой кислоты такой же концентрации несколько отличаются от кривых с винной и лимонной кислотами. Наблюдается лишь незначительное снижение концентрации оксалат-ионов при контакте «цементный камень — щавелевая кислота» в течение 8 сут. Результаты анализа представлены на рис. 3.

Кинетические кривые $\text{pH} - \tau$, сут для винной и лимонной кислот отличаются от кинетических кривых $\text{pH} - \tau$, сут щавелевой кислоты. Для винной и лимонной кислот на графиках зависимости $\text{pH} - \tau$, сут (рис. 4) наблюдается монотонное возрастание pH реакционной смеси (переход в щелочную область). Это объясняется взаимодействием винной и лимонной кислот с цементным камнем и вымыванием из него в водный раствор ионов Ca^{2+} . В растворах с лимонной кислотой pH среды выше, чем в растворах с винной кислотой, что свидетельствует о большей ее активности.

За время проведения эксперимента наблюдали за окраской раствора и внешним видом цементного камня. Растворы винной и лимонной ки-

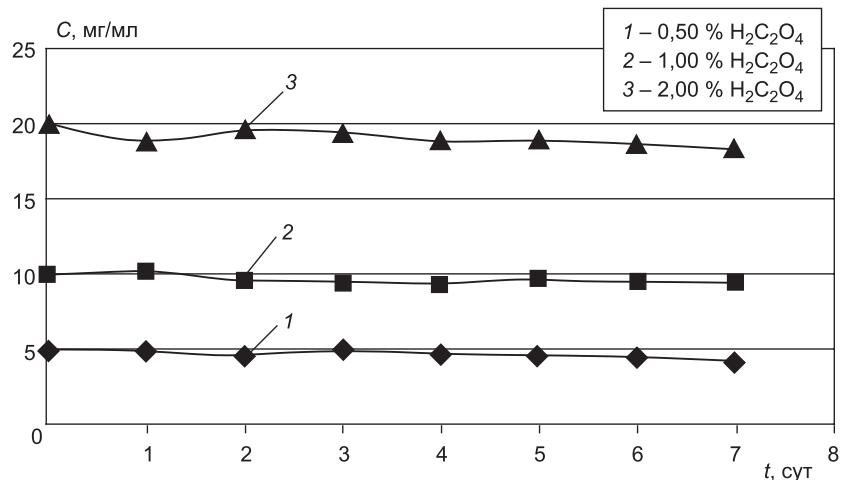


Рис. 3. Изменение концентрации щавелевой кислоты от времени контакта с цементным камнем, наполненным ЦСП (10 % наполнения, диаметр гранул ЦСП — 0,315 мм)

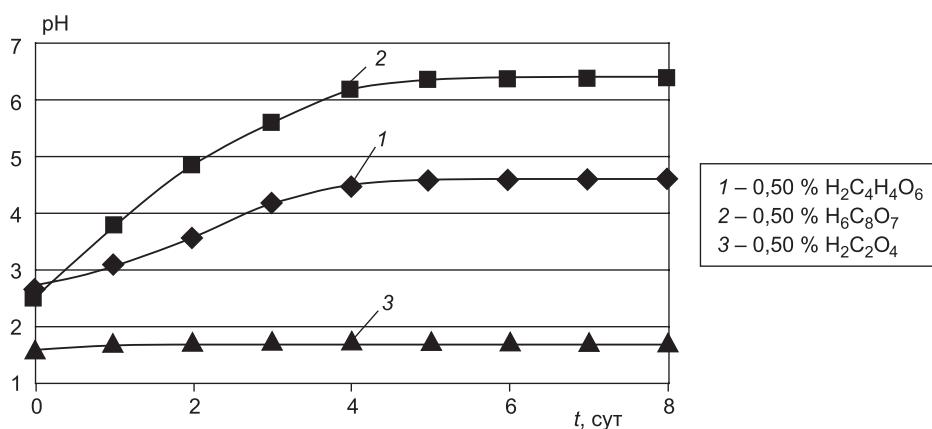


Рис. 4. Динамика изменения pH среды в течение 8 сут при выдерживании цементного камня, наполненного ЦСП в растворе карбоновой кислоты 0,5 % концентрации (степень наполнения ЦСП 30 %, диаметр гранул — 0,315 мм)

слот окрашивались в желто-зеленый цвет. Углубление окраски происходило по мере увеличения продолжительности контакта «цементный камень — винная кислота», «цементный камень — лимонная кислота» и с увеличением концентрации кислот. На поверхности кубиков в обоих случаях наблюдали за появлением окрашенной пленки, которая постепенно отслаивалась и переходила в осадок. Можно полагать, что лимонная кислота более активно действует на цементный камень и вымывает ионы Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} . Винная кислота уступает по активности лимонной, но значение pH среды также повышается в щелочную область. Окрашивание растворов происходит за счет образования комплексных соединений Fe (III) с кислотами-комплексообразователями.

При контакте цементного камня с щавелевой кислотой не наблюдалось значительного снижения концентрации оксалат-ионов. Не наблюдалось окрашивания растворов, не замечено образования пятен на бетоне, не происходило образования осадка как с винной и лимонной кислотами. pH среды находится в пределах 1,1–1,7.

Щавелевая кислота по сравнению с вышеуказанными кислотами более сильная кислота. $\text{pK}_{\text{a}_1} = 1,25$, что свидетельствует о высокой степени ее диссоциации. Образуется при этом больше ионов гидроксония, поэтому pH среды ниже, чем в системах с лимонной и винной кислотами. Возможно образование на поверхности бетона защитной «пленки» из соединений кислоты с ионами Ca^{2+} , вымываемыми из бетона, которые обладают низкой растворимостью.

Подобные соединения образуются и с винной, лимонной кислотой, но, по-видимому, менее устойчивые в растворах изученных равновесий. Защитная «пленка» из соединений щавелевой кислоты, вероятно, способствует сохранению низкого значения pH на поверхности бетона, замедлению образования микротрещин и, возможно, повышению гидроизоляции бетона.

Активная кислотность среды является важным фактором роста и развития грибов, вызывающих биокоррозию. Большинство грибов лучше развиваются в слабокислых условиях ($\text{pH } 5,0\text{--}6,0$). Очень кислая и очень щелочная среды токсичны для большинства грибов. Предельные значения pH, выше и ниже которых рост грибов прекращается, равны соответственно (1,0–11,0). В системе «цементный камень — щавелевая кислота» в пределах изученных концентраций сохраняется низкое значение pH (1,1–1,7). Это не способствует росту грибов.

Через 5–14 сут цементные камни отделяли от модельных растворов, просушивали на воздухе, затем в сушильном шкафу при температуре 60–90 °C. Цементные композиты испытывали на прочность, фильтрат анализировали на содержание ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ методом ионной хроматографии с использованием ионного анализатора модели PIA-1000. Содержание Fe^{3+} , Al^{3+} определяли атомно-абсорбционным методом. Осадок, выделенный из фильтрата, сушили и исследовали на многофункциональном растровом электронном микроскопе с интегрированной системой фокусированного ионного пучка.

Результаты анализа фильтрата представлены в таблице. По результатам анализа можно сделать вывод, что в фильтратах содержатся в большом количестве ионы Ca^{2+} , а также Fe^{3+} , Al^{3+} . Содержание указанных компонентов в фильтратах зависит от природы карбоновых кислот, их

**Результаты анализа фильтрата после выдерживания цементного камня
в растворах щавелевой, винной и лимонной кислот**

τ, сут	ω, % H ₆ C ₈ O ₇	ЦСП, %	x ± (t _{P,j} · S)/√n, мг/л			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	Al ³⁺
<i>Крупность гранул ЦСП 0,315 мм (раствор лимонной кислоты)</i>						
5	0,5	10	136,86 ± 0,004	14,771 ± 0,002	6,8377 ± 0,114	73,1050 ± 0,109
		30	179,354 ± 0,024	24,465 ± 0,001	7,3988 ± 0,117	115,0555 ± 0,099
	1	10	114,988 ± 0,011	13,610 ± 0,004	14,3660 ± 0,094	177,2140 ± 0,120
		30	120,840 ± 0,013	11,199 ± 0,012	15,2523 ± 0,116	190,3612 ± 0,117
	2	10	136,860 ± 0,020	14,771 ± 0,017	38,7745 ± 0,097	802,6900 ± 0,116
		30	333,873 ± 0,008	24,857 ± 0,011	42,0946 ± 0,083	963,7358 ± 0,114
<i>Крупность гранул ЦСП 0,315 мм (раствор винной кислоты)</i>						
5	0,5	10	97,800 ± 0,074	5,322 ± 0,003	1,070 ± 0,001	2,732 ± 0,057
		30	115,452 ± 0,004	7,528 ± 0,007	1,195 ± 0,004	4,403 ± 0,002
	1	10	276,431 ± 0,006	13,080 ± 0,074	2,859 ± 0,003	—
		30	417,178 ± 0,005	17,391 ± 0,002	2,681 ± 0,033	92,820 ± 0,044
	2	10	259,793 ± 0,005	21,116 ± 0,010	7,041 ± 0,011	—
		30	417,178 ± 0,001	17,931 ± 0,001	6,987 ± 0,096	125,75 ± 0,003
<i>Крупность гранул ЦСП 0,315 мм (раствор щавелевой кислоты)</i>						
5	0,5	10	72,910 ± 0,004	2,754 ± 0,007	1,188 ± 0,011	53,836 ± 0,007
		30	18,565 ± 0,014	—	1,118 ± 0,004	204,060 ± 0,002
	1	10	28,322 ± 0,016	—	1,388 ± 0,013	92,8398 ± 0,011
		30	29,081 ± 0,005	—	1,176 ± 0,033	366,707 ± 0,004
	2	10	0,253 ± 0,005	—	1,262 ± 0,010	142,176 ± 0,017
		30	0,589 ± 0,004	—	1,247 ± 0,006	358,782 ± 0,021

концентрации и степени наполнения композитов цеолитсодержащей породой (ЦСП). Чем больше содержание ЦСП, тем выше содержание Ca²⁺ в фильтрате. При этом содержание ионов Ca²⁺ выше содержания Mg²⁺, что согласуется с элементным анализом ЦСП. В фильтратах винной кислоты содержание ионов Ca²⁺ выше, чем в лимонной кислоте. Наименьшее количество свободных ионов Ca²⁺ содержится в фильтратах щавелевой кислоты. Al³⁺ в большем количестве найден в фильтратах, где ЦСП содержится 30 % в цементном камне, что соответствует также элементному составу ЦСП. При этом большая роль отводится состоянию ЦСП, размеру гранул. Размер гранул способствует адсорбции малорастворимого соединения CaC₂O₄. Чем меньше размер гранул, тем больше поверхность ЦСП и выше адсорбция. Однако при большом содержании наполнителя (30 %) становятся заметными отрицательные стороны ЦСП, ее размокаемость в воде, выделение глинистой составляющей, что ведет к снижению адсорбции, а значит к снижению прочности бетона.

Методом растровой электронной микроскопии определен элементный состав осадка, который образовался на цементном камне в системе «цементный камень — винная кислота», «цементный камень — лимонная кислота». Результаты анализа свидетельствуют о том, что осадок в большей мере состоит из соединений кальция. При этом содержание CaO зависит от концентрации винной и лимонной кислот. Как правило, содержит

жение CaO увеличивается с повышением степени наполнения ЦСП до 30 % от массы цемента. Оксид магния обнаружен лишь в нескольких осадках. Осадки содержат также оксиды Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 .

Метод гранулометрии позволил нам установить структуру осадков, которая зависит от состава композита, доли ЦСП в нем, концентрации кислоты, в которой выдерживался композит.

При сопоставлении массы образующего осадка с прочностью цементных композитов можно сказать, что прочность снижается по мере увеличения массы осадка, образовавшегося на поверхности композита и перешедшего в раствор. В системе «цементный композит — лимонная кислота» осадок состоит из кристаллов труднорастворимого цитрата кальция, имеет форму игл. Это оптимальная форма для кристалла, формирующегося и растущего в пористых телах и средах (рис. 5).

Более высокой прочностью обладают композиты, содержащие 20 % наполнения ЦСП с крупностью 0,63 мм, после экспонирования в щавелевой кислоте. Прочность образцов составила 53 МПа. При выдерживании данных материалов в модельных растворах щавелевой кислоты не происходит выпадение осадка, а образуется защитная «пленка», не позволяющая материалу разрушаться. Низкую прочность показали все наполненные композиты, независимо от крупности и степени наполнения, выдержаные в растворах лимонной кислоты, с наибольшим объемом выпавшего осадка. С повышением степени наполнения цементных композитов до 30 % прочность их понижается. Этот вывод сделан по всем карбоновым кислотам. Вероятно, с повышением содержания ЦСП в бетоне увеличивается содержание глинистой составляющей, которая снижает адгезию компонентов в системе. Поэтому содержание ЦСП при изготовлении бетона не должно превышать 10, 20 % от массы цемента. Следует также отметить, что с повышением степени наполнения ЦСП до

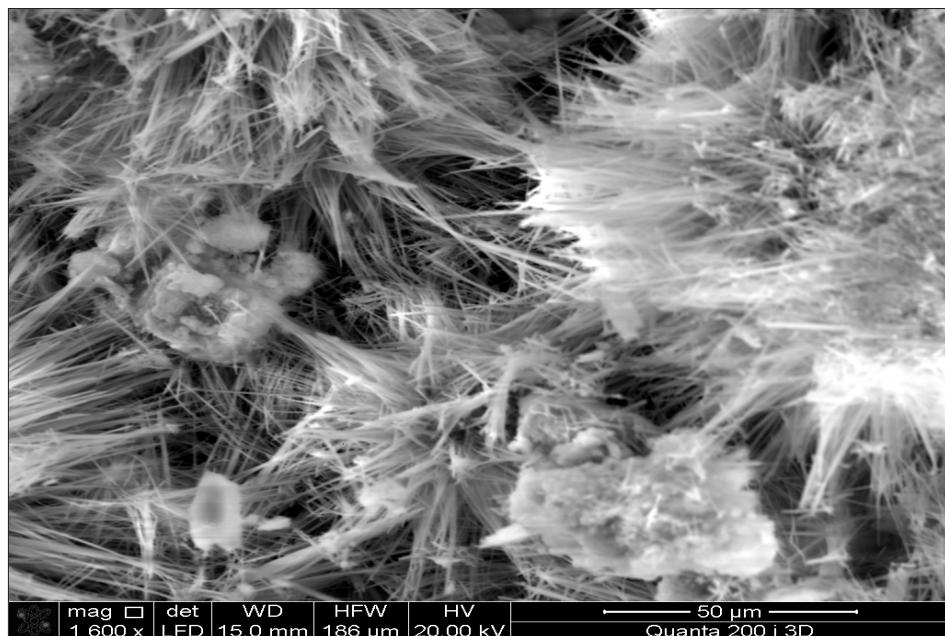


Рис. 5. Структура осадка, полученная на многофункциональном растровом электронном микроскопе с интегрированной системой фокусированного ионного пучка Quanta 200i 3D FEI при увеличении ×1600

30 % увеличивается образование осадка в фильтрате, а это свидетельствует об усилении коррозии. Экспериментальные данные показывают, что структура композита должна быть однородной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Selyaev, V.P. Diatomite middle Volga. Structure and properties [Текст] / V.P. Selyaev, V.A. Neverov, L.I. Kupriyashkina, A.K. Osipov, O.A. Udina // Science, Technology and Higher Education. Canada : Westwood, 2013. — Vol. 2.
2. Селяев, В.П. Оптимизация составов цементных композиций, наполненных цеолитами [Текст] / В.П. Селяев, А.К. Осипов, Л.И. Куприяшкина, С.Н. Волкова, Н.А. Епифанова // Изв. вузов. Строительство. — 1999. — № 4. — С. 36–39.
3. Селяев, В.П. Изменение кинетики твердения наполненных цементных композитов [Текст] / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина, Г.Р. Нураева, П.С. Козлов // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 14–18.

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
СЕДОВА Анна Алексеевна, канд. хим. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна, канд. техн. наук, проф.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
ОСИПОВ Анатолий Константинович, канд. хим. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 11.07.13

Selyaev Vladimir Pavlovich, academician of the Russian Academy of architectural and building sciences, doctor of technical sciences, professor, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Sedova Anna Alexeevna, candidate of chemical sciences, assistant professor, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna, candidate of technical sciences, professor, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Osipov Anatoly Konstantinovich, candidate of chemical sciences, assistant professor, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

COMPREHENSIVE STUDY OF THE PROCESS OF DAMAGE CEMENT MATRIX SOLUTION OF THE CARBOXYLIC ACIDS

The paper studied the interaction of some carboxylic acids with a full cement bond; analyzed damage building materials mineral binders in contact with aggressive media.

Key words: cement stone, carboxylic acid, zeolite rock, precipitate, structure, kinetic curves, strength.

REFERENCES

1. Selyaev, V.P. Diatomite middle Volga. Structure and properties [Text] / V.P. Selyaev, V.A. Neverov, L.I. Kupriyashkina, A.K. Osipova, O.A. Udina // Science, Technology and Higher Education. Canada : Westwood, 2013. — Vol. 2.
2. Selyaev, V.P. Optimization of cement compositions filled with zeolite [Text] / V.P. Selyaev, A.K. Osipov, L.I. Kupriyashkina, S.N. Volkova, N.A. Epifanova // Math. universities. Building. — 1999. — N 4. — P. 36–39.
3. Selyaev, V.P. Changing the kinetics of hardening cement -filled composites [Text] / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina, G.R. Nugaeva, P.S. Kozlov // Math. universities. Building. — 2010. — N 6. — P. 14–18.

УДК 691.42.002.3

В.З. АБДРАХИМОВ, А.В. КОЛПАКОВ

**ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩЕГО НАНОТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ:
ОСАДОК-ОТХОДА СТОЧНЫХ ВОД, ОТХОДА ПЫЛИ-УНОСА
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ЗАВОДОВ, ШЛАМА
ОТ ВОДООЧИСТКИ ВОДЫ И ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ШЛАМА
В ПРОИЗВОДСТВЕ КИРПИЧА**

Использование кальцийсодержащего нанотехногенного сырья: осадок-отхода, выпадающего в процессе реагентной обработки сточных вод, отхода пыли-уноса, получаемого при производстве дорожных смесей на асфальтобетонном заводе, карбонатного шлама, получаемого при водоочистке питьевой воды, и гальванического шлама в производстве керамических материалов на основе межсланцевой глины позволяет получить с высокими физико-механическими показателями кирпич без применения природных традиционных материалов.

Ключевые слова: керамический материал, нанотехногенное сырье, осадок-отход, отход пыли-уноса, карбонатный шлам, гальванический шлам, составы керамических масс, физико-механические показатели.

Введение. Наличие дешевого и доступного нанотехногенного сырья вызывает потребность в создании и применении нанотехнологий в производстве строительных материалов. Однако развитие нанотехнологий невозможно без создания глубокой теоретической базы, включающей

- а) разработку критерия оценки принадлежности техногенного сырья к нанопродуктам;
- б) создание банка данных;
- в) определение приоритетных задач в области нанотехнологий производства строительных материалов.

Наночастицы — один из наиболее общих терминов для обозначения изолированных ультрадисперсных объектов, во многом дублирующий ранее известные термины (коллоидные частицы, ультрадисперсные частицы), но отличающийся от них четко определенными размерными границами. Твердые частицы размером менее 1 нм обычно относят к кластерам, более 100 нм — к субмикронным частицам.

Ультрадисперсными называются системы, содержащие частицы с размерами в субмикронном диапазоне, в частности, нанодиапазоне. В современной порошковой металлургии и керамике ультрадисперсной считается микроструктура сплавов с размером зерен от 200 до 500 нм.

Размерные границы ультрадисперсности строго не определены, и в разных областях знания в это понятие вкладывается несколько различное количественное содержание. Два наиболее распространенных подхода к размерности приведены выше в определении ультрадисперсной системы. Согласно второму из них, к субмикронным материалам относятся сплавы и порошки с размером зерна (кристаллитов) от 500 нм до 1,2 мкм, к наноструктурированным — с размером зерна менее 200 нм, а ультра-

Таблица 1
Химический состав компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
Осадок-отход, выпадающий в процессе реагентной обработки сточных вод	4,5	7,4	7,2	42,4	2,8	0,5	34,2
Отход пыли-уноса, получаемый при производстве дорожных смесей на асфальтобетонном заводе	11,0	1,5	3,8	35,2	9,1	—	39,2
Карбонатный шлам, получаемый при водоочистке питьевой воды	19,16	10,4	1,51	47,54	8,0	0,2	21,08
Гальванический шлам	4,8	14,3	3,7	36,8	2,1	12,47	24,8
Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	9–20

дисперсные материалы занимают промежуточное положение между ними. Кристаллит — твердое тело субмикронных размеров, представляющее собой трехмерную периодическую решетку из атомов, ионов или молекул, ограниченное замкнутой поверхностью, за пределами которой изменена или нарушена ориентация кристаллической решетки, либо находится газообразная, жидккая фаза или вакуум. В данном случае поверхность — это граница раздела двух фаз (твердого тела, жидкости, газа).

Уменьшение частиц до нанометровых размеров приводит к проявлению в них так называемых «квантовых размерных эффектов», когда размеры исследуемых объектов сравнимы с длиной волны де Броиля электронов, фононов и экситонов. В сфероидальных наночастицах имеет место трехмерное квантование уровней, что позволяет судить в зависимости от состава наночастиц об образовании «квантовых точек», «квантовых кристаллитов» и других объектов с нулевой размерностью.

Присутствие в системе наноразмерных частиц способствует увеличению объема адсорбционно и хемосорбционно связываемой ими воды и уменьшению объема капиллярно-связанной и свободной воды, что приводит к повышению пластичности керамической массы и прочностных показателей.

Экспериментальная часть. Нами впервые был получен керамический кирпич с использованием кальцийсодержащих нанотехногенных сырьевых материалов: осадок-отхода, выпадающего в процессе реагентной обработки сточных вод, отхода пыли-уноса, получаемого при производстве дорожных смесей на асфальтобетонном заводе, карбонатного шлама, получаемого при водоочистке питьевой воды, и гальванического шлама, что подтверждено патентами РФ [1–4]. Оптимальное содержание исследуемых нанотехногенных сырьевых материалов в керамических массах 35–40 %. Химические составы исследуемых компонентов представлены в табл. 1.

Для производства керамических материалов в качестве глинистого компонента использовалась межсланцевая глина^{1, 2}, образующаяся при добыче горючих сланцев. По числу пластичности межсланцевая глина от-

¹ Абдрахимов В.З., Рощупкина И.Ю., Абдрахимова Е.С., Колпаков А.В. Использование отходов горючих сланцев в производстве теплоизоляционных материалов без применения природного сырья // Экология и промышленность России. 2012. № 3. С. 28–31.

² Абдрахимов В.З., Денисов Д.Ю. Исследование фазовых превращений на различных этапах обжига керамзита из межсланцевой глины // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 10. С. 34–42.

носится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 27–32) с истинной плотностью 2,55–2,62 г/см³. Химический состав представлен в табл. 1.

Керамическую массу для получения высокомарочного кирпича готовили из составов, представленных в табл. 2.

Таблица 2
Составы керамических масс

Компонент	Содержание компонентов, мас. %			
	1	2	3	4
Межсланцевая глина	60	60	60	60
Осадок-отход, выпадающий в процессе реагентной обработки сточных вод	40			
Отход пыли-уноса, получаемый при производстве дорожных смесей на асфальтобетонном заводе		40		
Карбонатный шлам, получаемый при водоочистке питьевой воды			40	
Гальванический шлам				40

Керамический кирпич готовили пластическим способом. Компоненты после прохождения сквозь сито 063 тщательно перемешивали и получали шихту. Из увлажненной керамической шихты при влажности 20–22 % формовали образцы в натуральную величину кирпича размером 250×120×65 мм. Сформованные образцы высушивали до остаточной влажности не более 5 %, а затем обжигали при температуре 1050 °C. Изотермическая выдержка кирпича при конечной температуре 1–1,5 ч. Физико-механические и химические свойства обожженных керамических кирпичей представлены в табл. 3.

Таблица 3
Физико-механические показатели

Компонент	Составы керамических масс			
	1	2	3	4
Механическая прочность при сжатии, МПа	19,4	18,0	18,5	21,0
Механическая прочность при изгибе, МПа	3,2	3,0	3,1	4,1
Плотность, кг/м ³	1440	1380	1400	1420
Усадка, %	6,7	6,2	6,3	7,8
Морозостойкость, циклы	75	65	70	81
Термостойкость, циклы	7	9	8	5
Кислотостойкость, %	90,1	85,8	89,8	91,2

Как видно из табл. 2, из составов № 1–4 полученные кирпичи на основе межсланцевой глины, содержащие нанотехнологенные сырьевые материалы без применения природных традиционных материалов, имеют марочность не ниже М175.

Если в используемых отходах наночастицы содержатся даже в небольшом количестве, то энергию Гиббса можно записать в следующем виде¹:

$$G_i^{\text{нк}} = G_i^{\text{mac}} + \sigma_i f_i,$$

где $G_i^{\text{нк}}$ и G_i^{mac} — энергия Гиббса нанокристаллических и массивных фаз соответственно; σ_i и f_i — поверхностное натяжение и поверхность частиц i -й фазы соответственно.

Отсюда видно, что в системе появляется еще один независимый параметр — поверхность, а следовательно, и дополнительная степень свободы^{3, 4}.

Эффект от внедрения наноразмерных частиц выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантово-механических проявлений, что способствует повышению физико-механических показателей.

При уменьшении размера зерен увеличивается общая величина поверхности раздела фаз, уменьшается средний радиус кривизны выпуклых участков, растет их избыточная поверхностная энергия, уменьшаются расстояния между источниками и поглотителями вакансий в системе⁵. Экспериментальные исследования и богатый практический опыт керамических производств подтверждают важнейшую роль степени измельчения (или использования наноразмерных сырьевых материалов). За счет действия одного этого фактора удается в ряде случаев снизить требуемую температуру спекания на 200 °С и более⁵.

Выводы. Безусловным достоинством использования многотоннажных нанотехногенных отходов является разгрузка экологической обстановки. Кроме того, осадок-отходы, выпадающие в процессе реагентной обработки сточных вод, и карбонатный шлам, получаемый при водоочистке питьевой воды, образуются повсеместно и накоплены в больших количествах по всей стране, что объясняется спецификой их получения и отсутствием разработок по масштабному применению.

Использование рассмотренного кальцийсодержащего нанотехногенного сырья в производстве керамических материалов на основе межсланцевой глины способствует решению следующих задач:

- а) утилизации промышленных отходов и техногенных отложений, что направлено на охрану окружающей среды;
- б) вовлечению техногенных образований в производственный оборот для производства строительных материалов с учетом истощения природных сырьевых ресурсов;
- в) освобождению значительных земельных участков от воздействия негативных антропогенных факторов и рациональному использованию ингредиентов промышленных отвалов на объектах строиндустрии;
- г) снижению стоимости строительных материалов;
- д) рациональному природопользованию за счет вовлечения отходов в производство керамических материалов;
- е) созданию энерго- и ресурсосберегающих технологий по производству строительных материалов;
- ж) сохранению и рациональному использованию имеющихся природных сырьевых ресурсов;

³ Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Структурные превращения соединений железа в глинистых материалах по данным мессбауэровской спектроскопии // Журнал физической химии. 2006. Т. 80. № 7. С. 1–8.

⁴ Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Особенности структурных превращений соединений железа в глинистых материалах различного химико-минералогического состава // Материаловедение. 2002. № 12. С. 43–46.

⁵ Будников П.П. и др. Химическая технология керамики и огнеупоров. М.: Изд-во лит. по строительству, 1972. 552 с.

з) использованию накопленных и вырабатываемых отходов производства;

и) снижению экологической напряженности в РФ;

к) охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для получения строительных материалов;

л) возможности решения федерального закона № 89-ФЗ (от 24.06.1998 г.) «Об отходах производства и потребления», который ориентирован на упорядочение сбора, хранения, транспортировки, размещения отходов и увеличения доли использования отходов промышленности в строительной отрасли в качестве вторичных ресурсов в максимально возможных объемах;

м) исключению затрат на геологоразведочные работы, на строительство и эксплуатацию карьеров;

н) снижению поступления в водную экосистему за счет атмосферных осадков тяжелых металлов, содержащихся в нанотехногенном сырье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2481304 Российская Федерация. RU. МПК C2, C04B 33/132. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича [Текст] / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. — Опубл. 10.05.2013, Бюл. 13.
2. Пат. № 2481303 Российской Федерации. RU. МПК C2, C04B 33/132. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича [Текст] / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова. — Опубл. 10.05.2013, Бюл. 13.
3. Пат. № 2346908 Российской Федерации. RU. МПК C2, C04B 33/132. Керамическая масса для изготовления керамического кирпича [Текст] / И.В. Ковков, В.В. Шевандо, В.З. Абдрахимов, Д.Ю. Денисов, Е.С. Абдрахимова, А.В. Абдрахимов, Е.В. Вдовина. — Опубл. 20.02.2009, Бюл. 5.
4. Пат. № 2410356 Российской Федерации. RU. МПК C1, C04B 33/132. Керамическая масса для изготовления керамического кирпича [Текст] / В.З. Абдрахимов, И.В. Ковков, Е.С. Абдрахимова. — Опубл. 27.01.2011, Бюл. 3.

АБДРАХИМОВ Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru
Самарская академия государственного и муниципального управления
КОЛПАКОВ Александр Викторович, асп.; E-mail: roland.alex@mail.ru
Самарская академия государственного и муниципального управления

Получено 29.07.13

Abdrakhimov Vladimir Zakirovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

Kolpakov Alexander Viktorovich, post-graduate student; E-mail: roland.alex@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

INNOVATE WAYS OF USING THE NANO CALCIUM-INDUSTRIAL RAW MATERIAL: SLUDGE-WASTE SEWAGE, DUST-ASH WASTE OF COATING PLANTS, SLUDGE FROM WATER PURIFICATION AND GALVANIC SLUDGE IN BRICK PRODUCTION

Using the nano calcium-industrial raw material: sludge-waste, drop down in the chemical treatment of sewage, dust-ash waste produced in the manufacture of road mixes coating plant, carbonate sludge obtained in water purification of drinking water in production of ceramic

materials based on inter shale clay provides a high physical and mechanical properties brick without the use of natural traditional materials.

K e y w o r d s: ceramic material, nano industrial raw material, sludge waste, dust-ash waste, carbonate sludge, galvanic sludge, ceramic mass compositions, physical and mechanical properties.

REFERENCES

1. Pat. 2481304 RF: IPC S2, S04V 33/132. Ceramic composition for the manufacture of lightweight bricks [Text] / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov. — Publ. 10.05.2013, Bull. 13.
 2. Pat. 2481303 RF: IPC S2, S04V 33/132. Ceramic composition for the manufacture of lightweight bricks [Text] / V.Z. Abdrakhimov, E.S. Abdrakhimova. — Publ. 10.05.2013, Bull. 13.
 3. Pat. 2346908 RF: IPC S2, S04V 33/132. Ceramic mass for the manufacture of ceramic bricks [Text] / I.V. Kovkov, V.V. Shevando, V.Z. Abdrakhimov, D.Yu. Denisov, E.S. Abdrakhimova, A.V. Abdrakhimov, E.V. Vdovina. — Publ. 20.02.2009, Bull. 5.
 4. Pat. 2410356 RF: IPC S1, S04V 33/132. Ceramic mass for the manufacture of ceramic bricks [Text] / V.Z. Abdrakhimov, I.V. Kovkov, E.S. Abdrakhimova. — Publ. 27.01.2011, Bull. 3.
-

УДК 691.55:539.4

**Л.В. ЗАВАДСКАЯ, Г.И. БЕРДОВ, Я.С. АГАЛАКОВА,
Е.А. ШИШМАКОВА**

УПРОЧНЕНИЕ ГИПСОВОГО КАМНЯ С ВВЕДЕНИЕМ ДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК

Исследовано влияние дисперсных минеральных добавок (кварц, диопсид), введенных в количестве от 1 до 80 % от массы гипса, на механическую прочность гипсового камня. Показано, что введение оптимального количества добавки, зависящего от их дисперсности, позволяет повысить прочность при сжатии гипсового камня на 40–58 %, при изгибе на 8–24 %.

Ключевые слова: гипсовый камень, механическая прочность, минеральные добавки, кварц, диопсид.

Гипсовые материалы по основным показателям (трудоемкости изготовления, топливо- и энергоемкости, эстетическим и др.) имеют ряд преимуществ при использовании внутри помещений в зданиях различного назначения. Во многом это определяется низкой стоимостью гипсовых вяжущих и коротким циклом производства [1].

В отличие от других, гипсовые вяжущие не дают усадки и, напротив, при твердении увеличиваются в объеме.

Гипсовые изделия отличаются гигиеничностью, небольшой средней плотностью (1200–1500 кг / м³), высокой пористостью (30–60 %), огнестойкостью, архитектурной выразительностью, высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами. Однако прочность у них невысокая, в отличие от изделий на основе цемента.

Для повышения прочности гипсового камня может быть использовано микроармирование волокнами (полиамидными, базальтовыми) [2] или дисперсными минеральными добавками (волластонит, диопсид, известняк) [3]. Заметное влияние на прочностные и деформативные свойства полученного материала проявляется при достаточном насыщении системы волокнами.

В случае введения волластонита, диопсида и известняка в количестве 20, 30 и 40 % от массы гипса увеличение прочности гипсового камня не наблюдается [3].

При введении минеральных добавок происходит микроармирование структуры и перераспределение напряжений в случае приложения внешней нагрузки. Если модуль упругости материала добавки больше, чем у гипса, то концентрация напряжений будет происходить на частиках добавки, что приведет к увеличению механической прочности образцов. С этой точки зрения представляют интерес добавки, имеющие высокую твердость, т. е. и более высокий модуль упругости. К их числу относятся кварц и диопсид, твердость которых по минералогической шкале равна 7, что значительно больше, чем у гипса (2).

Вместе с тем большое значение имеет дисперсность и количество введенной добавки.

Взаимодействие добавок с частицами вяжущего осуществляется в зоне контакта этих компонентов. Очевидно, оптимальная концентрация добавок соответствует случаю, когда ее частицы со всех сторон плотно окружены частицами вяжущего вещества. Меньшее количество добавок приведет к снижению эффективности их действия.

При большем их содержании возможны прямые контакты между частицами добавок, что также снизит эффективность их влияния.

При увеличении дисперсности добавки ее оптимальное количество уменьшается.

В данной работе исследован гипс марки Г5. В качестве добавки использованы измельченные кварцевый песок и диопсид.

Диопсид — силикат кальция и магния $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$. Диопсидовая добавка представляла собой измельченную отвальную породу — отход от переработки флогопитовых руд Алданского месторождения.

Она содержит, мас. %: диопсид — 70–75, сканолит — 10–20, флогопит — 2–3 %.

Химический состав добавки, мас. %: 51,0 SiO_2 ; 24,8 CaO ; 15,8 MgO ; 1,6 Al_2O_3 ; 3,6 Fe_2O_3 ; п.п.п. 0,2.

Добавка кварца представляла собой измельченный кварцевый песок, получаемый от ОАО «Новосибирский речной порт» (Новосибирская область).

Дисперсность добавки исследована с помощью лазерного анализа типа PRO-700, обеспечивающего определение размера частиц в пределах 1–192 мин по 16 интервалам значений (табл. 1).

Таблица 1

Показатели дисперсности минеральных добавок по результатам лазерного гранулометрического анализа

Показатели	Кварцевый песок	Диопсид
Среднеобъемный размер частиц, мкм	9,1	6,1
Удельная поверхность, $\text{cm}^2/\text{г}$	6840	7520
Доля частиц с размером менее 4 мкм, %	32,7	41,7
Доля частиц с размером менее 16 мкм, %	64,3	65,3
Доля частиц с размером менее 32 мкм, %	84,3	91,6

Добавки были введены в сухую гипсовую смесь, тщательно перемешаны и засыпаны в воду. После перемешивания масса заливалась в формы. Далее образцы сушились при температуре 80 °С в течение 24 ч.

У исследованных составов по общепринятым методикам определяли среднюю плотность, предел прочности при сжатии и изгибе, образцы имели размеры 4×4×16 см.

Полученные результаты приведены в табл. 2, 3. Каждая из указанных в них величин является средней из не менее чем шести экспериментальных результатов.

Гипсовые образцы без добавок обладают следующими свойствами: средняя плотность — 1,02 $\text{г}/\text{см}^3$, прочность при сжатии — 6,48 МПа, прочность при изгибе — 4,1 МПа.

Диопсид вводился в состав вяжущего в количестве от 1 до 80 % от массы гипса. В табл. 2 приведены водогипсовое (В/Г) отношение, плотность и прочность образцов при изгибе и сжатии.

Максимальная прочность при сжатии образцов достигается при количестве вводимого диопсида 9 %. При этом она увеличилась на 40 % по сравнению с бездобавочным гипсом. Следует отметить, что четко прослеживается максимум прочности при сжатии в зависимости от количества введенной добавки.

При введении добавки прочность образцов при сжатии возрастает существенное, чем прочность при изгибе. Максимальные значения прочности при изгибе превышают прочность состава без добавок на 8 % и соответствуют 3 % добавки. Отношение прочности при сжатии к прочности при изгибе образцов без добавок составляет 1,56, в то время как при введении добавки это отношение превышает 2,0.

Молотый кварцевый песок вводился в состав вяжущего в количестве от 1 до 80 % от массы гипса (табл. 3)

Максимальная прочность при сжатии образцов достигается при количестве вводимого кварцевого песка 20 %. При этом она увеличилась на 58 % по сравнению с бездобавочным составом. Максимальная прочность при изгибе достигается при содержании добавки 5 %. Она превышает прочность образцов без добавки на 24 %. Введение добавки кварцевого песка, как и в случае добавки диопсида, более существенно влияет на прочность при сжатии. И в этом случае отношение прочности при сжатии к прочности при изгибе превышает 2,0.

Измельченный кварцевый песок имеет более крупные частицы, чем диопсид (см. табл. 1). Это во многом обуславливает смещение максимума прочности при наличии более высоких концентраций добавки.

Таким образом, введение дисперсных минеральных добавок, обладающих высокой твердостью (кварц, диопсид), обеспечивает повышение прочности при сжатии гипсового камня на 40–58 %, прочности при изгибе на 8–24 %. Оптимальное количество добавки зависит от ее дисперсности и снижается с ее увеличением.

Таблица 2
Влияние добавки диопсида на свойства гипсовых образцов

Содержание диопсида, мас. %, от массы гипса	Средняя плотность, г/см ³	Прочность, МПа		В/Г
		при изгибе	при сжатии	
1	1,07	3,96	7,44	0,67
3	1,12	4,42	7,68	0,67
5	1,11	4,04	7,75	0,67
7	1,11	3,97	8,8	0,67
9	1,25	4,22	9,16	0,6
20	1,2	3,96	7,48	0,6
40	1,14	2,94	6,88	0,6
60	1,21	2,71	5,54	0,56
80	1,26	2,56	5,02	0,54

Таблица 3
Влияние добавки кварцевого песка на свойства гипсовых образцов

Содержание кварцевого песка, мас. %, от массы гипса	Средняя плотность, г/см ³	Прочность, МПа		В/Г
		при сжатии	при изгибе	
1	1,1	7,44	4,28	0,67
3	1,16	8,62	4,58	0,67
5	1,16	8,89	5,09	0,67
7	1,18	9,13	4,62	0,6
9	1,20	9,67	4,13	0,6
20	1,23	10,24	4,59	0,56
40	1,23	8,49	3,89	0,54
60	1,3	8,32	3,90	0,52
80	1,32	6,59	2,97	0,5

Введение таких добавок способствует повышению прочности образцов и снижению водогипсового отношения смесей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тросницкий, В.Б. Потенциал применения гипса в промышленности строительных материалов [Текст] / В.Б. Тросницкий, А.И. Пустохетлов // Промышленное и гражданское строительство. — 2005. — № 7. — С. 20–22.
2. Чернышева, Н.В. Разработка составов дисперсно-армированных вяжущих [Текст] / Н.В. Чернышева, М.Б. Рыбакова // Вестн. БГТУ. — 2009. — № 2. — С. 84–87.
3. Бердов, Г.И. Влияние природных минеральных добавок на свойства гипсовых смесей [Текст] / Г.И. Бердов, Е.В. Парикова, В.Ф. Хританков // Изв. вузов. Строительство. — 2006. — № 9. — С. 9–12.

ЗАВАДСКАЯ Любовь Владимировна, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

АГАЛАКОВА Яна Сергеевна, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ШИШМАКОВА Екатерина Александровна, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 15.07.13

Zavadskaya Lubov Vladimirovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Berdov Gennadiy Ilich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Agalakova Yana Sergeevna, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Shishmakova Ekaterina Alexandrovna, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

STRENGTHENING GYPSUM WITH THE INTRODUCTION DISPERSE MINERAL SUPPLEMENTS

The effect of particulate mineral supplements (such as quartz, diopside) administered in an amount of from 1 to 80 % by weight gypsum, the mechanical strength of the gypsum. It is shown that the introduction of the optimal amount of additives depends on their fineness, can increase the compressive strength of gypsum at 40–58 %, flexural to 8–24 %.

Key words: gypsum, mechanical strength, mineral supplements, such as quartz, diopside.

REFERENCES

1. Trosnitsky, V.B. The potential application of gypsum in the building materials industry [Text] / V.B. Trosnitsky, A.I. Pustohetlov // Industrial and civil construction. — 2005. — N 7. — P. 20–22.
2. Chernysheva, N.V. Development of structures of particulate-reinforced cementitious [Text] / N.V. Chernysheva, M.B. Rybakova // Herald BSTU. — 2009. — N 2. — P. 84–87.
3. Berdov, G.I. The influence of natural mineral additives on the properties of plaster [Text] / G.I. Berdov, E.V. Parikova, V.F. Hritankov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2006. — N 9. — P. 9–12.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.05:621.878/879

В.Н. АНФЕРОВ, О.И. НЕДАВНИЙ, С.В. БАЗИЛЕВИЧ, С.М. КУЗНЕЦОВ

ПОВЫШЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

На основе исследования строительных и механизированных процессов возведения объектов предложен подход для оценки организационно-технологической надежности проектирования и степени риска участников инвестиционного цикла.

Ключевые слова: организационно-технологическая надежность, строительный процесс, механизированный процесс, строительный проект, строительные машины, имитационное моделирование.

В настоящее время вопросы повышения организационно-технологической надежности выполнения строительно-монтажных работ (ОТН) с учетом организационных, технологических и экономических факторов оказывают решающее значение на эффективность строительного производства, а методы управления этими факторами приобретают особую актуальность.

Отсутствие методик учета вероятностного характера строительного производства, включающего строительные и механизированные работы, приводит к снижению надежности организационно-технологических и управлеченческих решений в отрасли. При этом особенностью этих работ является единство процесса возведения объектов при структурном обобщении организаций. В связи с этим строительные организации заинтересованы в принятии проектировщиками эффективных решений, способствующих повышению ОТН в проектировании и строительстве.

Под ОТН понимается способность технологических, организационных, управлеченческих и экономических решений обеспечивать достижение заданного результата строительного производства в условиях случайных возмущений, присущих строительству как сложной стохастической системе. Значение показателя ОТН во многих методиках представляет собой оценку вероятности выполнения проекта в установленный срок. Практика показывает, что при разработке принципов и методов ОТН строительства нельзя забывать о том, что надежность возведения объектов тесно связана с таким понятием, как организационно-технологическое проектирование, решение проблемы которого является основным условием повышения эффективности строительного производства. Ос-

© Анферов В.Н., Недавний О.И., Базилевич С.В., Кузнецов С.М., 2013

новной показатель в организационно-технологическом проектировании — обеспечение строительного производства трудовыми, финансовыми, материальными ресурсами; строительными машинами и механизмами и др.

Для анализа надежности организационно-технологического проектирования целесообразно использовать метод статистических испытаний. Он основан на календарном плане, являющемся главным документом проекта организации строительства (ПОС) и проекта производства работ (ППР). Календарный план строится с учетом требований и ограничений организации, технологии и экономики строительного производства, устанавливающих четкую последовательность выполнения работ на пространственных участках объекта. При этом далеко не полностью учитывается вариантность осуществления работ, их взаимосвязи в процессе возведения объектов, не определяется целесообразный порядок перераспределения ресурсов между участниками и работами, обычно необходимый в процессе производства. Надежность организационно-технологического проектирования оценивается вероятностью достижения основного результата всего строительного процесса, т.е. ввода объекта в действие, причем с заданными показателями качества и в установленные сроки. В основу разработки принципов ОТН проектирования, в первую очередь, должен быть заложен вероятностно-статистический подход. Детерминированные методы определяют поведение модели исходя из задаваемых начальных условий. Отсутствие учета вероятности строительного производства может привести к недостаточной адекватности и надежности большинства организационно-технологических, экономических и управлеченческих решений, принимаемых на основе имеющихся в настоящее время моделей.

Для определения ОТН проектирования воспользуемся методами теории надежности, связанной с анализом распределения совокупностей случайных величин — надежностей отдельных элементов комплекса. Методика включает сетевую модель, основанную на матрице коэффициентов совмещения, использующую сетевой метод расчета параметров с автоматическим построением топологии сети. Работы разбиваются на участки не по времени, а по объемам. Это более точно отражает зависимости между смежными работами и не требует предварительных расчетов продолжительности, а также делает модель чувствительной к ограничениям по ресурсам и позволяет в некоторых случаях уйти от жесткой сетевой модели.

Сетевая модель, описывающая данный строительный процесс, имеет две группы характеристик. Первая группа определяет топологию сетевой модели, вторая — распределение ресурсов в течение времени выполнения производственного процесса. Вторая группа параметров является объектом оптимизации плана производства работ в зависимости от времени их выполнения. В общем виде задача оптимизации сетевого графика может быть сформулирована как нахождение таких функций распределения ресурсов, которые обеспечивали бы требуемое качество получаемого плана производства работ и тем самым повышение показателя организационно-технологической надежности проектирования.

Для определения показателя ОТН проектирования и степени риска участников инвестиционного процесса проведены исследования на при-

мере генподрядных строительных организаций г. Омска (базовая организация ОАО «Омскстрой»). При планировании и реализации годовой производственной программы строительной организации использовались методы и модели сетевого планирования и управления строительством. В качестве основного принимался поточный метод, с помощью которого обеспечивается планомерная, непрерывная и ритмичная работа исполнителей, ритмичный ввод строительной продукции [1–4].

Для ОАО «Омскстрой» составлялись сетевые графики на возведение каждого объекта годовой программы с учетом принципов поточного выполнения всей программы. В качестве примера рассматривался сетевой график строительства 7–9-этажных жилых домов. В качестве номенклатуры работ принимался унифицированный перечень строительно-монтажных работ, принятый в практике жилищного строительства.

Определение показателя ОТН проектирования и степени риска участников инвестиционного цикла в процессе реализации проекта выполняется в следующей последовательности:

1. Определяется перечень видов работ с указанием их кода, фактической продолжительности, резерва времени, трудоемкости, устанавливаются оптимистические и пессимистические оценки работ.
2. Строится сетевой график.
3. Рассчитываются коэффициенты напряженности по каждому отдельному пути сетевой модели.
4. Рассчитывается интегральный коэффициент напряженности по сетевому графику в целом через весовой коэффициент. В качестве весового коэффициента принимается трудоемкость выполнения работ.
5. Определяется вероятность выполнения работ в договорный срок по методу А.А. Гусакова, основанному на учете только работ критического пути, и степень риска участников инвестиционного цикла

$$K_{nij} = \frac{t[L_{\max}] - t'[L_{kp}]}{t[L_{kp}] - t'[L_{kp}]}, \quad (1)$$

где $t'[L_{kp}]$ — продолжительность пути $t[L_{\max}]$, совпадающего с критическим;

$t[L_{kp}]$ — продолжительность критического пути;

$t[L_{\max}]$ — продолжительность максимального пути, проходящего через данную работу.

$$\sum K_{\text{взб}} = \frac{K_1 \cdot T_1}{\sum T_i} + \frac{K_2 \cdot T_2}{\sum T_i} + \dots + \frac{K_i \cdot T_i}{\sum T_i}, \quad (2)$$

где K_i — коэффициент надежности i -й работы;

T_i — трудоемкость i -й работы;

$\sum T_i$ — общая трудоемкость.

Полученные расчетные данные говорят о том, что выполнить работы в договорный срок невозможно, так как $\sum K_{\text{взб}}$ должен находиться в пределах от 0,35 до 0,5 (данные исследования И.М. Разумова).

Для расчета показателя организационно-технологической надежности использован метод, основанный на учете только работ критического пути, и закон усеченного нормального распределения времени выполнения работ, т.к. в качестве расчетного принимается только пессимистиче-

ская времененная оценка P_{kin} , т.е. время выполнения данной работы при крайне неудачном стечении обстоятельств, которая определяется как

$$P_{kin} = \frac{t_{\phi in}}{t_{n in}}, \quad (3)$$

где i, n — код работы, лежащей на критическом пути;

$t_{\phi in}$ — фактическое время выполнения работ (в днях);

$t_{n in}$ — пессимистическая оценка времени выполнения работ (в днях).

Для принятых объектов жилых домов расчетные значения составили

$$P_{1-6} = \frac{101}{110} = 0,92; \quad P_{6-7} = \frac{32}{42} = 0,76; \quad P_{7-8} = \frac{105}{112} = 0,94.$$

Найдем вероятность выполнения строительно-монтажных работ в заданный срок, характеризующую надежность организационно-технологического проектирования:

$$\begin{aligned} P_{kin} &= P_{k1-6} \cdot P_{k6-7} \cdot P_{k7-8}, \\ P &= 0,92 \cdot 0,76 \cdot 0,94 = 0,66. \end{aligned} \quad (4)$$

Исходя из данного расчета можно сделать вывод, что вероятность выполнения работ в договорный срок или организационно-технологическая надежность составляет 66 %.

По мнению авторов, вероятность выполнения строительно-монтажных работ в заданный срок должна определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{kin} &= \frac{t_{\phi in}}{t_{\phi}} P_{k1-6} \cdot \frac{t_{\phi in}}{t_{\phi}} P_{k6-7} \cdot \frac{t_{\phi in}}{t_{\phi}} P_{k7-8}, \\ P_{kin} &= \frac{101}{238} 0,92 \cdot \frac{32}{238} 0,76 \cdot \frac{105}{238} 0,94 = 0,39 \cdot 0,102 \cdot 0,415. \end{aligned} \quad (5)$$

На основании проведенных исследований разработана модель определения оптимальной надежности организационно-технологического проектирования различных типов жилых домов по критерию достижения максимальной прибыли подрядной строительной организации. Сущностью модели является установление границ ОТН, при которых прибыль может получать плюсовые, минусовые и нулевые значения в зависимости от снижения расчетного уровня надежности с учетом баланса затрат на восстановление надежности и оплаты штрафов при их невыполнении.

Оценка ОТН дает возможность обосновать сформированные календарные планы строительства объектов не только с точки зрения качества организационно-технологических характеристик, но и с точки зрения риска их достижения. При возведении объектов немаловажное значение имеет рациональное распределение строительных машин в период всего производственного цикла. От эффективного использования машин в значительной степени зависит организационно-технологическая надежность строительства объектов.

Критерием оценки ОТН работы строительных машин может быть любой показатель, находящийся в выборке, в том числе производительность, продолжительность работ, энергоемкость, стоимость единицы продукции, прибыль и т.д. Основным показателем для оценки эффективно-

сти работы комплексов машин предлагается считать себестоимость производства работ.

Одним из основных факторов ОТН работы строительных машин является уровень использования их по времени. Для оценки ОТН работы строительных машин в СГУПСе создана база данных по результатам натурных испытаний экскаваторов, земснарядов, бульдозеров и др. [4]. Для бульдозеров, представленных в базе данных, показатели их работы приведены в табл. 1. Для доказательства обоснованности значений базы данных по результатам натурных испытаний проводились два этапа верификации:

первый этап — *логическая верификация*, при которой по замечаниям наблюдателя из рядов исключаются значения, не относящиеся к нормируемому процессу;

второй этап — *математическая*, при которой методами математической статистики определяют правомерность отклонений.

Таблица 1
Технические и экономические показатели работы бульдозеров

Показатель	Обозначение	Поле
Марка машины	Марка	Marka
Заводской номер	N_3	N_z
Календарный фонд времени, ч	T_ϕ	T_f
Время работы, ч	T_p	T_r
Время технологических перерывов всего, ч	T_π	T_p
Время технологических перерывов на планово-предупредительные ремонты, ч	$T_{\pi\phi}$	T_{pf}
Время непланируемых простоев, ч	T_{np}	T_{np}
Количество отказов всего, шт.	K_o	K_o
Количество отказов механических частей, шт.	K_{om}	K_{om}
Количество отказов электрических частей, шт.	K_{oe}	K_{oe}
Количество отказов системы управления, шт.	K_{cy}	K_{su}
Продолжительность отказов всего, ч	T_o	T_o
Продолжительность отказов механических частей, ч	T_{om}	T_{om}
Продолжительность отказов электрических частей, ч	T_{oe}	T_{oe}
Продолжительность отказов системы управления, ч	T_{cy}	T_{su}
Простои из-за отсутствия запасных частей, ч	T_{oz}	T_{oz}
Простои из-за неподготовленности рабочего места, ч	$T_{\phi p}$	T_{fr}
Простои из-за климатических условий, ч	T_{kl}	T_{kl}
Простои из-за других причин, ч	T_{dp}	T_{dp}
Коэффициент использования по времени	K_v	K_v
Коэффициент готовности	K_g	K_g
Коэффициент технического использования	K_{ti}	K_{ti}
Коэффициент сохранения эффективности	K_{se}	K_{se}
Время наработки на отказ, ч	T_n	T_n

Накопленная в базе данных информация об использовании бульдозеров по месяцам и годам позволила построить выборки (табл. 2) и с помощью шагового регрессионного метода установить зависимости коэффициента использования бульдозеров по времени от коэффициентов готовности, коэффициентов технического использования, коэффициентов сохранения эффективности и времени наработки на отказ (табл. 3).

Таблица 2

Характеристика выборки коэффициентов готовности, технического использования, сохранения эффективности и времени наработки на отказ бульдозеров

Показатель	Величина			
Фактор	K_g	$K_{ти}$	$K_{сэ}$	T_h
Количество опытов, шт.	140	140	140	140
Количество связей, шт.	3	3	3	3
Уровень значимости	0,05	0,05	0,05	0,05
Минимальное значение фактора	0,948	0,407	0,492	761,0
Максимальное значение фактора	0,995	0,935	1,0	1128,0
Выборочное среднее значение фактора	0,9702	0,6157	0,7143	929,34
Среднее линейное отклонение фактора	0,00786	0,08630	0,10207	47,586
Среднее квадратическое отклонение фактора	0,00975	0,10750	0,12541	60,033
Стандартное отклонение фактора	0,00978	0,10788	0,12586	60,249
Средняя квадратическая ошибка фактора	0,00083	0,00912	0,01064	5,092
Ошибка в % от среднего значения фактора	0,08522	1,48087	1,48922	0,5479
Эмпирическая дисперсия выборки	0,00010	0,01164	0,01584	3629,9
Вариации отклонения от среднего значения	0,00006	0,00745	0,01042	2264,4
Риск отклонения от среднего значения	0,00786	0,08630	0,10207	47,586
Коэффициент вариации	0,01005	0,17459	0,17558	0,06460
Вычисленное значение критерия Пирсона	1,45382	10,09241	14,15744	1,18817
Табличное значение критерия Пирсона	7,86	7,86	7,86	7,86
Количество интервалов	8	8	8	8

Таблица 3

Основные характеристики моделей коэффициентов использования по времени бульдозера

Показатель	$K_B = -2,58 + 3,5136 K_g$	$K_B = -0,1187 + 1,0897 K_{ти}$	$K_B = 0,6808 - 0,0259 K_{сэ}$	$K_B = -2,58 + 0,00472 T_h$
Доля объясненной вариации, %	80,60	99,02	0,11	80,60
Коэффициент множественной корреляции	0,8978	0,9951	0,0327	0,8978
Средний отклик	0,66	0,66	0,66	0,66
Стандартная ошибка в % от среднего отклика	4,74	1,07	10,75	4,74
Стандартная ошибка	0,0313	0,0070	0,0709	0,313
Общий F-критерий регрессии	3614,1	87855,9	0,9	3613,5
Табличное значение общего F-критерия	3,83	3,83	3,83	3,83

В табл. 3 также приведены основные характеристики моделей коэффициентов использования по времени.

На рис. 1, 2 показаны надежность коэффициента готовности и плотность распределения вероятности коэффициента готовности бульдозера, полученные по результатам обработки натурных испытаний работы бульдозеров при ежемесячном анализе [3].

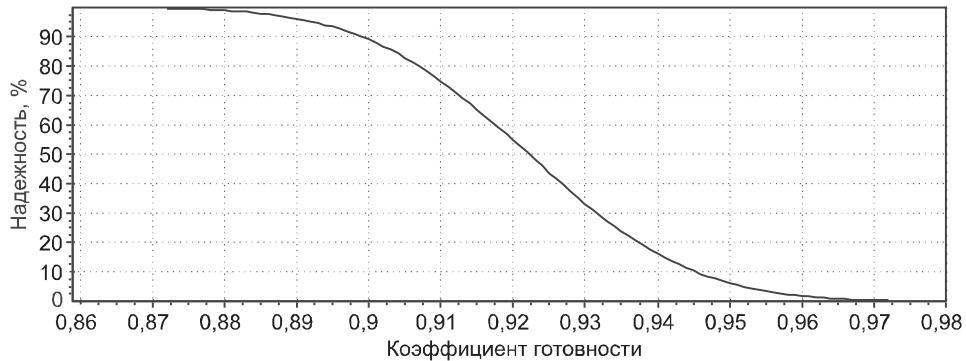


Рис. 1. Надежность коэффициентов готовности бульдозера

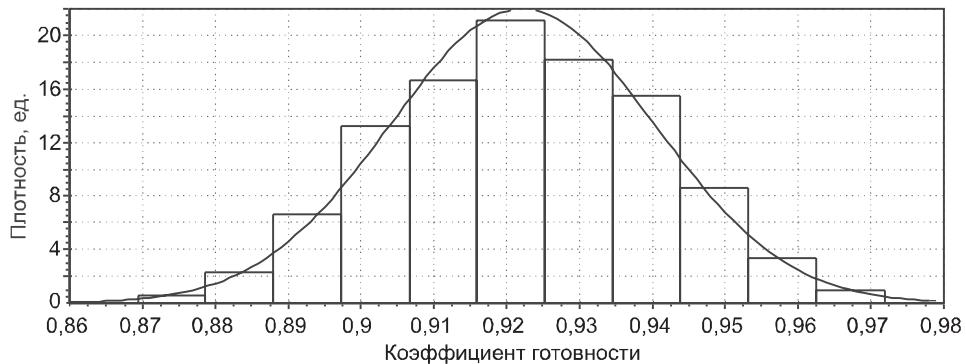


Рис. 2. Плотность распределения вероятности коэффициентов готовности бульдозера

Коэффициент оперативной готовности ($K_{\text{ор}}$) показывает вероятность того, что поворотный бункер окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение бульдозера по назначению не предусматривается, и начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность изделия, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа изделия в течение заданного интервала времени. Вычислим значение коэффициента оперативной готовности $K_{\text{ор}}$

$$K_{\text{ор}} = K_{\text{г}} P, \quad (6)$$

где $K_{\text{г}}$ — коэффициент готовности;

P — вероятность безотказной работы бульдозера в течение заданного интервала времени.

Авторами предлагается вероятность безотказной работы определять по формуле

$$P = 1 - \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} \int_0^{T_0 + T_1} e^{-\frac{(T_h - \bar{T}_h)^2}{2\sigma_h^2}} dT_h, \quad (7)$$

где T_h — время наработки на отказ;

\bar{T}_h — среднее время наработки на отказ;

σ_h — среднее квадратическое отклонение времени наработки на отказ;

T_0 — время с начала наработки на отказ;

T_1 — планируемый период времени безотказной работы бульдозера.

Значения коэффициента оперативной готовности используются при выполнении работ по оценке эффективности бульдозера, а также при оценке расчетных значений надежности по полученным из эксплуатации результатам работы бульдозера.

На рис. 3, 4 показаны надежность работы бульдозера и плотность распределения вероятности времени наработки бульдозера на отказ, полученные по результатам обработки натурных испытаний их работы.

По зависимости (см. рис. 3) можно оценить надежность работы бульдозера в заданном диапазоне от T_0 до $T_0 + T_1$. Например, при $T_0 = 400$ ч и $T_1 = 279$ ч надежность работы бульдозера равна приблизительно 70 %.

Коэффициент технического использования ($K_{ти}$) характеризует отношение математического ожидания суммарного времени пребывания бульдозера в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания бульдо-

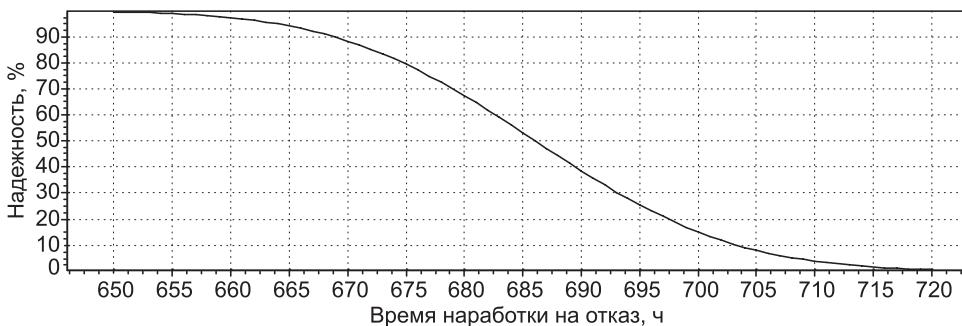


Рис. 3. Надежность работы бульдозера

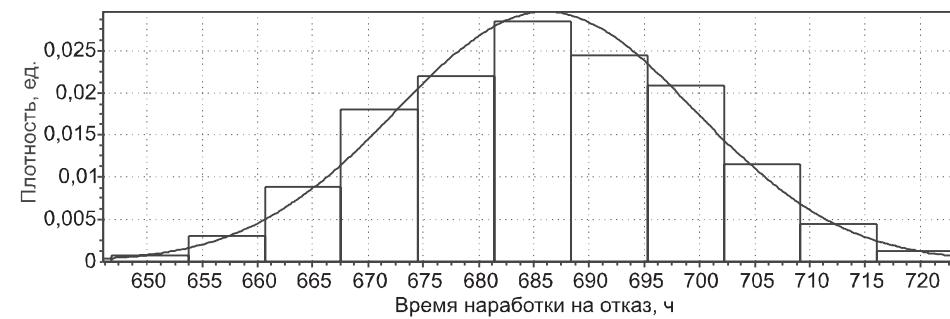


Рис. 4. Плотность распределения вероятности времени наработки бульдозера на отказ

зера в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Коэффициент технического использования обычно оценивается за длительный период эксплуатации (от начала эксплуатации до капитального ремонта, между капитальными ремонтами, за весь период эксплуатации):

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_p}{T_p + T_{\text{рем}}}, \quad (8)$$

где T_p — суммарное время пребывания бульдозера в работоспособном состоянии за некоторый длительный период эксплуатации;

$T_{\text{рем}}$ — суммарное время ремонтов и технического обслуживания за этот же период эксплуатации.

Коэффициент технического использования можно рассматривать как вероятность того, что в данный, произвольно взятый момент времени, объект работоспособен, а не находится в ремонте.

Авторами предлагается формула для расчета коэффициента технического использования

$$K_{\text{ти}} = \frac{K_b}{K_r}, \quad (9)$$

где K_b — коэффициент использования по времени;

K_r — коэффициент готовности.

На рис. 5, 6 представлены надежность коэффициента технического использования бульдозера и плотность распределения вероятности коэффициента технического использования бульдозера.

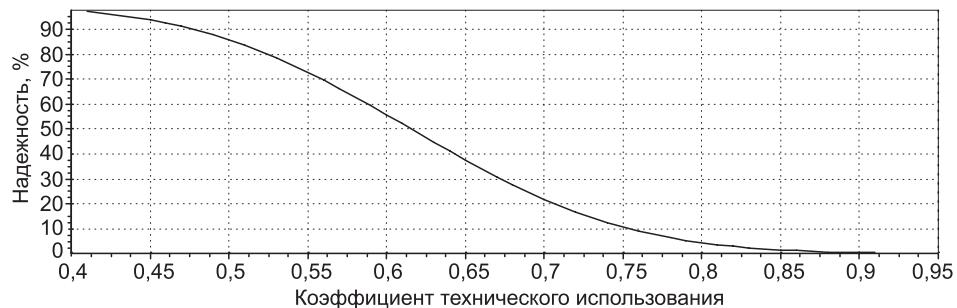


Рис. 5. Надежность коэффициентов технического использования бульдозера

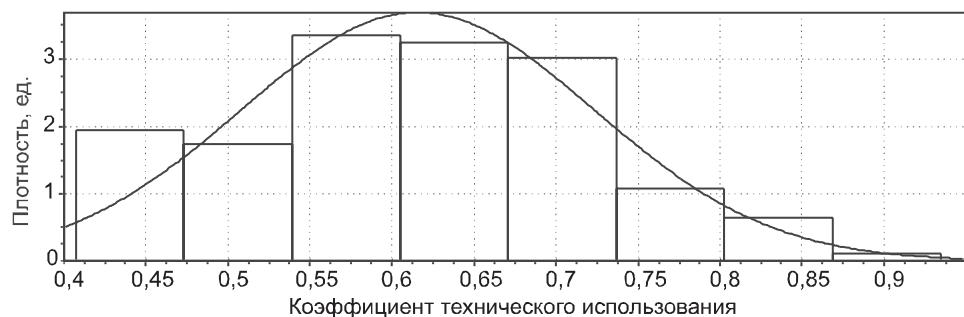


Рис. 6. Плотность распределения вероятности коэффициентов технического использования бульдозера

Коэффициент сохранения эффективности ($K_{\text{с9}}$) показывает отношение значения показателя эффективности использования бульдозера по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы бульдозера в течение того же периода не возникают.

Вычислим коэффициент сохранения эффективности

$$K_{\text{с9}} = \frac{1}{\Theta_{\text{н}}} \sum_{i=1}^n \Theta_i P_i, \quad (10)$$

где Θ_i — эффективность бульдозера в i -м работоспособном состоянии; P_i — вероятность пребывания объекта в i -м работоспособном состоянии; $\Theta_{\text{н}} = \max(\Theta_i)$ — номинальное значение показателя эффективности объекта, определенное при условии отсутствия отказов; n — количество работоспособных состояний объекта.

Коэффициент сохранения эффективности, вычисленный по формуле (10), показывает отклонение расчетных параметров за конкретный промежуток времени от номинального значения.

По мнению авторов, коэффициент сохранения эффективности бульдозера можно выразить формулой

$$K_{\text{с9}} = \frac{1}{n K_{\text{в}}^{\text{max}}} \sum_{i=1}^n K_{\text{в}}, \quad (11)$$

где $K_{\text{в}}$ — коэффициент использования по времени по месяцам;

n — количество рассматриваемых месяцев;

$K_{\text{в}}^{\text{max}}$ — максимальное значение коэффициента использования по времени.

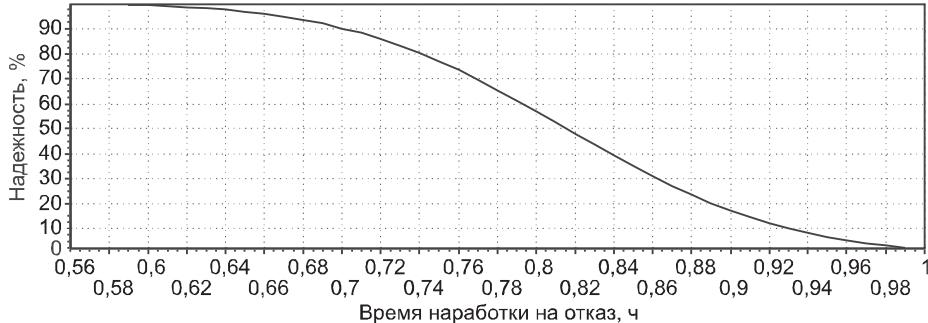


Рис. 7. Надежность коэффициентов сохранения эффективности бульдозера

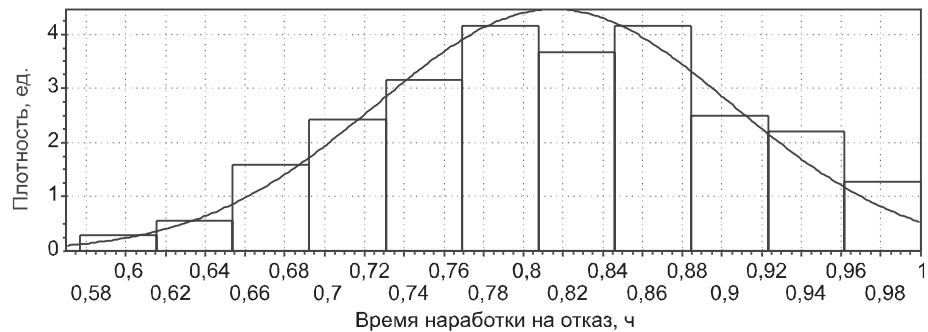


Рис. 8. Плотность распределения вероятности коэффициентов сохранения эффективности бульдозера

Например, коэффициент сохранения эффективности работы бульдозера ДЗ-110В за 10 лет работы — $K_{\text{с9}} = \frac{1}{80 \cdot 0,7985} \cdot 47,1107 = 0,7375$ (73,75 %).

Коэффициент сохранения эффективности, вычисленный по формуле (11), показывает эффективность использования бульдозера за конкретный промежуток времени.

На рис. 7, 8 представлены надежность коэффициента сохранения эффективности бульдозера и плотность распределения вероятности коэффициента сохранения эффективности бульдозера.

Для всех моделей, приведенных в табл. 3, построены доверительные интервалы с уровнем риска 5 % (табл. 4). На рис. 9 приведен доверительный интервал моделей коэффициентов использования по времени в зависимости от коэффициентов готовности бульдозеров.

Таблица 4
Математические модели и их доверительные интервалы

Модель	Доверительный интервал с уровнем риска 5 %
$K_B = -2,58 + 3,5136K_r$	$K_B \pm 0,0566\sqrt{1,002 + 4,733 \cdot (K_r - 0,922)}$
$K_B = -0,1187 + 1,0897K_{th}$	$K_B \pm 0,0139\sqrt{1,0014 + 0,3045 \cdot (K_{th} - 0,713)}$
$K_B = 0,6808 + 0,0259K_{c9}$	$K_B \pm 0,1398\sqrt{1,0012 + 0,1526 \cdot (K_{c9} - 0,814)}$
$K_B = -2,58 + 0,00472T_h$	$K_B \pm 0,059\sqrt{1,0024 + 0,00001 \cdot (T_h - 686,2)}$

Предложенные в [3] для оценки надежности гидротранспортных систем комплексные показатели надежности не дают полной информации о работе строительных машин на конкретных объектах, так как они не учитывают технологию и организацию строительства в конкретных производственных условиях. На наш взгляд, целесообразно дополнить рассматриваемые комплексные показатели надежности показателем организационно-технологической надежности.

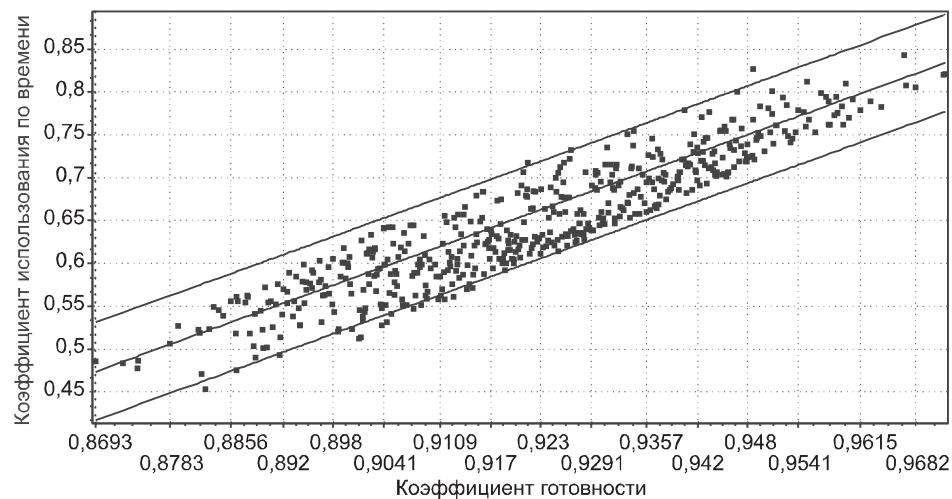


Рис. 9. Доверительный интервал моделей коэффициентов использования по времени в зависимости от коэффициентов готовности бульдозеров

Выводы. 1. При заключении договоров подряда необходимо распределение риска между участниками инвестиционного проекта, чтобы была возможность диверсифицировать ущерб в соответствии с возможностями организаций по управлению риском и финансовой компенсации последствий их проявления. Распределение риска осуществляется на стадии согласования взаимоотношений и закрепляется в договоре.

2. При решении задачи по оптимизации механизированных процессов объектов может быть использован предлагаемый подход, при котором ОТН определяется алгоритмами поиска вероятностных отклонений параметров технологических процессов в комплексной структуре строительных машин и механизмов.

3. Использование приведенного подхода позволяет повысить достоверность нормативной базы при разработке проектных и плановых решений строительства объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базилевич, С.В. Повысим надежность строительства объектов [Текст] / С.В. Базилевич, И.Л. Чулкова, С.М. Кузнецов, Н.А. Сироткин // Механизация строительства. — 2009. — № 6. — С. 12–14.
2. Кузнецов, С.М. Оценка надежности организационно-технологических решений в строительстве [Текст] / С.М. Кузнецов, И.А. Маслов, А.Д. Суворов, С.Н. Ячменьков // Транспортное строительство. — 2007. — № 1. — С. 26–27.
3. Сироткин, Н.А. Оптимизация продолжительности строительства объектов [Текст] / Н.А. Сироткин, С.М. Кузнецов, В.П. Перцев // Транспортное строительство. — 2007. — № 5. — С. 16–17.
4. Кузнецов, С.М. Оценка технической надежности работы гидротранспортных систем [Текст] / С.М. Кузнецов // Экономика ж. д. — 2013. — № 8.

АНФЕРОВ Валерий Николаевич, д-р техн. наук, проф.

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
НЕДАВНИЙ Олег Иванович, д-р техн. наук, проф.*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет
БАЗИЛЕВИЧ Светлана Викторовна, канд. техн. наук, доц.*

*Омский государственный университет путей сообщения
КУЗНЕЦОВ Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доц.
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

Получено после доработки 25.07.13

Anferov Valeriy Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Siberian State University of Means of Communication, Novosibirsk, Russia

Nedavniy Oleg Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Bazilevich Svetlana Viktorovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Omsk State University of Means of Communication, Russia

Kuznetsov Sergey Mihaylovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State University of Means of Communication, Novosibirsk, Russia

INCREASE OF ORGANIZATIONAL-TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF ERECTION OF OBJECTS

On the basis of the network schedule of building of a seven-story apartment house at a design stage organizational-technological reliability and degree of risk of participants of the investment project of an apartment house are considered.

Key words: organizational-technological reliability, the investment building project, building cars, imitating modeling.

REFERENCES

1. Bazilevich, S.V. Will reliability of building of objects [Text] / S.V. Bazilevich, I.L. Chulkova, S.M. Kuznetsov, N.A. Sirotkin // Building mechanization. — 2009. — N 6. — P. 12–14.
 2. Kuznetsov, S.M. Estimation's smiths of reliability of organizational-technological decisions in building [Text] / S.M. Kuznetsov, I.A. Maslov, A.D. Suvorov, S.N. Jachmenkov // Transport building. — 2007. — N 1. — P. 26–27.
 3. Sirotkin, N.A. Optimization of duration of building of objects [Text] / N.A. Sirotkin, S.M. Kuznetsov, V.P. Pertsev // Transport building. — 2007. — N 5.— P. 16–17.
 4. Kuznetsov, S.M. Assessment of technical reliability of work of hydrotransport systems [Text] / S.M. Kuznetsov // Economy of the railways. — 2013. — N 8.
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.98:621.928.93

М.И. ШИЛЯЕВ, В.В. ПЕНЯВСКИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ УНИВЕРСАЛЬНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ИНЕРЦИОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

В работе проведено экспериментальное обоснование метода определения постоянных a и n для банка данных универсального метода расчета (УМР) инерционных пылеуловителей по параметрам логарифмически нормального распределения частиц пыли по размерам на входе и выходе из аппаратов. Показано хорошее согласование данных, полученных этим методом, с данными более ранних работ.

Ключевые слова: универсальный метод расчета, инерционные пылеуловители, логарифмически нормальный закон распределения частиц пылей по размерам (ЛНР), фракционный проскок.

В основу разработки универсального метода расчета (УМР) положено представление фракционного коэффициента проскока K_δ в виде обобщенной экспоненциальной функции от числа Стокса Stk:

$$K_\delta = \frac{C_{\delta_{\text{вых}}}}{C_{\delta_{\text{вх}}}} = e^{-aStk^n}, \quad (1)$$

где $C_{\delta_{\text{вых}}}$ и $C_{\delta_{\text{вх}}}$ — выходная и входная концентрация частиц пыли диаметром δ в аппарате;

a и n — постоянные, определяющие пылеулавливающие качества аппарата, $Stk = \rho_m \delta^2 V / (18\mu d)$;

ρ_m — плотность частиц пыли;

μ — динамическая вязкость очищаемого газа;

V, d — характерные скорость и линейный размер инерционного улавливания пыли аппаратом.

Параметры a, n, V, d занесены в банк данных (БД) универсального метода. Полный коэффициент проскока K_Σ одиночного аппарата определяется как

$$K_\Sigma = 1 - \eta_\Sigma = \int_0^\infty K_\delta g(\delta) d\delta, \quad (2)$$

где $g(\delta)$ — нормированная весовая дифференциальная функция распределения частиц пыли по размерам, подлежащей улавливанию аппаратом;

η_Σ — полная эффективность улавливания пыли аппаратом.

© Шиляев М.И., Пенявский В.В., 2013

Принято, что подлежащие улавливанию пыли подчиняются логарифмически нормальному закону распределения частиц по размерам (ЛНР):

$$g(\delta)d\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lg\sigma} e^{-\frac{\lg^2\left(\frac{\delta}{\delta_{50}}\right)}{2\lg^2\sigma}} d\lg\delta, \quad (3)$$

где δ_{50} и σ — масс-медианный размер и среднелогарифмическое квадратичное отклонение ЛНР исходной, подлежащей улавливанию пыли.

Интеграл (2) при условии, что $g(\delta)$ подчиняется ЛНР, был рассчитан в возможных пределах изменения параметров a_0 , n_0 , V_0 , d_0 , ρ_m , μ , δ_{50} , σ для различных типов пылеуловителей и была построена универсальная номограмма (рис. 1) в виде двухпараметрической зависимости полного коэффициента проскока от σ^n и $\lg(aStk_{50}^n)$ [1]:

$$K_\Sigma = f(\sigma^n, \lg\alpha), \quad \alpha = aStk_{50}^n, \quad (4)$$

где $Stk_{50} = \rho_m \delta_{50}^2 V / (18\mu d)$.

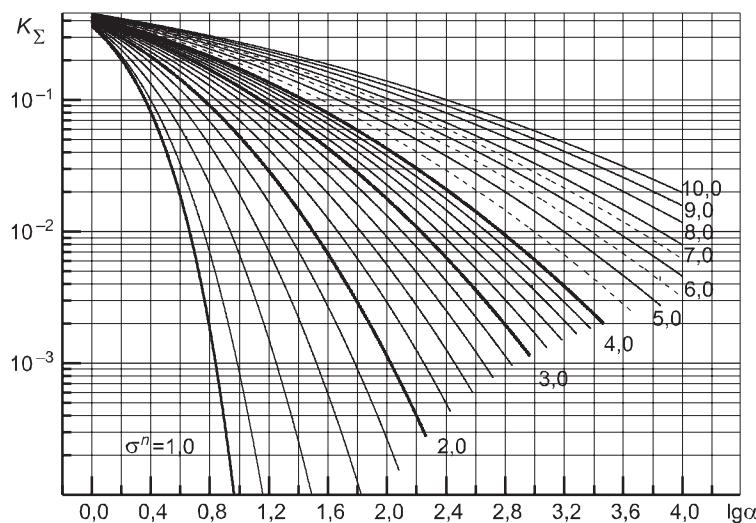


Рис. 1. Универсальная номограмма для расчета инерционных пылеуловителей

Способ определения параметров a и n , использованный в [1], для конкретного типа инерционных пылеуловителей, требует проведения трудоемкой серии опытов по нахождению K_δ в соответствии с формулой (1) для различных геометрий аппаратов, различных скоростных режимов, различных дисперсных составов и различных физических свойств пыли. Так, фракционный коэффициент проскока как сама величина, связанная с определением отношения концентрации частиц пыли фракции δ на выходе к концентрации частиц пыли той же фракции δ на входе в аппарат, находился для каждой выделенной для опыта фракции δ пыли с соответствующей ее концентрацией на входе отдельным экспериментом. Для полного обобщения K_δ в функции числа Stk требуется провести эксперименты для каждой фракции пыли при других физических свойствах пыли, других режимах и геометрических параметрах аппаратов.

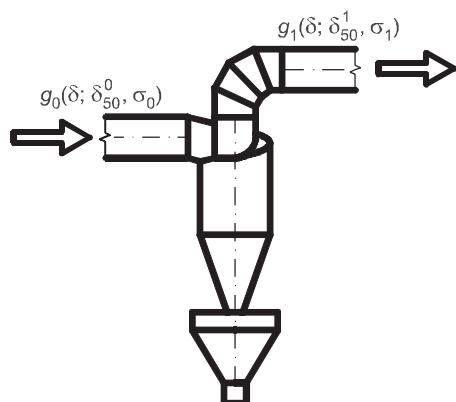


Рис. 2. Распределения пыли, поступающей на очистку в аппарат и на выходе из него

нем основной части исходной пыли фракционный состав, описываемый функцией $g_1(\delta)$. Примем, что оба эти распределения подчиняются ЛНР с параметрами σ_0 , $\delta_{50,0}$ и σ_1 , $\delta_{50,1}$ соответственно для $g_0(\delta)$ и $g_1(\delta)$. Постоянные a и n определяются через параметры функций распределения частиц пыли на входе и выходе из аппарата (σ_0 , $\delta_{50,0}$; σ_1 , $\delta_{50,1}$) по формулам [2]:

$$n = 2 \ln \beta / \ln \left(\frac{\delta_{50,1}}{\delta_{50,0}} \right), \quad \beta = \frac{\lg \sigma_1}{\lg \sigma_0}; \quad (5)$$

$$a = \ln \left(\frac{\delta_{50,0}}{\delta_{50,1}} \right) / \left(2n \ln^2 \sigma_1 \text{Stk}_{50,0}^n \right), \quad \text{Stk}_{50,0} = \frac{\rho_m \delta_{50,0}^2 V}{18 \mu d}. \quad (6)$$

С целью получения достоверных значений по этим постоянным необходимо проводить достаточную серию опытов согласно теоретическим положениям постановки эксперимента и обработки опытных данных на разных режимах работы аппарата и различных пылях.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась лабораторная установка (рис. 3), собранная на кафедре «Отопление и

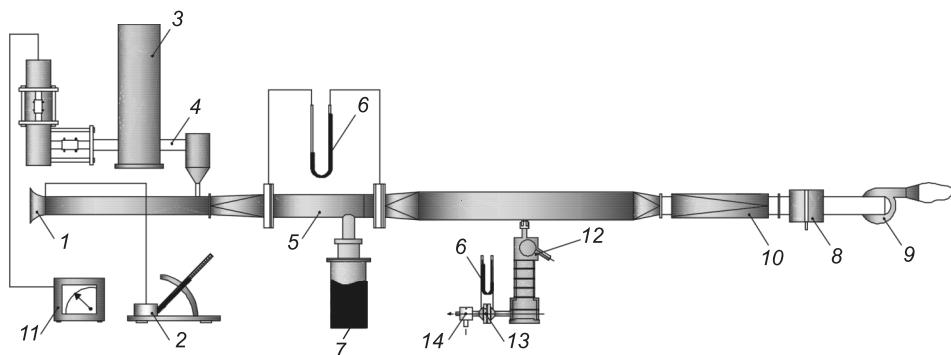


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

1 — расходомерное сопло; 2 — наклонный микроманометр ММН-240; 3 — пылевой бункер; 4 — шnekовый дозатор; 5 — прямоточный циклон; 6 — U-образные манометры; 7 — пылеприемный бункер; 8 — шиберная заслонка; 9 — тягодутьевая установка; 10 — рукавный (текстильный) фильтр; 11 — ЛАТР; 12 — импактор; 13 — измерительная диафрагма; 14 — шиберная заслонка

В [2] предлагается способ определения постоянных a и n для новых типов пылеуловителей, основывающийся на анализе дисперсных составов пыли на входе и на выходе при условии их подчинения ЛНР в результате проведения одного эксперимента.

Для определения констант a и n нового аппарата в выражении (1) и таким образом пополнения банка данных предлагается следующая методика. Пусть в аппарат поступает пыль с исходным распределением $g_0(\delta)$ (рис. 2). За счет осаждения в

нем основной части исходной пыли на выходе пыль будет иметь другой фракционный состав, описываемый функцией $g_1(\delta)$. Примем, что оба эти распределения подчиняются ЛНР с параметрами σ_0 , $\delta_{50,0}$ и σ_1 , $\delta_{50,1}$ соответственно для $g_0(\delta)$ и $g_1(\delta)$. Постоянные a и n определяются через параметры функций распределения частиц пыли на входе и выходе из аппарата (σ_0 , $\delta_{50,0}$; σ_1 , $\delta_{50,1}$) по формулам [2]:

$$n = 2 \ln \beta / \ln \left(\frac{\delta_{50,1}}{\delta_{50,0}} \right), \quad \beta = \frac{\lg \sigma_1}{\lg \sigma_0}; \quad (5)$$

$$a = \ln \left(\frac{\delta_{50,0}}{\delta_{50,1}} \right) / \left(2n \ln^2 \sigma_1 \text{Stk}_{50,0}^n \right), \quad \text{Stk}_{50,0} = \frac{\rho_m \delta_{50,0}^2 V}{18 \mu d}. \quad (6)$$

С целью получения достоверных значений по этим постоянным необходимо проводить достаточную серию опытов согласно теоретическим положениям постановки эксперимента и обработки опытных данных на разных режимах работы аппарата и различных пылях.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась лабораторная установка (рис. 3), собранная на кафедре «Отопление и

вентиляция» ТГАСУ. Экспериментальные исследования проводились на прямоточном циклоне (ПЦ) диаметром $d = 0,046$ м. Схема компоновки оборудования в лабораторный стенд представлена на рис. 3.

Для проведения экспериментальных исследований по определению дисперсного состава пыли использовалось семь различных порошковых материалов: шлифовочная металлическая пыль, полученная отбором от заточных и шлифовальных станков на предприятии ООО «Томскинstrument»; древесная пыль, полученная отбором от шлифовальных станков завода ДСП ООО «Томлесдрев»; два образца модельной пыли, полученных специально для проведения опытов помолом кварцевого песка в шаровой мельнице при различном времени помола; измельченный каменный уголь Кузнецкого бассейна; измельченный кемеровский уголь, измельченный сланец.

Параметры дисперсного состава используемых в опытах нерастворимых образцов исходных пылей были определены методом жидкостной седиментации [3], для древесной шлифпыли применялся метод трех прямоточных циклонов [4].

Результаты обработки данных дисперсного анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1
Параметры порошковых материалов, использованных при проведении экспериментов

Экспериментальный образец	Плотность ρ_m , кг/м ³	Медианный размер δ_{50} , мкм	Дисперсия σ
Металлическая шлифпыль	7850	35	2,25
Модельный кварцевый порошок № 1	2650	16,45	2,14
Модельный кварцевый порошок № 2	2650	25,54	2,18
Измельченный каменный уголь Кузнецкого бассейна	2200	39,28	2,65
Измельченный кемеровский уголь	2200	22,2	2,6
Измельченный сланец	2400	55,2	3,5
Древесная шлифпыль ООО «Томлесдрев»	600	98	1,95

Для оценки фракционной эффективности пылеуловителей, а также измерения и расчета дисперсного состава пыли непосредственно в потоке запыленных газов после прямоточного циклона применялся каскадный импактор¹.

С целью получения наиболее достоверных значений эксперименты проводились для трех режимов работы данного типа аппарата, осуществляемых при минимальной, средней и максимальной характерной скорости.

Исходные данные для проведения измерения представлены в табл. 2.

По полученным данным (величинам осадка Δm_i и характерному размеру частиц) определялись значения прохода D , представляющего собой долю частиц в распределении, размер которых меньше соответствующего размера δ , в вероятностном масштабе и эффективный размер частиц δ_e .

¹ Импактор высокого давления ПВД-2. Инструкция по эксплуатации 1158.240.00.00.000 ИЭ. Новосибирск. СКБ Энергохиммаш, 1982. 42 с.

Таблица 2
Экспериментальные условия при определении фракционного состава металлической шлифпильи

Параметры	μ , Па · с	ρ , кг/м ³	P , мм сп.ст.	$t_{газ}$, °C	Q , л/мин		
					для скорости, м/с		
					6	9	12
Условия измерения	$1,821 \cdot 10^{-5}$	1,176	745	18	19,7	20,1	20,5
Паспортные данные характеристик импактора	$1,83 \cdot 10^{-5}$	1,2	760	20	20		

Значения прохода D в общем случае для i -й ступени импактора, состоящей из n ступеней, определялись по формуле

$$D_i = \frac{\sum_{i+1}^n \Delta m_i}{\sum_{i=1}^n \Delta m_i} 100 \% . \quad (7)$$

Вычислялся эффективный размер частиц, осаждающихся на ступенях импактора:

$$\delta_s = \delta_{cp.\phi} \left(\frac{\mu_i \rho_0 Q_0}{\mu_0 \rho_i Q_i} \right)^{0.5}, \quad (8)$$

где $\delta_{cp.\phi}$ — характерный (среднеэффективный) размер частиц, осаждающихся на ступенях импактора, значения $\delta_{cp.\phi}$ взяты из паспортных характеристик импактора;

Q — расход пробы газа через импактор;

ρ — плотность частичек пыли, г/см³;

μ — вязкость газов при температуре $t_{газ}$, кг/м · с.

Индекс «0» соответствует условиям определения паспортных данных характеристик, индекс «и» условиям измерения (см. табл. 2).

Результаты экспериментальных данных по металлической шлифпильи приведены в табл. 3.

На логарифмически вероятностной координатной сетке наносились точки с координатами D и δ_s , соответствующие каждой ступени импакто-

Таблица 3
Экспериментальные данные для металлической шлифпильи по определению фракционного состава пыли прямоточным циклоном $d_0 = 0,046$ м

Экспериментальный образец № 1	Скорость в циклоне									
	6 м/с			9 м/с			12 м/с			
	Ступень импактора	Δm , мг	D , %	δ_s , мкм	Δm , мг	D , %	δ_s , мкм	Δm , мг	D , %	δ_s , мкм
1	1,7	96,6	7,61	0,4	99,4	7,54	0,2	99,7	7,46	
2	4,0	88,6	4,97	1,5	97,1	4,93	0,7	98,5	4,88	
3	30,9	27,1	2,74	31,7	47,1	2,71	16,0	72	2,69	
4	12,0	3,1	1,73	22,2	12,1	1,71	29,6	23	1,69	
5	1,5	0,2	0,91	7,1	0,95	0,90	12,8	1,8	0,90	
6	0,1	—	0,91	0,6	—	0,90	1,1	—	0,90	

ра; линия, проведенная через эти точки, представляет собой кривую распределения массы частиц по размерам.

По этим графикам определялось содержание в пыли фракций любых размеров в интервале полученных значений минимальных диаметров частиц, а также проверялось подчинение пыли, подлежащей улавливанию, логарифмически нормальному закону распределения частиц по размерам. Находили параметр σ , характеризующий ширину распределения (дисперсию):

$$\sigma = \frac{\delta_{84}}{\delta_{50}} = \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}}, \quad (9)$$

где δ_{84} и δ_{16} — размеры частиц, соответствующие проходам $D = 84\%$ и $D = 16\%$, которые определялись графически по кривой распределения.

На рис. 4 приведены дисперсные составы пыли для трех скоростей воздуха в циклоне: 6, 9 и 12 м/с после аппарата.

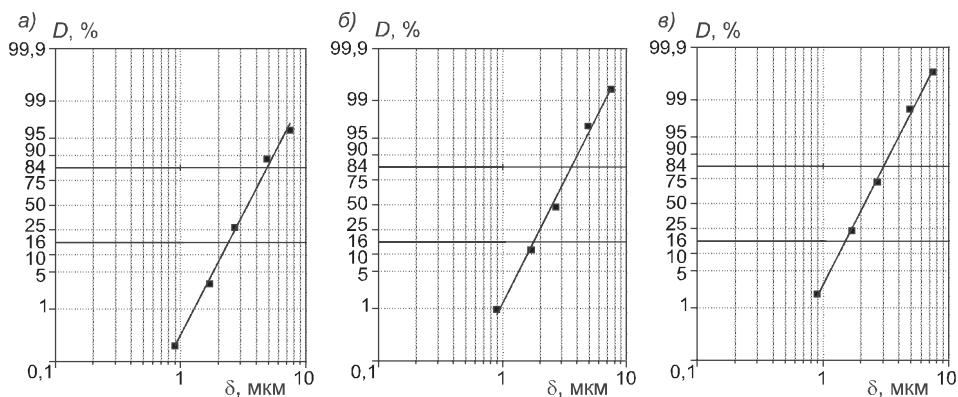


Рис. 4. Распределение частиц пыли для металлической шлифпильи (см. табл. 3) на вероятностно логарифмической координатной сетке при скорости запыленного потока в циклоне 6 м/с (а); 9 м/с (б); 12 м/с (в)

Как видно из приведенных экспериментальных графиков, на выходе из ПЦ дисперсный состав пылей также подчиняется ЛНР.

Исходя из проведенных экспериментальных исследований, по определению фракционных составов пылей на входе и выходе из аппарата, были проведены расчеты по формулам (5), (6) и определены постоянные a и n для трех режимов работы ПЦ. Далее были сопоставлены полученные результаты на лабораторном ПЦ с результатами, представленными в [1].

Результаты расчетов по шлифовочной металлической пыли приведены в табл. 4 и имеют хорошее согласование с данными, представленными в банке данных [1], различия находятся в пределах 5 %. Расчет параметров для остальных опытных образцов показал следующие результаты:

модельный кварцевый порошок № 1 — $a = 4,964$, $n = 0,792$;

модельный кварцевый порошок № 2 — $a = 5,035$, $n = 0,791$;

измельченный каменный уголь Кузнецкого бассейна — $a = 4,924$, $n = 0,78$;

измельченный кемеровский уголь — $a = 4,745$, $n = 0,705$;

измельченный сланец — $a = 4,699$, $n = 0,771$.

Таблица 4
**Результаты расчетов постоянных a и n банка данных инерционных
 пылеуловителей для шлифовочной металлической пыли**

Параметры	Скорость газа V , м/с	Медианный размер $\delta_{50,0}$, мкм	Дисперсия σ_0	Плотность частиц ρ , кг/м ³	Медианный размер $\delta_{50,1}$, мкм	Дисперсия σ_1	n	a	$[(n_{ср} - n_{нд}) / n_{нд}] \cdot 100$			
Металлическая шлифпиль	6	35	2,25	7850	3,48	1,42	0,726	4,85				
	9				2,55	1,37	0,723	5,15				
	12				2,18	1,35	0,716	4,99				
Средние значения								0,722	4,998			
Значения, представленные в БД [1]								0,75	4,8			
								-3,77	4,13			

Согласно анализу данных по всем экспериментальным образцам, различия по постоянным a и n не превышают 6 %. Данные результаты подтверждают работоспособность предложенного в [2] метода по определению a и n и позволяют уверенно использовать его в инженерно-производственной практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шиляев, М.И. Методы расчета пылеуловителей: учеб. пособие [Текст] / М.И. Шиляев, А.М. Шиляев, Е.П. Грищенко. — Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2006. — 385 с.
2. Шиляев, М.И. Методика определения констант a и n банка данных инерционных пылеуловителей универсального метода расчета [Текст] / М.И. Шиляев, В.В. Пеняевский // II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Теплофизические основы энергетических технологий» 06–08 октября 2011 г. — Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. — 285 с.
3. Коузов, П.А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей [Текст] / П.А. Коузов, Л.Я. Скрябина. — Л. : Химия, 1983. — 143 с.
4. Пат. 2273019 Российской Федерации, МПК G01N 15/02. Способ определения дисперсного состава порошковых материалов [Текст] / М.И. Шиляев, А.М. Шиляев, В.С. Рекунов и др. заявители и патентообладатели ТГАСУ, ОАО «Томсквентиляция». — № 2004129408/28; заявл. 05.10.2004; опубл. 27.03.2006, Бюл. № 9 (Ч. II).

*ШИЛЯЕВ Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.
 Томский государственный архитектурно-строительный университет
 ПЕНЯВСКИЙ Виталий Владимирович, ст. препод.
 Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 22.07.13

Shilyaev Michail Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Penyavsky Vitaliy Vladimirovich, senior lecturer, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

EXPERIMENTAL DEFINITION OF CONSTANTS OF A UNIVERSAL METHOD OF CALCULATION OF INERTIAL DUST COLLECTORS

In the work the experimental substantiation of the method of determining the constants a and n a data Bank a universal method of calculation (UMC) inertial precipitators on the 70

parameters of the log-normal distribution of dust particles in size and output devices. Show good agreement between the data obtained by this method, with data for earlier works.

K e y w o r d s: universal method of calculation, inertial dust collectors, log-normal distribution of particles of dusts in size (UMC), fractional overshoot.

REFERENCES

1. Shilyaev, M.I. Methods of calculation of dust collectors: textbook [Text] / M.I. Shilyaev, A.M. Shilyaev, E.P. Hryshchenko. — Tomsk : Izd-vo Tomsk State Architect.-builds. University, 2006. — 385 p.
 2. Shilyaev, M.I. Technique to determine the constants a and n Bank data inertial precipitators universal method of calculation [Text] / M.I. Shilyaev, V.V. Penyavsky // II all-Russian scientific-practical conference with international participation «Thermophysical fundamentals of energy technologies» 06-08 October 2011. — Tomsk : Izd-vo Tomsk Polytechnic University, 2011. — 285 p.
 3. Kouzov, P.A. Methods of determination of physical and chemical properties of industrial dusts [Text] / P.A. Kouzov, L.Ya. Scryabina. — L. : Khimiya, 1983. — 143 p.
 4. Pat. 2273019 of the Russian Federation, the IPC G01N 15/02. Way to determine the disperse composition of powder materials [Text] / M.I. Shilyaev, A.M. Shilyaev, V.S. Rekunov and other applicants and patent owners trace, open joint-stock company «Tomskventilyatsiya». — N 2004129408/28; Appl. 05.10.2004; publ. 27.03.2006, bul. N 9 (Ch. II).
-

УДК 697.94.001.24

В.А. БРОЙДА

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ
ТЕПЛООБМЕННИКА ФАНКОЙЛА С УЧЕТОМ
УСТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУХА
В ПОМЕЩЕНИИ**

Итерационным способом рассчитывается состояние влажного воздуха в помещении. Учитываются поступления явной полной теплоты, расход, состояние и способ подачи приточного воздуха, технические характеристики теплообменника фанкойла. Соответственно найденному состоянию воздуха более точно определяются параметры работы теплообменника и затраты холода.

Ключевые слова: фанкойл, теплообменник, состояние воздуха.

Часто кондиционирование воздуха в современных многокомнатных зданиях осуществляется системами с вентиляторными кондиционерами-доводчиками — фанкойлами. В теплый период года в помещения подается минимальный расход наружного охлажденного и осушенного в центральном кондиционере воздуха, а его дообработка производится в фанкойлах.

Возможна подача обработанного воздуха непосредственно в фанкойл, где к нему подмешивается внутренний воздух, затем общий поток воздуха охлаждается в теплообменнике и подается в помещение. Преимущество такого варианта — это отсутствие дополнительных приточных устройств, а недостаток — более крупный типоразмер фанкойла. Другой вариант — подача обработанного наружного воздуха через отдельные приточные устройства. Тогда в фанкойле обрабатывается только рециркуляционный воздух из помещения. В этом случае уменьшается обычно типоразмер фанкойла.

Холодопроизводительность фанкойла должна компенсировать избытки теплоты в помещении с учетом подачи охлажденного наружного воздуха. Подбор фанкойлов может выполняться по таблицам и номограммам или с помощью компьютерных программ, предоставляемых производителями оборудования. Результат подбора во многом зависит от предварительно выбранных в пределах оптимальных норм параметров внутреннего воздуха. Эти параметры формируются в результате выполнения балансов поступлений теплоты и влаги, подачи приточного воздуха определенного состояния и обработки воздуха в теплообменнике фанкойла. Результат обработки зависит от технических данных и параметров работы теплообменника, в том числе от состояния воздуха на входе, а значит и от состояния воздуха в помещении. Поэтому устанавливающееся состояние внутреннего воздуха может несколько отличаться от первоначального, что не учитывается при подборе фанкойлов.

© Бройда В.А., 2013

Цель статьи — разработка способа расчета, который позволяет находить устанавливающееся состояние воздуха в помещении и определять характеристики работы теплообменника фанкойла при этих условиях.

Расчет теплообменников для охлаждения и осушения воздуха может основываться на эмпирических зависимостях для коэффициентов явной и полной теплопередачи [1 и др.]. Другой подход [1, 2, 3 и др.] — замена процесса «мокрого» охлаждения в теплообменнике на эквивалентный процесс «сухого» охлаждения. В расчете могут использоваться закономерности теплопереноса через оребренную поверхность, уравнение Меркеля, зависимости для числа единиц переноса NTU [2, 3 и др.]. Обычно разработчики программ подбора не раскрывают всех положений расчета.

Представленное в статье решение основывается на эмпирических коэффициентах явного и полного теплообмена; на необходимых балансовых уравнениях; на зависимостях, описывающих состояние влажного воздуха и смеси воздушных потоков, а также на выражениях, связывающих расходы, площади сечения и скорости сред — они общеизвестны и здесь не приводятся.

Балансы явной и полной теплоты помещения выражают уравнения:

$$\Delta Q_{\text{я}} - 0,278 \cdot G_{\text{п}} \cdot c \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{п}}) - Q_{\text{фя}} = 0, \quad (1)$$

$$Q_{\text{п}} - 0,278 \cdot G_{\text{п}} \cdot (i_{\text{в}} - i_{\text{п}}) - Q_{\text{фп}} = 0, \quad (2)$$

где $\Delta Q_{\text{я}}$, $\Delta Q_{\text{п}}$ — избытки явной и полной теплоты в помещении, Вт; $Q_{\text{фя}}$, $Q_{\text{фп}}$ — явная и полная холодопроизводительности теплообменника фанкойла, Вт;

$G_{\text{п}}$ — расход приточного воздуха, подаваемого центральным кондиционером, кг/ч;

$t_{\text{в}}$, $i_{\text{в}}$ и $t_{\text{п}}$, $i_{\text{п}}$ — соответственно температуры и энталпии внутреннего и приточного воздуха, °С, кДж/кг;

$c = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ — удельная теплоемкость воздуха.

Явная $Q_{\text{фя}}$ и полная $Q_{\text{фп}}$ холодопроизводительности выражаются через коэффициенты явной $k_{\text{я}}$ и полной $k_{\text{п}}$ теплопередачи ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) [1]

$$k_{\text{я}} = 11,05 \cdot (v\rho)^{0,56} \cdot w^{0,2} \cdot T^{0,25}, \quad (3)$$

$$k_{\text{п}} = 10,25 \cdot (v\rho)^{0,29} \cdot w^{0,22} \cdot T^{-0,6}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{фя}} = k_{\text{я}} \cdot F \cdot \Delta t_{\text{сл}}, \quad (5)$$

$$Q_{\text{фп}} = k_{\text{п}} \cdot F \cdot \Delta t_{\text{сл}}, \quad (6)$$

где $v\rho$, w — массовая скорость воздуха и скорость воды в трубках теплообменника, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{s})$, м/с;

$T = (t_{\text{т1}} - t_{\text{м}})/(t_{\text{т1}} - t_{\text{x1}})$ — температурный параметр;

F — площадь теплопередачи, м^2 ;

$t_{\text{т1}}$, $t_{\text{м}}$ — температуры воздуха на входе в теплообменник по сухому и мокрому термометру, °С;

t_{x1} , t_{x2} — температуры холодной воды, °С;

$\Delta t_{\text{сл}}$ — средняя логарифмическая разность температур воздуха и воды на входе и выходе теплообменника фанкойла, °С.

Температура и энталпия воздуха после обработки в теплообменнике:

$$t_{\tau 2} = t_{\tau 1} - 3,6 \cdot Q_{\phi \text{я}} / (c \cdot G_{\phi}), \quad (7)$$

$$i_{\tau 2} = i_{\tau 1} - 3,6 \cdot Q_{\phi \text{п}} / G_{\phi}, \quad (8)$$

температура отапленной воды

$$t_{x2} = t_{x1} + 3,6 \cdot Q_{\phi \text{п}} / (c_w \cdot G_w), \quad (9)$$

где $t_{\tau 1}$, $i_{\tau 1}$ и $t_{\tau 2}$, $i_{\tau 2}$ — температуры и энталпии воздуха на входе и выходе теплообменника, °С, кДж/кг;

G_{ϕ} , G_w — расходы воздуха и холодной воды теплообменника, кг/ч; $c_w = 4,187$ кДж/(кг · К) — теплоемкость воды.

Задаются: состояние наружного и первоначальное состояние внутреннего воздуха, расход приточного воздуха, избытки явной и полной теплоты (или выделения влаги); достаточное для удаления влаги состояние приточного воздуха, температура холодной воды определяются согласно [4].

Задача решается методом последовательных приближений:

- по избыткам явной теплоты с учетом подачи охлажденного приточного воздуха выбирается фанкойл с теплообменником, который обеспечивает достаточную явную холодопроизводительность;

- находятся параметры воздуха и воды на выходе из теплообменника;

- уточняется состояние внутреннего воздуха, установившееся в результате работы такого теплообменника — этим завершается первый шаг итерации;

- при уточненном состоянии воздуха в помещении определяются параметры воздуха на входе в теплообменник и находятся новые характеристики его работы (t_m , $\Delta t_{\text{сл}}$, T , k_y , k_p , $Q_{\phi \text{я}}$, $Q_{\phi \text{п}}$, t_{x2}). Итерационный процесс повторяется до требуемой сходимости результатов, для чего используется компьютерная программа, разработанная в соответствии с описанной моделью расчета.

Пример. Наружный воздух: $t_h = 28,0$ °С, $i_h = 65,0$ кДж/кг, $d_h = 14,45$ г/кг, $\varphi_h = 61$ %.

Внутренний воздух: $t_b = 25,0$ °С, $\varphi_b = 60$ %, $d_b = 11,98$ г/кг, $i_b = 55,6$ кДж/кг, $t_m = 19,4$ °С.

Избытки явной $\Delta Q_{\phi \text{я}} = 4000$ Вт и полной $\Delta Q_{\phi \text{п}} = 4428$ Вт теплоты в помещении (выделения влаги $w = 0,6$ кг/ч).

Расход наружного воздуха, подаваемого центральным кондиционером $G_p = 580$ кг/ч.

Параметры приточного воздуха, необходимые для ассилиации влаги $d_p = 10,9$ г/кг, $t_p = 17,5$ °С, $i_p = 45,3$ кДж/кг, температуры холодной и отапленной воды $t_{x1} = 9$ °С, $t_{x2} = 14$ °С определены по методике [4]. В первом варианте решения (подача подготовленного приточного воздуха через фанкойл) воздух на входе в теплообменник — это смесь приточного и рециркуляционного воздуха, во втором варианте решения (подача приточного воздуха через отдельное устройство) — это внутренний воздух.

Первый вариант решения. С учетом охлаждения приточного воздуха в центральном кондиционере требуемая явная холодопроизводительность теплообменника фанкойла $Q_{\phi \text{я}} = 2786$ Вт; при температуре воздуха на выходе из теплообменника $t_{\tau 2} = 16$ °С расход воздуха фанкойла $G_{\phi} = 1592$ кг/ч; расход рециркуляционного воздуха $G_p = 1012$ кг/ч; параметры воздуха на входе в теплообменник: $i_{\tau 1} = 51,8$ кДж/кг, $d_{\tau 1} = 11,6$ г/кг, $t_{\tau 1} = 22,3$ °С

и $t_m = 18,1$ °C. Требуемой явной холодопроизводительности при $v_p = 3,5$ кг/(м²· с), $w = 0,8$ м/с, $T = 0,315$, $\Delta t_{cl} = 7,62$ °C и $k_a = 16,00$ Вт/(м² · К) отвечает четырехрядный теплообменник с $F = 22,85$ м², площадью сечения для прохода воздуха $F_v = 0,1264$ м² и воды $F_w = 0,00029$ м². При коэффициенте $k_n = 27,93$ Вт/(м² · К) его полная холодопроизводительность $Q_{\phi n} = 4864$ Вт больше явной (осуществляется охлаждение и осушение), расход холодной воды $G_w = 836,4$ кг/ч. Параметры воздуха на выходе из теплообменника: $t_{r2} = 16,0$ °C, $i_{r2} = 40,8$ кДж/кг, $d_{r2} = 9,79$ г/кг, $\varphi_{r2} = 83,4$ %. Состояние внутреннего воздуха: $t_b = 25$ °C, $i_b = 50,8$ кДж/кг, $d_b = 10,1$ г/кг и $\varphi_b = 50,8$ %. Эти данные являются исходными для второго шага итерации.

В результате итерационного процесса определяются:

— состояние воздуха в помещении: $t_v = 24,2$ °C, $i_v = 48,1$ кДж/кг, $d_v = 9,33$ г/кг, $\varphi_v = 48,9$ %, $t_m = 16,4$ °C — заметно отличается от первоначального;

— состояние воздуха на входе в теплообменник фанкойла: $t_{t1} = 21,8$ °C, $i_{t1} = 59,5$ кДж/кг, $d_{t1} = 9,91$ г/кг, $\varphi_{t1} = 59,5$ %;

— состояние воздуха на выходе из теплообменника фанкойла: $t_{r2} = 15,28$ °C, $i_{r2} = 38,1$ кДж/кг, $d_{r2} = 9,02$ г/кг, $\varphi_{r2} = 80,8$ %;

— величины $k_a = 17,27$ Вт/(м² · К) и $k_n = 23,47$ Вт/(м² · К), $Q_{\phi n} = 2909$ Вт и $Q_{\phi p} = 3967$ Вт, $t_{x2} = 13,08$ °C.

В теплообменнике воздух охлаждается и осушается. Снижение затрат холода по сравнению с первоначальным процессом составляет $\delta = (4864 - 3967)/3967 \cdot 100\% = 22,6$ %. Процессы охлаждения воздуха в теплообменнике фанкойла в координатах $t-d$ представлены на рис. 1.

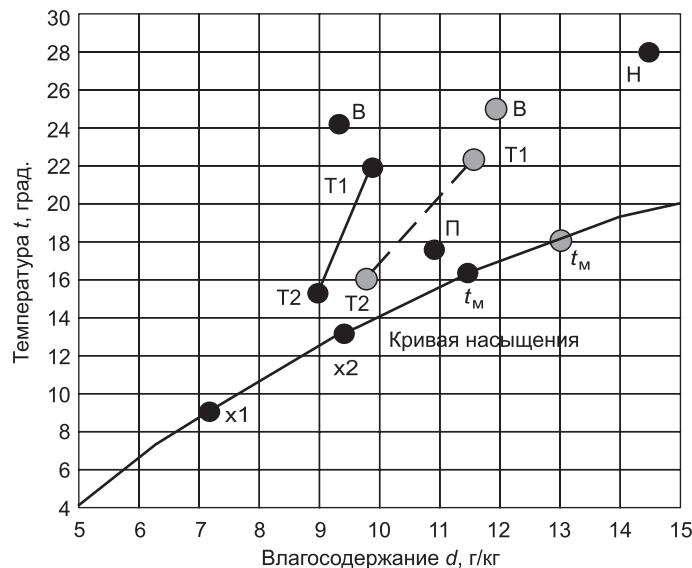


Рис. 1. Процессы охлаждения и осушки воздуха в теплообменнике фанкойла при совмещенной подаче воздуха (первый вариант)

$t_{1,2}$ — процесс в теплообменнике; t_m — температура воздуха на входе в теплообменник по мокрому термометру; Π и V — состояния наружного, приточного и внутреннего воздуха; x_1 и x_2 — состояния холода и отапленной воды; темные точки — неизменные или установленные состояния влажного воздуха; светлые точки — первоначально принятые состояния

Второй вариант решения. Так же, как в первом варианте $Q_{\text{фя}} = 2786 \text{ Вт}$; при $t_{\tau 2} = 16^\circ\text{C}$ расход воздуха фанкойла $G_\phi = 1109 \text{ кг/ч}$, общий расход воздуха, подаваемого в помещение, $G = 1689 \text{ кг/ч}$. Состояние воздуха на входе в теплообменник: $t_B = 25,0^\circ\text{C}$, $\varphi_B = 60\%$, $d_B = 11,98 \text{ г/кг}$, $i_B = 55,6 \text{ кДж/кг}$, $t_m = 19,4^\circ\text{C}$. Требуемой холододопроизводительности при $v_p = 3,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $w = 0,8 \text{ м/с}$, $T = 0,350$, $\Delta t_{\text{сл}} = 8,85^\circ\text{C}$ и $k_y = 16,40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ отвечает теплообменник с $F = 19,2 \text{ м}^2$, $F_B = 0,88 \text{ м}^2$, $F_w = 0,000267 \text{ м}^2$, $k_n = 26,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $Q_{\text{пп}} = 4479 \text{ Вт}$, $G_w = 770 \text{ кг/ч}$. Такой теплообменник обеспечивает параметры воздуха на выходе: $t_{\tau 2} = 16,00^\circ\text{C}$, $i_{\tau 2} = 41,1 \text{ кДж/кг}$, $d_{\tau 2} = 9,88 \text{ г/кг}$, $\varphi_{\tau 2} = 84,1\%$. В помещении воздух из фанкойла смешивается с приточным воздухом, нагревается и увлажняется, в результате складываются его иные параметры: $t_B = 25^\circ\text{C}$, $i_B = 51,9 \text{ кДж/кг}$, $d_B = 10,6 \text{ г/кг}$, $\varphi_B = 53,2\%$.

Далее выполняются итерации и определяются:

— состояние воздуха в помещении (и на входе в теплообменник): $t_B = 24,5^\circ\text{C}$, $i_B = 49,8 \text{ кДж/кг}$, $d_B = 10,02 \text{ г/кг}$, $\varphi_B = 51,8\%$, $t_m = 16,4^\circ\text{C}$;

— состояние воздуха на выходе из теплообменника: $t_{\tau 2} = 15,2^\circ\text{C}$, $i_{\tau 2} = 38,0 \text{ кДж/кг}$, $d_{\tau 2} = 9,00 \text{ г/кг}$, $\varphi_{\tau 2} = 57,8\%$;

— характеристики работы теплообменника: $k_y = 17,54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $k_n = 22,41 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $Q_{\text{фя}} = 2872 \text{ Вт}$ и $Q_{\text{пп}} = 3669 \text{ Вт}$, $t_{x2} = 13,1^\circ\text{C}$, воздух охлаждается и осушается. По сравнению с первоначальным процессом снижение затрат холода составляет $\delta = (4479 - 3669)/3669 \cdot 100\% = 22,1\%$. Процессы обработки воздуха в теплообменнике представлены на рис. 2.

Таким образом, предлагается итерационный способ расчета состояния влажного воздуха в помещении, который учитывает избытки явной и полной теплоты (или выделения влаги), состояние приточного воздуха, технические данные теплообменника фанкойла, способ подачи обрабо-

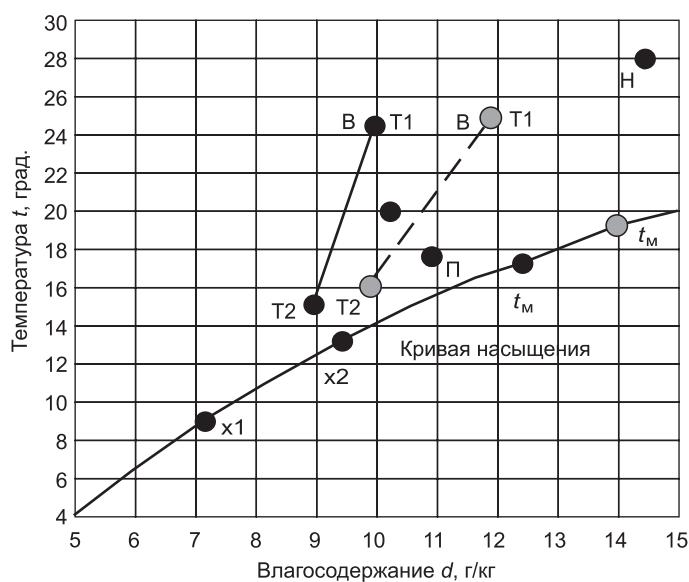


Рис. 2. Процессы охлаждения и осушки воздуха в теплообменнике фанкойла при раздельной подаче воздуха (второй вариант)

Обозначения см. на рис. 1

танного приточного воздуха (через фанкойл или через отдельное приточное устройство). В результате определяются характеристики работы теплообменника, соответствующие устанавливающемуся состоянию воздуха в помещении. Способ позволяет точнее определять состояние внутреннего воздуха и потребление холода теплообменника фанкойла, что ведет к экономии энергии, затрачиваемой системой кондиционирования и возможно к меньшим и более дешевым типоразмерам ее аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баркалов, Б.В. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях [Текст] / Б.В. Баркалов, Е.Е. Карпич. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1982. — 312 с.
2. Богословский, В.Н. Термодинамика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] / В.Н. Богословский, М.Я. Поз. — М. : Стройиздат, 1983. — 320 с.
3. БялыЙ, Б.И. Тепломассообменное оборудование воздухообрабатывающих установок ООО «Веза» [Текст] / Б.И. БялыЙ. — М. : ООО «Инфоркт», 2005. — 278 с.
4. Белова, Е.М. Системы кондиционирования воздуха с чиллерами и фэнкойлами [Текст] / Е.М. Белова. — М. : Евроклимат, 2006. — 398 с.

*БРОЙДА Владимир Аронович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: broida@mail.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 08.07.13

Broyda Vladimir Aronovich, candidate of technical sciences, assistant professor;
E-mail: broida@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

CALCULATION OF OPERATING PARAMETERS FOR FANCOIL HEAT EXCHANGER CONSIDERING STEADY INDOOR CONDITIONS FOR THE AIR

Conditions of humid indoor air are iteratively calculated. The feed of sensible and full heat, rate of flow, state and methods of fresh air supply, and characteristics of fancoil heat exchanger are considered. According to previously found air condition, operating characteristics of fancoil's heat exchanger and its cooling load are determined.

Key words: fancoil, heat exchanger, air conditions.

REFERENCES

1. Barkalov, B.V. Air Conditioning in industrial, public and residential buildings [Text] / B.V. Barkalov, E.E. Karpis. — 2-nd edition, revised and enlarged. — M. : Stroyizdat, 1982. — 312 p.
2. Bogoslovsky, V.N. Thermal physics of devices for heat recovery of heating, ventilation and air-conditioning [Text] / V.N. Bogoslovsky, M.Ya. Poz. — M. : Stroyizdat, 1983. — 320 p.
3. Byaly, B.I. Heat and mass transfer equipment air handling units, LLC «Veza» [Text] / B.I. Byaly. — M. : LLC «Infort», 2005. — 278 p.
4. Belova, E.M. Air-conditioning systems with chillers and fan coil [Text] / E.M. Belova. — M. : Evroklimat, 2006. — 398 p.

УДК 697.34:697.444

**В.Н. СЕМЕНОВ, Э.В. САЗОНОВ, Д.Н. КИТАЕВ, О.В. ТЕРТЫЧНЫЙ,
Т.В. ЩУКИНА**

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ НА РАЗВИТИЕ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Рассматривается влияние конструктивных параметров бесканальной тепловой сети на термическое сопротивление грунта. Доказано, что увеличение глубины прокладки и сокращение расстояния между трубами позволяют повысить энергосберегающий эффект при внедрении бесканальных систем теплоснабжения.

Ключевые слова: тепловые сети, энергосбережение.

Сложившаяся в последние годы устойчивая тенденция использования мало затратной и технологичной бесканальной прокладки трубопроводов находит все большее распространение по причине создания современных эффективных теплоизоляционных покрытий. Широкое внедрение таких новых материалов, позволяющих выполнить качественное нанесение на защищаемую поверхность, может существенно изменить соотношение в типах прокладки в сторону значительного увеличения бесканальных трубопроводов.

Наблюдаемое в последние десятилетия интенсивное развитие технологий способствует появлению широкого ассортимента водо- и паронепроницаемой тепловой изоляции, имеющей высокую адгезию с поверхностью трубопроводов, что делает ее надежно защищенной от наружной коррозии. К данному типу изоляции относятся следующие виды материалов: пенополиуретан в полиэтиленовой оболочке (ППУ) и пенополиминерал (ППМ), которые используются для стальных труб.

Наиболее перспективными являются трубопроводные системы, состоящие из гофрированных труб, покрытых вспененным полиуретаном с внешней полиэтиленовой гидроизолирующей оболочкой, таких как, например: КАСАФЛЕКС и ПРОФЛЕКС. В первом случае гофрированные трубы выполнены из нержавеющей стали, во втором — из полимерного материала. Они поставляются длинномерными бухтами, что сокращает сроки и стоимость строительно-монтажных работ. Гофрированная форма транспортирующей трубы обеспечивает ей требуемую самокомпенсацию, исключает установку дополнительных компенсаторов и неподвижных опор.

Смонтированная с использованием современных технологий тепловая сеть, как правило, может успешно эксплуатироваться длительный период времени без проведения ремонтных работ.

Несмотря на применение высококачественной изоляции, дальнейшее повышение энергоэффективности, закрепленное на законодательном уровне РФ, требует поиска дополнительных способов сокращения потерь [1]. Поэтому возникает необходимость в исследованиях влияния конст-

руктивных особенностей прокладки трубопроводов на доставку теплоносителя потребителю с параметрами без отклонений от расчетных.

Для оценки возможности снижения потерь следует рассмотреть изменения температурных полей в грунте, при размещении в нем бескапитальной тепловой сети. Решение поставленной задачи может быть выполнено при использовании двухмерного уравнения стационарной теплопроводности [2, 3]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

где T — температура в массе грунта, Вт/(м · °C);
 x, y — оси координат, м.

При решении уравнения теплопроводности (1) методом источников [2] получают температурные поля, которые независимы друг от друга. При этом результирующую температуру находят в каждой точке координатной сетки путем сложения температурных полей, возбуждаемых в массиве отдельными источниками.

Если проложена одна труба, то при использовании метода источников термическое сопротивление грунта определяется по зависимости [2–4]

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left[\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r} \right)^2 - 1} \right], \quad (2)$$

где λ — теплопроводность грунта, Вт/(м · °C);
 h, r — глубина расположения трубы, т.е. расстояние от поверхности массива до оси трубы, и радиус трубы, м.

При прокладке двух магистралей термическое сопротивление массива для каждой трубы имеет вид

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \frac{\left(\ln \frac{2h}{r} \right)^2 + \left(\ln \sqrt{1 + \left(\frac{h}{s} \right)^2} \right)^2}{\ln \frac{2h}{r} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{h}{s} \right)^2}}, \quad (3)$$

где s — расстояние между осями труб, м.

Как показывают расчетные данные, полученные с использованием зависимостей (2, 3) и приведенные на рис. 1, при размещении в массиве одиночной трубы, по которой транспортируется теплоноситель потребителю, глубина заложения не оказывает существенного влияния на сопротивление грунта и поэтому не требуется его разработка до более низких отметок. При двухтрубной бескапитальной тепловой сети влияние

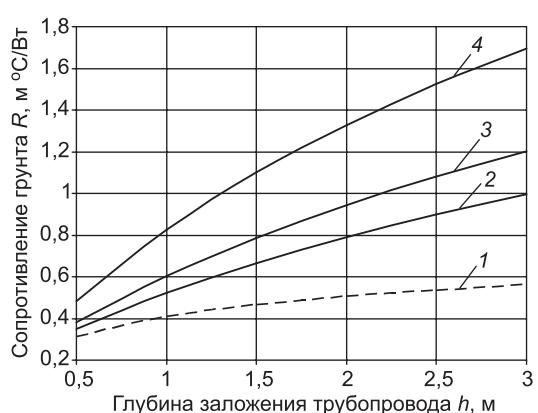


Рис. 1. Термическое сопротивление грунта в зависимости от глубины заложения
1 — одной трубы; 2–4 — двух труб при расстоянии между их осями 0,7, 0,5 и 0,3 м соответственно

глубины заложения очевидно (см. рис. 1). Теплопотери будут уменьшаться при увеличении высоты от осей труб до уровня грунта и сокращении расстояния между ними. Так, например, при прокладке двух магистралей на глубине заложения 2 м потери теплоты по сравнению с однотрубной системой можно снизить в 2,4 раза.

В случае функционирования двухтрубной сети, выполненной в единой тепловой изоляции круглого сечения и получившей распространение в последние годы, создается тепловой режим грунта под воздействием одного протяженного источника, для которого глубина прокладки (см. рис. 1) не оказывает существенного влияния на потери теплоты через массив. Это положение позволяет уменьшить объем земляных работ и тем самым снизить затраты на монтаж тепловой сети, что наглядно демонстрирует диаграмма, представленная на рис. 2.

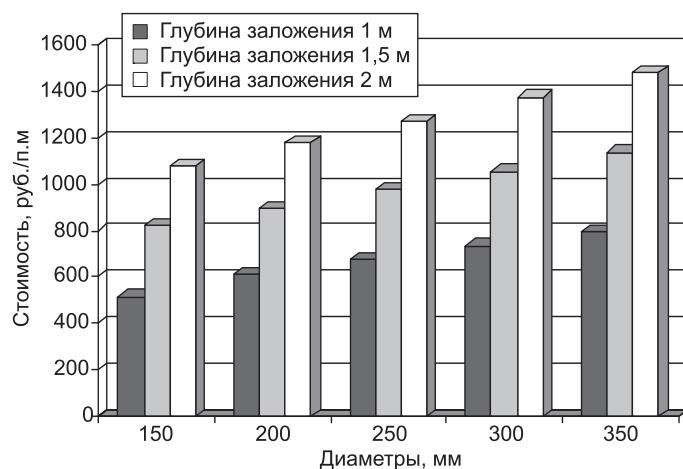


Рис. 2. Стоимость земляных работ в зависимости от глубины заложения h , отнесенная к одному погонному метру трубной системы

Затраты на проведение земляных работ (рис. 2), включая в том числе и последующую засыпку, при прокладке двухтрубной системы, выполненной в единой тепловой изоляции, такой как Упонор Кватро или Упонор Термо, получены с учетом средней стоимости производственного процесса 800 руб./ м^3 и объема вырабатываемого грунта, определенного в соответствии с технологическими условиями, по которым ширина траншеи принята равной сумме наружного диаметра и расстояния 500 мм. Приведенная на рис. 2 стоимость показывает, что увеличение глубины заложения с 1 м до 1,5 и 2 м приводит к возрастанию затрат соответственно на 58,8 и 109,1 % при диаметре 150 мм, а при диаметре 350 мм на 42,5 и 85,1 %.

В качестве примера рассмотрим существующее положение в теплоснабжении районов г. Воронежа с учетом возможности повышения энергоэффективности.

Строительство большинства тепловых сетей в г. Воронеже проводилось в 60–70 годы прошлого века. В этот период интенсивного развития городского хозяйства, как одного из стратегически важных промышленных районов Центрально-Черноземного региона, теплоснабжение при

возведении сооружений различного назначения выполнялось, как правило, посредством канальной прокладки трубопроводов. Не без оснований считалось, что несмотря на дополнительно затрачиваемые средства на монтаж каналов, данный способ прокладки более надежен, так как позволяет сохранять в течение продолжительного срока рабочую способность утеплителей и в случае необходимости проводить качественные ремонтные работы. В результате продолжительного применения такой технологии было возведено около 800 км сетей теплоснабжения в двухтрубном исполнении, из которых на 2013 г. приходится 93,8 % на канальную прокладку, 5,7 % на бесканальную и 0,5 % на надземную (рис. 3).

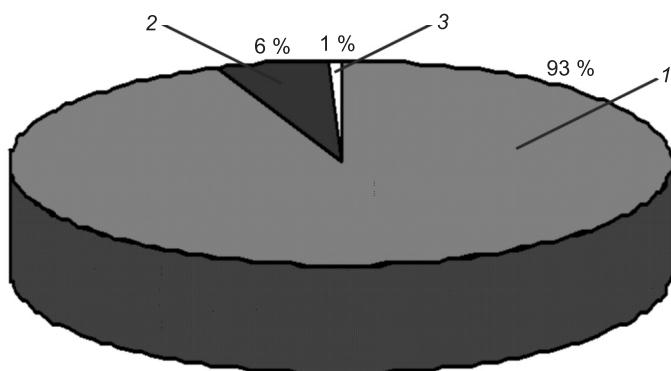


Рис. 3. Соотношение в процентном выражении проложенных различными способами сетей теплоснабжения г. Воронежа (%)
1 — канальная прокладка; 2 — бесканальная; 3 — надземная прокладка

Степень износа существующих магистральных сетей приближается к 50 %, а квартальных и распределительных сетей превышает 80 %. Основное количество отказов и повреждений теплотрасс происходит по причинам старения металла и его коррозионного разрушения, так как срок службы трубопроводов часто превышает двадцатилетний рубеж. Поэтому техническое состояние большинства систем теплоснабжения требует не только капитального ремонта, но и реконструкции с учетом уже возросших нагрузок и прогнозируемых изменений [1]. Это наглядно демонстрирует статистика аварийных ситуаций на примере двух самых крупных поставщиков г. Воронежа МПК «Воронежтеплосеть» и ООО «ВТСК» (см. таблицу).

Анализ сведений по эксплуатационным параметрам сетей, полученным от теплоснабжающих организаций г. Воронежа, показал, что потери теплоты в системах теплоснабжения, как правило, не превышают 10 %, но на отдельных ответвлениях данная величина доходит до 30 %. Такая статистика сигнализирует не только о неудовлетворительном состоянии

Сведения по повреждениям тепловых сетей, находящихся на балансе ООО «ВТСК» и МПК «Воронежтеплосеть»

Наименование предприятия	Количество повреждений в период эксплуатации			
	2009–2010 гг.	2010–2011 гг.	2011–2012 гг.	2012–2013 гг.
ООО «ВТСК»	222	462	496	452
МПК «Воронежтеплосеть»	246	387	459	558

металла трубопроводов, вызывающим утечки теплоносителя, но и о значительных нарушениях тепловой изоляции.

При существующих проблемах для большинства теплосетей г. Воронежа неизбежно встает вопрос о крайней необходимости значительных затрат на проведение ремонтных работ, так как частичная замена наиболее опасных участков временно восстанавливает рабочую способность систем, но не повышает их надежность на длительный период времени. Это, как правило, находит определенное отражение в планируемых мероприятиях крупных поставщиков тепла потребителям.

Следует также отметить, что зафиксированная устойчивая тенденция увеличения строительства многоэтажного жилья вызывает необходимость ввода в действие новых сетей и ответвлений для теплоснабжения объектов. Все это неизбежно приводит к поиску эффективных технологий в трубопроводных системах [1], вытесняющих дорогостоящую канальную прокладку.

Такое положение в сфере теплоснабжения характерно и для большинства городов России. Поэтому появление новых материалов с уникальными свойствами защиты их структуры и оптимизация схем прокладки позволяют при своевременном инвестировании решить проблему повышения надежности сетей и доставки требуемого качества тепловой энергии потребителям. Это в свою очередь снимет значительное напряжение в вопросах подготовки к отопительным сезонам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов, В.Н. Энергосбережение и повышение энергоэффективности для объектов социальной сферы [Текст] / В.Н. Семенов, Д.Н. Китаев, Т.В. Щукина, Д.Ю. Королев // Энергосбережение. — 2010. — № 6. — С. 38–43.
2. Брюханов, О.Н. Тепломассообмен [Текст] / О.Н. Брюханов, С.Н. Шевченко. — М. : Изд-во АСВ, 2005. — 460 с.
3. Шорин, С.Н. Теплопередача [Текст] / С.Н. Шорин. — М.; Л. : Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1952. — 339 с.
4. Хижняков, С.В. Практические расчеты тепловой изоляции [Текст] / С.В. Хижняков. — М. : Энергия, 1976. — 200 с.

СЕМЕНОВ Виктор Николаевич, д-р экон. наук, проф.; E-mail: svnvgasu@mail.ru
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
САЗОНОВ Эдуард Владимирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sev@vgasu.vrn.ru
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
КИТАЕВ Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: dim.kit@rambler.ru
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
ТЕРТЬЧНЫЙ Олег Витальевич, асп.; E-mail: Vittorea@yandex.ru
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
ЩУКИНА Татьяна Васильевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: Schukina.niki@yandex.ru
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 12.07.13

Semenov Viktor Nikolaevich, doctor of economic sciences, professor; E-mail: svnvgasu@mail.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Sazonov Eduard Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sev@vgasu.vrn.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Kitaev Dmitri Nikolaevich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: dim.kit@rambler.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Tertychny Oleg Vitalievich, post-graduate student; E-mail: Vittorea@yandex.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Shchukina Tatyana Vasil'yevna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: Schukina.niki@yandex.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

THE INFLUENCE OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES ON THE DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF THERMAL NETWORKS

Discusses the impact of the structural parameters of the channel-free heat supply network on the thermal resistance of the ground. It is proved that the increase in laying depth and to reduce the distance between the pipes allow to improve the energy-saving effect when implementing channel-free systems of heat supply.

Key words: thermal networks, energy saving.

REFERENCES

1. Semenov, V.N. Energy saving and increasing energy efficiency for objects of social sphere [Text] / V.N. Semenov, D.N. Kitaev, T.V. Shchukina, D.Yu. Korolev // Energy Saving. — 2010. — N 6. — P. 38–43.
 2. Bryukhanov, O.N. Heat and mass transfer [Text] / O.N. Bryukhanov, S.N. Shevchenko. — M. : Publishing house of the ASV, 2005. — 460 p.
 3. Shorin, S.N. Heat transfer [Text] / S.N. Shorin. — M.; L. : State publishing house of literature on construction and architecture, 1952. — 339 p.
 4. Khizhnyakov, S.V. Practical calculations of thermal insulation [Text] / S.V. Khizhnyakov. — M. : Energiya, 1976. — 200 p.
-

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 625.72:528.486

Ю.В. СТОЛБОВ, С.Ю. СТОЛБОВА, Д.О. НАГАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ПРИ РАЗНЫХ ШАГАХ НИВЕЛИРОВАНИЯ

Выполнены исследования точности высотного положения (ровности) поверхностей, законченных строительством, конструктивных слоев дорожной одежды. Рассчитаны статистические характеристики действительной точности высотного положения конструктивных слоев основания и покрытия автомобильной дороги.

Установлены коэффициенты точности технологических процессов устройства конструктивных слоев дорожной одежды. На основании исследований даны рекомендации по применению шагов нивелирования (через 5, 10 или 20 м) конструктивных слоев дорожных одежд.

Ключевые слова: точность, высотное положение, ровность, вертикальные отметки, амплитуды, конструктивные слои, автомобильная дорога, основание, покрытие, дорожная одежда, допускаемые отклонения, шаг нивелирования.

При строительстве автомобильных дорог требования к точности высотного положения конструктивных слоев дорожных одежд, приведенные в [1], значительно выше, чем требования к точности их планового положения. Это определяется характером сооружения и процессами, происходящими на поверхности конструктивных слоев дорожной одежды. Если обеспечение точности планового положения отдельных конструктивных элементов автомобильных дорог особых затруднений не вызывает, то вопрос обеспечения требуемой точности высотного положения конструктивных слоев дорожных одежд требует дополнительных исследований.

В СНиП 3.06.03–85 (п.14.5) рекомендовано при приемке выполненных работ определение вертикальных отметок с шагами нивелирования 5, 10 и 20 м, но в каких случаях применяются шаги нивелирования 10 и 20 м не указывается.

В настоящей статье рассматривается исследование точности высотного положения поверхностей конструктивных слоев при устройстве дорожных одежд при разных шагах нивелирования.

При исследовании точности устройства конструктивных слоев дорожных одежд было выполнено нивелирование поверхностей по левой, правой кромкам и центру каждого конструктивного слоя дорожной одеж-

© Столбов Ю.В., Столбова С.Ю., Нагаев Д.О., 2013

ды через 5 м. Нивелирование осуществлялось из середины при установке инструмента на обочине в пределах смежных пикетов ($S = 100$ м) с применением нивелира типа Н-3 и трехметровых реек с сантиметровыми делениями. Максимальное расстояние от инструмента до реек выдерживалось $S_1 = 50$ м, а минимальное — $S_2 = 10$ м.

Среднеквадратическую погрешность определения взаимного высотного положения двух точек (разности вертикальных отметок) с одной станции нивелирования можно определить по формуле

$$m_r = \sqrt{m_{B_1}^2 + m_{B_2}^2 + m_o^2},$$

где m_{B_1} и m_{B_2} — среднеквадратические погрешности взглядов на точки 1 и 2;

m_o — среднеквадратическая погрешность несоблюдения главного условия нивелира из-за неравенства расстояний плеч ($\Delta S = S_1 - S_2$).

В этом случае максимальная среднеквадратическая погрешность определения превышений [2] при $S_1 = 50$ м — $m_{B_1} = 0,83$ мм, при $S_2 = 10$ м — $m_{B_2} = 0,62$ мм и при $\Delta S = 40$ м — $m_o = 2,0$ мм будет $m_r = 2,25$ мм.

По результатам нивелирования определены отклонения вертикальных отметок от проектных, а по их значениям вычислены амплитуды (алгебраические разности) вертикальных отметок трех смежных точек: для верхнего и нижнего слоев покрытия с шагами через 5 и 10 м, для верхнего слоя основания с шагом через 10 м, а для нижнего слоя основания и насыпи из песка с шагом через 20 м. При нивелировании трех смежных точек поверхностей конструктивных слоев дорожных одежд с шагами 5, 10 и 20 м (относительные отметки которых используются при вычислении амплитуд) разница плеч между крайними смежными точками будет соответственно составлять 10, 20 и 40 м [1].

Для нивелирования из середины трех смежных точек с шагами через 5, 10 и 20 м (необходимых для расчета амплитуд) максимальные расстояния от нивелира до реек соответственно $S_1 = 50$ м и $S_2 = 40$ м; $S_1 = 50$ м и $S_2 = 30$ м; $S_1 = 50$ м и $S_2 = 10$ м. Тогда среднеквадратические погрешности взаимного положения двух крайних точек при расчете амплитуд m_r [2] будут: для шага через 5 м $m_r = 1,24$ мм (при $m_{B_1} = 0,83$ мм, $m_{B_2} = 0,77$ мм и $m_o = 0,5$ мм); для шага через 10 м $m_r = 1,49$ мм (при $m_{B_1} = 0,83$ мм, $m_{B_2} = 0,72$ мм и $m_o = 1,0$ мм) и для шага через 20 м $m_r = 2,25$ мм (при $m_{B_1} = 0,83$ мм, $m_{B_2} = 0,62$ мм и $m_o = 2,0$ мм).

Объект исследования — участок обездной автомобильной дороги в г. Сургуте Ханты-Мансийского автономного округа, строительство которого осуществлялось в течение 2007–2009 гг.

Конструкция дорожной одежды представляет собой двухслойное покрытие и двухслойное основание, возводимые на насыпи из песка. Верхний слой покрытия — щебеноочно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) по ТУ 5718.030.01393697–99 толщиной 5 см, нижний слой покрытия — пористый асфальтобетон из горячей крупнозернистой щебеночной смеси марки I по ГОСТ 9128–97 толщиной 7 см. Верхний слой основания — черный щебень, уложенный по требованиям ВСН 123–77 толщиной 16 см, нижний слой основания — щебень фракционированный

Сводная таблица статистических характеристик и параметров распределения отклонений в вертикальных отметках точек поверхностей конструктивных слоев дорожной одежды

Конструктивный слой	Интервал между точками, м	Объем выборки	δ_h , мм	\bar{x} , мм	m , мм	M , мм	m_m , мм	a	Доверительный интервал, мм	σ
Песчаное основание	20	63	50	0,79	12,89	1,62	1,16	-2,45 < a < 4,03	10,52 < σ < 15,26	
Щебеночное основание	20	63	50	-0,07	12,61	1,59	1,13	-3,25 < a < 3,11	10,29 < σ < 14,93	
Основание из черного щебня	10	123	50	1,28	11,21	1,01	0,72	-0,70 < a < 3,26	9,75 < σ < 12,67	
Покрытие из гористого АБ	10	123	50	0,43	15,86	1,43	1,02	-2,37 < a < 3,23	13,80 < σ < 17,92	
Покрытие из гористого АБ	5	243	50	0,53	15,41	0,99	0,70	-1,41 < a < 2,47	14,02 < σ < 16,80	
Покрытие из ЦМА	10	123	50	0,77	14,89	1,34	0,95	-1,86 < a < 3,40	12,95 < σ < 16,83	
Покрытие из ЦМА	5	243	50	1,46	14,75	0,95	0,67	-0,40 < a < 3,32	13,42 < σ < 16,08	

фр. 40–70 мм, уложенный по способу заклинки по ГОСТ 8267–93 толщиной 30 см.

Оценка точности геометрических параметров конструкции слоев дорожной одежды выполнена с применением методов математической статистики и теории вероятностей [3].

В результате исследования точности устройства конструктивных слоев дорожной одежды было установлено, что распределение действительных отклонений относительных вертикальных отметок от проектных и вычисленных значений амплитуд (алгебраических разностей вертикальных отметок) в выборках подчинено закону нормального распределения. Это подтверждается критериями согласия К. Пирсона и Б.С. Ястребского, что свидетельствует о статистической однородности технологического процесса. Статистические характеристики и параметры распределения отклонений вертикальных относительных отметок от проектных и амплитуд (алгебраических разностей вертикальных отметок) точек поверхностей конструктивных слоев дорожной одежды приведены соответственно в сводных таблицах 1, 2. Приняты следующие обозначения:

\bar{x} — среднее арифметическое; m — среднеквадратическая погрешность; M — среднеквадратическая погрешность среднего арифметического; m_m — среднеквадратическая погрешность самой среднеквадратической погрешности; a — математическое ожидание; σ — среднеквадратическое отклонение; T_n — коэффициент точности технологического процесса устройства конструктивных слоев дорожных одежд; δ_h — допустимое отклонение верти-

кальных отметок от проектных (табл. 1), допустимые значения амплитуд вертикальных отметок (табл. 2).

Фактические отклонения относительных вертикальных отметок поверхности конструктивных слоев дорожной одежды от проектных соответствуют требованиям нормативного документа (СНиП 3.06.03–85).

Вычисленные значения амплитуд вертикальных отметок поверхности верхнего слоя покрытия при шаге 5 м не соответствуют нормативным требованиям, а при шаге 10 м соответствуют нормативным требованиям. Для нижнего слоя покрытия при шаге 5 м значения амплитуд вертикальных отметок не соответствуют нормативным требованиям, а при шаге 10 м близки к нормативным. Для верхнего слоя основания при шаге через 10 м значения амплитуд вертикальных отметок близки к нормативным, а для нижнего слоя основания при шаге 20 м соответствуют нормативным.

Полученные статистические характеристики точности высотного положения точек поверхности оснований и покрытий автомобильной дороги использованы для обоснования допусков на строительные и разбивочные работы при устройстве конструктивных слоев дорожной одежды.

На основании полученных результатов исследований точности высотного положения конструктивных слоев дорожной одежды с разными шагами нивелирования предложено при устройстве верхнего слоя покрытия осуществлять нивелирование с шагом через 5 м, нижнего слоя покрытия и верхнего слоя основания — с шагом через 10 м и нижнего слоя основания — с шагом через 20 м.

Таблица 2
Сводная таблица статистических характеристик и параметров распределения амплитуд вертикальных отметок точек поверхности конструктивных слоев дорожной одежды

Конструктивный слой	Интервал между точками, м	Объем выборки	δ_h , мм	\bar{x} , мм	m , мм	M , мм	m_m , мм	T_n	Доверительный интервал, мм	
									a	σ
Песчаное основание	20	57	24	0,35	8,82	1,17	0,83	2,72	-1,99 < a < 2,69	7,10 < σ < 10,54
Щебеночное основание	20	57	24	-0,49	9,92	1,31	0,94	2,42	-3,11 < a < 2,13	7,99 < σ < 11,85
Основание из черного щебня	10	117	12	0,19	7,64	0,71	0,50	1,57	-1,22 < a < 1,60	6,62 < σ < 8,66
Покрытие из пористого АБ	10	117	12	0,19	7,31	0,68	0,48	1,64	-1,16 < a < 1,54	6,33 < σ < 8,29
Покрытие из пористого АБ	5	237	7	-0,01	6,07	0,39	0,28	1,15	-0,77 < a < 0,75	5,51 < σ < 6,63
Покрытие из ЦМА	10	117	12	-0,22	6,11	0,57	0,40	1,96	-1,35 < a < 0,91	5,29 < σ < 6,93
Покрытие из ЦМА	5	237	7	-0,19	5,95	0,39	0,27	1,18	-0,95 < a < 0,57	5,40 < σ < 6,50

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 3.06.03–85. Автомобильные дороги. Госстрой СССР [Текст]. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 106 с.
2. Практическое пособие по метрологическому обеспечению строительного производства [Текст]. — М. : Стройиздат, 1975. — 64 с.
3. Столбов, Ю.В. Исследование точности высотного положения поверхности верхнего слоя покрытия автомобильных дорог [Текст] / Ю.В. Столбов, Д.О. Нагаев, С.Ю. Столбова // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 4. — С. 53–60.

СТОЛБОВ Юрий Викторович, д-р техн. наук, проф.

*Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),
г. Омск*

СТОЛБОВА Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доц.

*Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),
г. Омск*

НАГАЕВ Дмитрий Олегович, асп.

*Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),
г. Омск*

Получено после доработки 02.07.13

Stolbov Yury Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

Stolbova Svetlana Yuryevna, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

Nagaev Dmitry Olegovich, post-graduate student, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

RESEARCH OF ACCURACY OF HIGH-RISE POSITION OF SURFACES OF CONSTRUCTIVE LAYERS OF ROAD CLOTHES AT DIFFERENT STEPS OF LEVELLING

Researches of accuracy of high-rise position (flatness) of the surfaces finished by building, constructive layers of road clothes are executed. Statistical characteristics of the valid accuracy of high-rise position of constructive layers of the basis and a highway covering are calculated.

Factors of accuracy of technological processes of the device of constructive layers of road clothes are established. On the basis of researches recommendations about application of steps of leveling (through 5, 10 or 20 m) constructive layers of road clothes.

Key words: accuracy, high-rise position, flatness, vertical marks, amplitudes, constructive layers, highway, the basis, covering, road clothes, permissible deviations, leveling step.

REFERENCES

1. CN&R 3.06.03–85. Highways. Gosstroy of the USSR [Text]. — M. : CITP of Gosstroy of the USSR, 1985. — 106 p.
2. Practical grant on metrological maintenance of building manufacture [Text]. — M. : Stroyizdat, 1975. — 64 p.
3. Stolbov, Yu.V. Research of accuracy of high-rise position of a surface of the top coat layer of highways [Text] / Yu.V. Stolbov, D.O. Nagaev, S.Yu. Stolbova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 4. — P. 53–60.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Г.В. ГЛАДЫШЕВ, Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ,
А.С. ДЕДОВ, П.В. ЧУБАРОВ

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМОУДАРНОГО МЕХАНИЗМА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПРОТОЧНЫМИ КАМЕРАМИ

Рассматриваются результаты физико-математического моделирования дроссельного пневмоударного механизма с дополнительными управляемыми объемами проточных камер с общей распределительной предкамерой сетевого воздуха.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, ударник, управляемая проточная камера, присоединенный объем, предкамера, камера рабочего хода, камера холостого хода.

Введение. В работе [1] рассматривались устройство, рабочий процесс, физико-математическое описание, ограничения и допущения к описанию дроссельного пневмоударного механизма по патенту [2].

В предлагаемой работе приводятся результаты моделирования механизма с общей предкамерой распределения воздуха между рабочими камерами и управляемыми камерами присоединенного объема.

Расчетная схема, физико-математическое описание и обозначения. Расчетная схема представлена на рис. 1 без центральной воздухоподводящей трубки в сравнении с техническим решением [2] и соответствует схеме пневмоударного механизма, описание которого приведено в работе [1]. Таким образом, воздухоподвод в камеру холостого хода в виде канала запуска и основного канала впуска в дополнительную управляемую камеру выполнен отдельными каналами.

Обозначения, принятые в системе уравнений для расчетной схемы ДПУМ (УК) (см. рис. 1):

h_p, h_x — протяженность каналов перепуска из проточных камер в камеры рабочего и холостого ходов;

ω_{zp}, ω_{zx} — проходные сечения площадей каналов запуска для камер рабочего и холостого ходов из предкамеры;

B, H_x — протяженность участка до начала выпуска отработавшего воздуха из камер рабочего и холостого ходов;

B_1, B_p — протяженность участка начала и окончания управлением перепуска воздуха из проточной камеры в камеру рабочего хода;

© Гладышев Г.В., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Чубаров П.В.,
2013

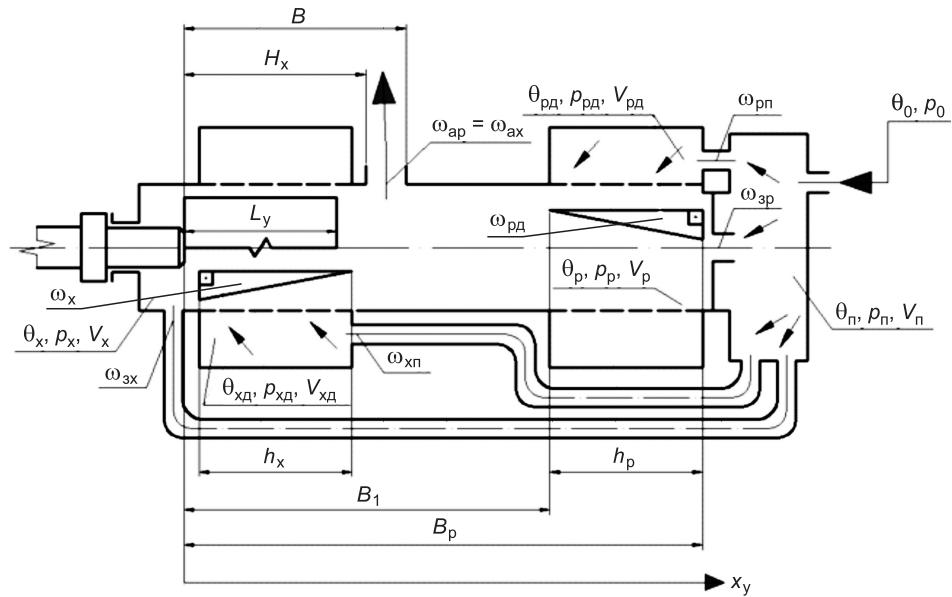


Рис. 1. Расчетная схема ДПУМ (УК) с проточными управляемыми камерами

ω_{pp} , ω_{xp} — проходные сечения площадей каналов впуска в проточные камеры рабочего и холостого ходов из предкамеры;

x_y , L_y — перемещение и длина ударника между торцевыми отсекающими кромками: $L_y = h_p = h_x$;

p_o , p_p , p_x — давление воздуха в сети сжатого воздуха, камерах рабочего и холостого ходов;

p_n — давление воздуха в предкамере;

p_{rd} , p_{xd} — давление воздуха в проточных управляемых камерах дополнительного объема;

ω_{rd} , ω_{xd} — проходные сечения каналов впуска в камеры рабочего и холостого ходов из проточных управляемых камер дополнительного объема;

ω_{po} — проходное сечение канала впуска воздуха из сети в предкамеру;

ω_{ap} , ω_{ax} — проходные сечения каналов выпуска отработавшего воздуха из камеры рабочего и холостого ходов в атмосферу (окружающее пространство);

Φ_{pp} , Φ_{xp} , Φ_{rd} , Φ_{xd} , Φ_{zp} , Φ_{zx} — бародинамические функции впуска воздуха из предкамеры в проточные камеры рабочего и холостого ходов и из проточных управляемых камер дополнительного объема в камеры рабочего и холостого ходов и каналов запуска;

Φ_{ap} , Φ_{ax} — бародинамические функции выпуска воздуха из камер рабочего и холостого ходов в атмосферу;

Φ_{po} — бародинамическая функция впуска воздуха в предкамеру из сети;

V_n , V_p , V_x , V_{rd} , V_{xd} — объемы предкамеры, камер рабочего и холостого ходов, проточных управляемых камер дополнительного объема;

$$W = (2kR / (k-1))^{1/2}, \quad (1)$$

где k — показатель баро- и термодинамического процесса,

R — газовая постоянная;

t, dt — время и его производная;

S_y — площадь диаметрального сечения;

$\omega_i(x_y)$ — функция, зависящая от координаты (положения) ударника.

Обозначения для параметров термодинамических функций, участвующих в процессе функционирования средств стабилизации параметров энергоносителя:

$\theta_o, \theta_p, \theta_x$ — температура воздуха в сети сжатого воздуха, камерах рабочего и холостого ходов;

θ_n — температура воздуха в предкамере;

θ_{pd}, θ_{xd} — температура воздуха в проточных управляемых камерах;

$\Omega_{np}, \Omega_{xp}, \Omega_p, \Omega_x, \Omega_{pd}, \Omega_{xd}, \Omega_{zp}, \Omega_{zx}$ — термодинамические функции впуска воздуха из предкамеры в проточные управляемые камеры, в камерах рабочего и холостого ходов, в проточных управляемых камерах дополнительного объема и запуска;

Ω_{po} — термодинамическая функция впуска воздуха из сети в предкамеру;

Ω_{ap}, Ω_{ax} — термодинамические функции выпуска воздуха из камер рабочего и холостого ходов в атмосферу;

k_o — коэффициент отскока ударника от инструмента;

F_h, F_{tp} — сила прижатия корпуса к трубе-коужуху и трения корпуса о грунт;

x_k — перемещение корпуса;

m_y, m_k — массы ударника и корпуса.

Учитывая одинаковую форму записи для функций типа φ , их можно записать в виде:

$$\varphi_{ji} \equiv \varphi_{ij} = \begin{cases} 0,5283 > p_i / p_j & 0,2588 p_i (\theta_i)^{1/2}, \\ 0,5283 \leq p_i / p_j & p_i (\theta_i)^{1/2} ((p_i / p_j)^{2/k} - (p_i / p_j)^{(1+k)/k})^{1/2}, \\ 0,5283 > p_j / p_i & -0,2588 p_j (\theta_j)^{1/2}, \\ 0,5283 \leq p_j / p_i & -p_j (\theta_j)^{1/2} ((p_j / p_i)^{2/k} - (p_j / p_i)^{(1+k)/k})^{1/2}. \end{cases} \quad (2)$$

Аналогично функции типа Ω можно представить в виде:

$$\Omega_{ji} \equiv \Omega_{ij} = \begin{cases} \varphi_{ij} > 0 & k - (\theta_i / \theta_j), \\ \varphi_{ij} \leq 0 & k - 1, \\ \varphi_{ji} > 0 & k - 1, \\ \varphi_{ji} \leq 0 & k - (\theta_j / \theta_i). \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, возможные изменения направлений течения воздуха будут учитываться или φ_i и Ω_i , или φ_j и Ω_j .

Силы трения ударника о корпус, в связи с различием скоростей при рабочем и холостом ходах, для простоты следует учесть через $\text{sign}F_y$. Значение скоростей ударника до удара $(dx_y/dt)_y$ и после $(dx_y/dt)_0$ определяется из уравнения для ускорений (d^2x_y/dt^2) .

Система уравнений, описывающих рабочий процесс ДПУМ (УК):
бародинамическая составляющая

$$\begin{cases} dp_{\text{п}}/dt = k/V_{\text{п}} [W(\omega_{\text{п}0}\varphi_{\text{п}0} - \omega_{\text{рп}}\varphi_{\text{рп}} - \omega_{\text{хп}}\varphi_{\text{хп}} - \\ - \omega_{\text{зп}}\varphi_{\text{зп}} - \omega_{\text{зх}}\varphi_{\text{зх}})], \\ dp_{\text{р}}/dt = k/(V_{\text{р}} - x_y S_y) [W(\omega_{\text{зп}}\varphi_{\text{зп}} - \omega_{\text{ап}}\varphi_{\text{ап}} + \omega_{\text{рд}}(x_y)\varphi_{\text{рд}}) + \\ + p_{\text{р}}(dx_y/dt)S_y], \\ dp_{\text{x}}/dt = k/(V_{\text{x}} + x_y S_y) [W(\omega_{\text{зх}}\varphi_{\text{зх}} - \omega_{\text{ax}}\varphi_{\text{ax}} + \omega_{\text{хд}}(x_y)\varphi_{\text{хд}}) - \\ - p_{\text{x}}(dx_y/dt)S_y], \\ dp_{\text{рд}}/dt = k/V_{\text{рд}} [W(\omega_{\text{рп}}\varphi_{\text{рп}} - \omega_{\text{рд}}(x_y)\varphi_{\text{рд}})], \\ dp_{\text{хд}}/dt = k/V_{\text{хд}} [W(\omega_{\text{хп}}\varphi_{\text{хп}} - \omega_{\text{хд}}(x_y)\varphi_{\text{хд}})]; \end{cases} \quad (4)$$

термодинамическая составляющая

$$\begin{cases} d\theta_{\text{п}}/dt = \theta_{\text{п}}/(V_{\text{п}} p_{\text{п}}) [W(\omega_{\text{п}0}\varphi_{\text{п}0}\Omega_{\text{п}0} - \omega_{\text{рп}}\varphi_{\text{рп}}\Omega_{\text{рп}} - \\ - \omega_{\text{хп}}\varphi_{\text{хп}}\Omega_{\text{хп}} - \omega_{\text{зп}}\varphi_{\text{зп}}\Omega_{\text{зп}} - \omega_{\text{зх}}\varphi_{\text{зх}}\Omega_{\text{зх}})], \\ d\theta_{\text{р}}/dt = \theta_{\text{р}}/((V_{\text{р}} - x_y S_y)p_{\text{р}}) [W(\omega_{\text{зп}}\varphi_{\text{зп}}\Omega_{\text{зп}} - \omega_{\text{ап}}\varphi_{\text{ап}}\Omega_{\text{ап}} + \\ + \omega_{\text{рд}}(x_y)\varphi_{\text{рд}}\Omega_{\text{рд}} + (k-1)p_{\text{р}}(dx_y/dt)S_y)], \\ d\theta_{\text{x}}/dt = \theta_{\text{x}}/((V_{\text{x}} + x_y S_y)p_{\text{x}}) [W(\omega_{\text{зх}}\varphi_{\text{зх}}\Omega_{\text{зх}} - \omega_{\text{ax}}\varphi_{\text{ax}}\Omega_{\text{ax}} + \\ + \omega_{\text{хд}}(x_y)\varphi_{\text{хд}}\Omega_{\text{хд}}) - (k-1)p_{\text{x}}(dx_y/dt)S_y], \\ d\theta_{\text{рд}}/dt = \theta_{\text{рд}}/(V_{\text{рд}} p_{\text{рд}}) [W(\omega_{\text{рп}}\varphi_{\text{рп}}\Omega_{\text{рп}} - \omega_{\text{рд}}(x_y)\varphi_{\text{рд}}\Omega_{\text{рд}})], \\ d\theta_{\text{хд}}/dt = \theta_{\text{хд}}/(V_{\text{хд}} p_{\text{хд}}) [W(\omega_{\text{хп}}\varphi_{\text{хп}}\Omega_{\text{хп}} - \omega_{\text{хд}}(x_y)\varphi_{\text{хд}}\Omega_{\text{хд}})]; \end{cases} \quad (5)$$

баромеханическая составляющая

$$\begin{cases} d^2x_y/dt^2 = S_y(p_{\text{x}} - p_{\text{р}})/m_y & \text{при } x_y - x_{\text{k}} > 0, \\ (dx_y/dt)_o = (dx_{\text{k}}/dt)_y(m_{\text{k}}(1+k_o)/(m_y + m_{\text{k}})) + \\ + (dx_y/dt)_y((m_y - k_o m_{\text{k}})/(m_y + m_{\text{k}})) & \text{при } x_y - x_{\text{k}} \leq 0, \\ d^2x_{\text{k}}/dt^2 = (S_y(p_{\text{x}} - p_{\text{р}}) - F_{\text{tp}} - F_{\text{h}})/m_{\text{k}} & \text{при } x_y - x_{\text{k}} > 0, \\ (dx_{\text{k}}/dt)_o = (dx_{\text{k}}/dt)_y((m_{\text{k}} - k_o m_y)/(m_y + m_{\text{k}})) + \\ + (dx_y/dt)_y(m_y(1+k_o)/(m_y + m_{\text{k}})) & \text{при } x_y - x_{\text{k}} \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Графическое представление результатов исследования рабочего процесса. Осциллограммы изменений давлений воздуха в камерах рабочего ($p_{\text{р}}(t)$), холостого ($p_{\text{x}}(t)$) ходов и дополнительных проточных управляемых объемов рабочих камер — со стороны рабочего ($p_{\text{рд}}(t)$) и холостого ходов ($p_{\text{хд}}(t)$), а также перемещение ($x_y(t)$) и скорость ($u(t)$) ударника устойчивы на всем протяжении рабочего процесса, начиная со 2-го цикла после запуска.

Показательно заполнение дополнительных проточных управляемых объемов рабочих камер с установившимся давлением воздуха в предкамере до значения сетевого с последующим его понижением до давления в проточных камерах рабочего и холостого ходов с некоторым повышением после смешения воздуха при сообщении камер между собой, что иллюстрируется поведением зависимости $p_{\text{р}}(t)$, $p_{\text{рд}}(t)$, $p_{\text{x}}(t)$, $p_{\text{хд}}(t)$ на рис. 2.

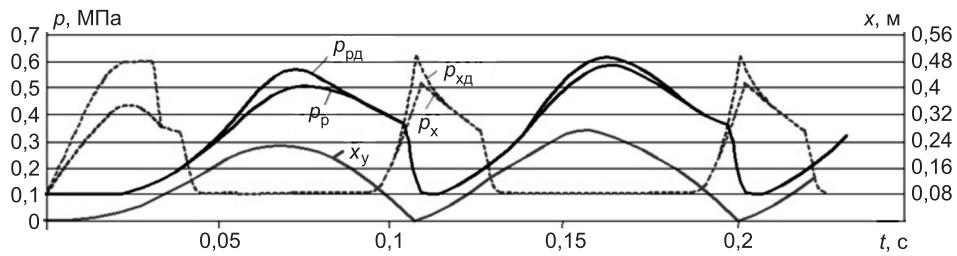


Рис. 2. Осциллограмма параметров ДПУМ (УК)

Объем воздуха, потребляемый ДПУМ (УК) за цикл (рис. 3), меньше ДПУМ на 15,14 %. Отметим, что снижение сил отдачи у ДПУМ (УК) снижает отход назад пневмодвижителя и увеличивает скорость как ударника (рис. 4), так и прокладки новой трубы-кожуха.

Из результатов исследования ДПУМ (УК) следует, что для рациональных соотношений V_p / V_x , $\omega_{\text{рд}} / \omega_{\text{хд}}$ при давлении воздуха в сети от $p_0 = 0,4$ МПа до $p_0 = 0,7$ МПа (через 0,1 МПа) процессы изменения давления в представлениях $(p - V)_x$ и $(p - V)_p$ как для камер холостого хода, так и рабочего являются подобными, т. е. их тенденции изменения близки к процессам, происходящим при $p_0 = 0,6$ МПа, что подтверждается численными исследованиями при физико-математическом моделировании рабочего процесса в камерах ДПУМ (УК).

Сходимость общих расходов воздуха на впуске и выпуске использовалась в качестве контроля соответствия баро- и термодинамического процессов, качественного и количественного представления физико-математической модели ДПУМ (УК), а также степени точности ее описания при решении системы уравнений.

КПД использования внутренней энергии воздуха в рабочих камерах. Для целей определения бародинамического и термодинамического КПД использования сжатого воздуха применен подход, предложен-

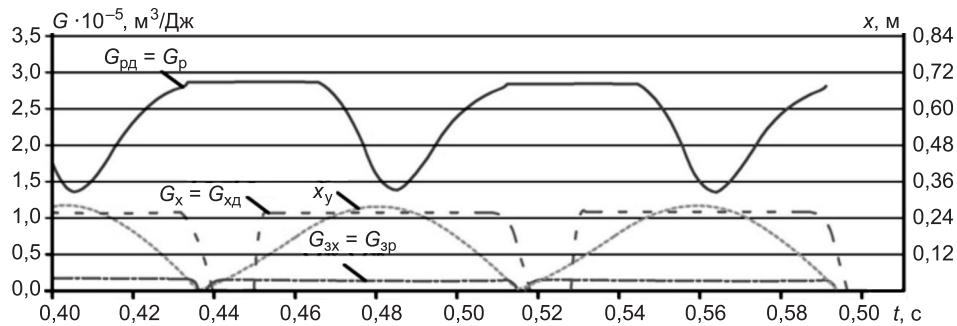


Рис. 3. Осциллограммы расхода воздуха (G) ДПУМ (УК)

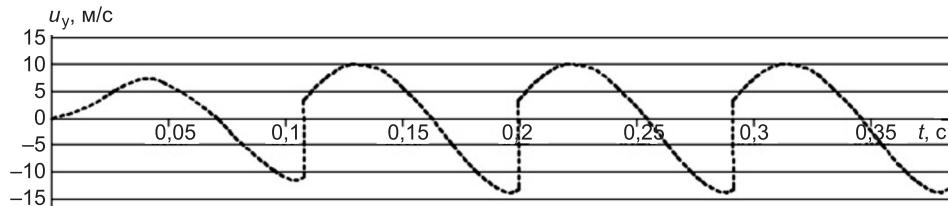


Рис. 4. Изменение скорости ударника ДПУМ (УК)

ный в работе [3]. При этом использовались диаграммы изменения давления воздуха в рабочих камерах, представленных графиками на рис. 2. Как и в работе [3], значение бародинамического КПД определялось зависимостью

$$\eta_{pi} = \frac{p_{\max i} - p_{\text{вып}i}}{p_{\max i}} \quad (7)$$

и термодинамического КПД зависимостью

$$\eta_{\theta i} = \frac{\theta_{\max i} - \theta_{\text{вып}i}}{\theta_{\max i}}. \quad (8)$$

Графические зависимости для изменения температур θ_i в рабочих камерах и соответствующих им параметров давления воздуха p_i , расхода воздуха G_i и хода ударника x_y представлены на рис. 5 (индексы см. на рис. 2) в функции времени для характерных рабочих циклов в камерах при рабочем (a) и холостом (б) ходах ударника.

Представляет научный и практический интерес работа дополнительного проточного управляемого объема рабочих камер в момент сообщения с камерой холостого хода. Так, для термодинамического КПД в этом случае значение составляет 0,127. К окончанию сообщения камер КПД 0,143. При сообщении камер с атмосферой КПД равен 0,444.

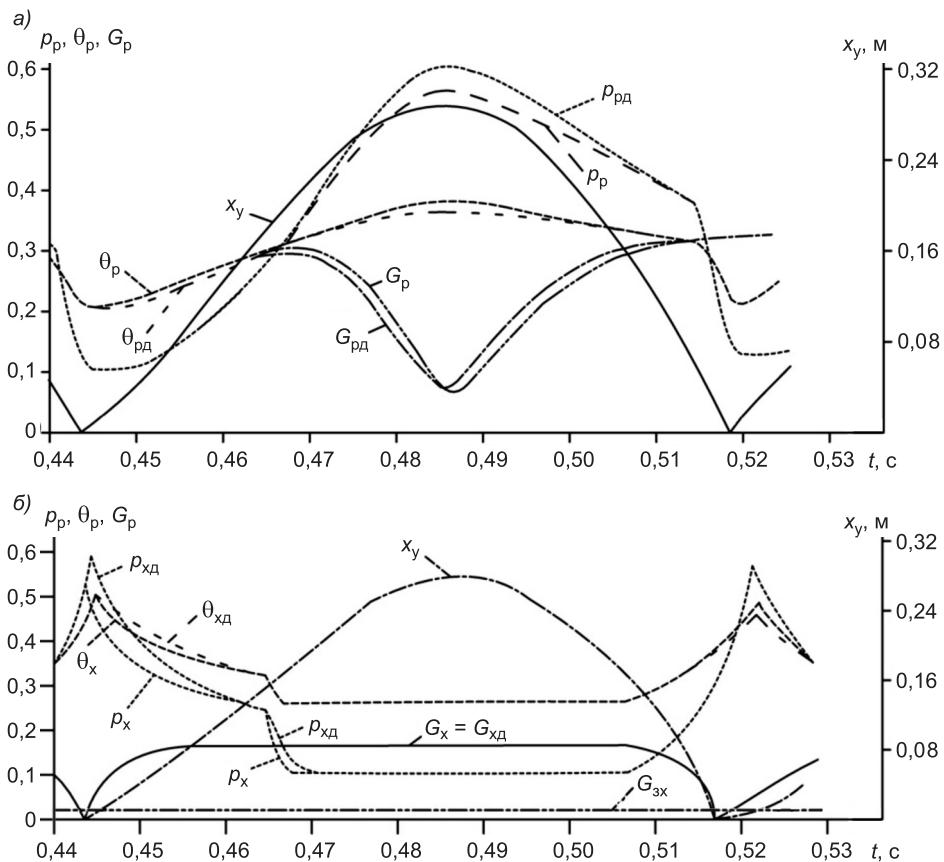


Рис. 5. Процессы в камерах ДПУМ (УК)
a — камера рабочего хода; б — камера холостого хода

Таким образом, с начала сообщения с камерой холостого хода до выпуска отработавшего воздуха в атмосферу КПД системы меняется в 3,496 раза. Только за время (период) сообщения камер между собой КПД проточной камеры дополнительного объема изменяется до 6,845 раз, что характеризует интенсивную передачу силовой энергии воздуха проточной камеры дополнительного объема камере холостого хода. Однако отметим, что камера рабочего хода в ДПУМ (УК) для случая рабочего хода обменяется тепловой энергией с атмосферой при КПД 0,417, что для ДПУМ составляет только около 0,258.

Следовательно, обмен проточной камеры дополнительного объема и холостого хода тепловой энергией в ДПУМ (УК) с атмосферой происходит при большем ее значении в 1,62 раза, а значит и с большим термодинамическим КПД, в сравнении с камерой рабочего хода в ДПУМ (УК) и ДПУМ.

Для бародинамического КПД ДПУМ (УК) проточной камеры дополнительного объема отметим следующие особенности.

Бародинамический КПД в проточной камере дополнительного объема ДПУМ (УК) выше в сравнении с началом соединения с проточной камерой дополнительного объема только до 4 %, а в сравнении с началом выпуска в атмосферу в 2,52 раза превышает КПД к началу сообщения проточных камер дополнительного объема с камерой холостого хода.

Выводы. Снижение или увеличение противодавления в камере рабочего хода позволяет также изменять величину хода ударника при том же расчетном импульсе давления воздуха со стороны камеры холостого хода при холостом ходе ударника, изменять длину участка его разгона без увеличения времени цикла, поскольку время рабочего хода ударника увеличивается за счет изменяемого импульса со стороны камеры дополнительного объема, что способствует увеличению ударной мощности и снижению удельного расхода воздуха дроссельной пневмоударной машины для погружения труб-кожухов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков, Д.Э. Дроссельные пневмоударные механизмы с управляемыми проточными камерами присоединенного объема [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Г.В. Гладышев, П.В. Чубаров // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 11–12. — С. 73–82.
2. Пат. № 2417874 РФ. Пневматический молот с дроссельным воздухораспределением [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Г.В. Гладышев, В.Ю. Еременко, А.А. Кутумов, Ю.Э. Малышева, М.А. Федоров. — БИ, 2011. — № 13.
3. Абраменков, Д.Э. О применении бародинамического и термодинамического КПД для оценки совершенства рабочего процесса пневматического механизма машин ударного действия [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 7. — С. 75–82.

ГЛАДЫШЕВ Григорий Владимирович, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

*ДЕДОВ Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*
*ЧУБАРОВ Павел Валерьевич, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 01.07.13

Gladyshev Grigory Vladimirovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Abramenkov Dmitry Eduardovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Abramenkov Eduard Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Dedov Alexey Sergeevich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Chubarov Pavel Valeryevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

RESULTS OF WORKING PROCESS PHYSICAL-MATHEMATICAL MODELS PNEUMOSHOCK MECHANISM WITH EXTRA FLOW CHAMBER

Examine the results of physico-mathematical modeling of air percussion throttle mechanism with additional controls the amount of flow chambers with a total distribution network pre-chamber air.

Key words: pneumatic percussion mechanism, hammer, controlled flow chamber, attached volume, pre-chamber, the chamber stroke, the camera is idle.

REFERENCES

1. Abramenkov, D.E. Butterfly pneumatic percussion mechanism with controlled flow chamber attached volume [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, G.V. Gladyshev, P.V. Chubarov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 11–12. — P. 73–82.
2. Patent 2417874 Russian Federation. Air Hammer with control of air distribution [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, G.V. Gladyshev, V.Yu. Eremenko, A.A. Kutumov, Yu.E. Malysheva, M.A. Fedorov. — BI, 2011. — N 13.
3. Abramenkov, D.E. On the application bardynamic and thermodynamic efficiency for assessing excellence workflow pneumatic percussion mechanism machines [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 7. — P. 75–82.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 691-492.2.002.612

С.П. БАРДАХАНОВ, В.Н. ГОВЕРДОВСКИЙ, Д.Ю. ТРУФАНОВ,
А.М. ПАВЛЕНКО, М.В. МИХАЭЛИС

РАЗДЕЛЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ В СУСПЕНЗИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЪЕМНОЙ СИЛЫ*

Проведены исследования по разделению наноразмерных частиц порошка диоксида кремния «Таркосил» в водной суспензии под действием объемной силы. Описаны методы проведения экспериментов и найдены зависимости изменения удельной поверхности от ускорения действующей силы и от длительности этого воздействия. Обобщение полученных результатов позволяет прогнозировать изменение удельной поверхности частиц, оставшихся в суспензии, от воздействия на нее объемной силы.

Ключевые слова: нанопорошок, суспензия, удельная поверхность, распределение частиц.

Введение. Наножидкости (суспензии на основе нанопорошков) имеют потенциально широкий спектр применения. Поэтому возрос интерес к всестороннему изучению свойств суспензий и установлению моделей взаимодействия их элементов. Тогда на основе таких моделей можно управлять полезными качествами наножидкостей и соответственно объектов, где они могут применяться.

Свойства наножидкостей могут существенно отличаться от свойств исходных «чистых» жидкостей. Во многом это связано с поверхностным взаимодействием наночастиц и молекул жидкости. Стабильность таких суспензий зависит от ряда механических факторов, в частности, от интенсивности броуновского движения. При изучении такого движения наноразмерных частиц необходимо учитывать значительную удельную поверхность и малые значения масс частиц, объемную силу, смачиваемость и способность частиц агломерироваться. Все эти факторы влияют на ключевые для применения наножидкости свойства: вязкость, плотность, стабильность и т.д.

Данная работа посвящена моделированию и изучению динамических процессов, приводящих к осаждению наноразмерных частиц. Это позволит получить необходимые данные для понимания механизмов взаимодействия частиц с наножидкостью.

Экспериментальная часть. Для экспериментов была приготовлена водная суспензия с 4%-м массовым содержанием нанопорошка диоксида кремния «Таркосил». Нанопорошок был получен методом испарения

* Работа выполнена при поддержке гранта 8020 Министерства образования и науки РФ и Междисциплинарного проекта СО РАН № 36.

© Бардаханов С.П., Говердовский В.Н., Труфанов Д.Ю., Павленко А.М., Михаэлис М.В., 2013

исходного вещества пучком высокoenергетических электронов [1]. Удельная поверхность нанопорошка $135 \text{ м}^2/\text{г}$, средний размер его частиц 20 нм. После диспергирования наночастицы диоксида кремния агломерируются. Поэтому соединение более мелких частиц с крупными в суспензии приводит к искажению распределения наночастиц по размерам и влияет на процесс их последующего разделения. Для разрушения агломератов было применено ультразвуковое воздействие с заданными параметрами. Наножидкость в течение 30 мин подвергалась такому воздействию мощностью 700 Вт. Дальнейшее воздействие ультразвуком не приводит к разрушению оставшихся агломератов. Вероятно, даже после длительной ультразвуковой обработки часть агломератов в суспензии не разрушается. Такое же предположение сделано на основе изучения вязкости суспензий с применением аналогичных нанопорошков [2].

Далее суспензия, содержащая нанопорошки «Таркосил», подвергалась воздействию с центробежным ускорением до $4800 \text{ м}/\text{с}^2$ в течение 1, 2, 4 и 6 ч. После удаления осадка из раствора, каждый из образцов был просушен и прокален для полного удаления влаги. Поверхность полученных таким образом наночастиц измерялась методом адсорбции и десорбции газов (метод БЭТ). Проведенные эксперименты показывают рост удельной поверхности наночастиц, оставшихся в суспензии, в зависимости от времени воздействия с постоянным ускорением (рис. 1). У нанопорошков, извлеченных из раствора, после сушки и прокаливания осадка удельная поверхность увеличилась в зависимости от времени нахождения суспензии в центрифуге и составила 178 и 198 $\text{м}^2/\text{г}$ для 250 и 360 мин воздействия соответственно. Это привело к уменьшению среднего размера наночастиц в суспензии с 20 до 14 нм.

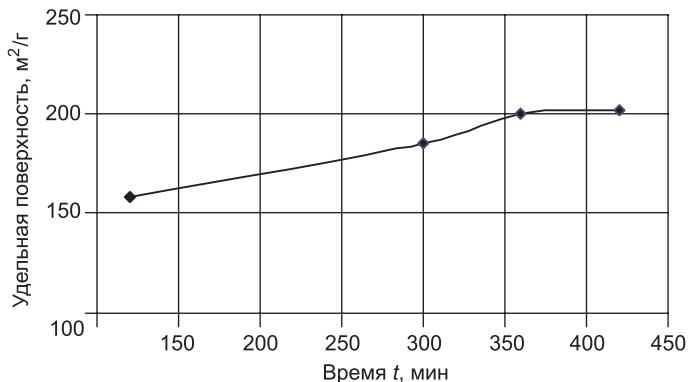


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности наночастиц от времени воздействия на суспензию

Дальнейшее увеличение времени воздействия до 420 мин с постоянным ускорением к заметному изменению удельной поверхности не привело. Вероятно, это связано с тем, что за столь длительные промежутки времени (более 5 ч) наночастицы в суспензии успевали вновь коагулировать. Такие агломераты могут включать в себя практически весь спектр наночастиц, и последующее осаждение существенно не изменяет их распределение по размерам.

Чтобы минимизировать эффект коагуляции, в последующих экспериментах разделение наночастиц в центрифуге проходило за существенно

меньшие промежутки времени. В этих экспериментах время выхода на режим и время полной остановки центрифуги существенно увеличилось и стало сопоставимо со временем воздействия на стационарном режиме. На рис. 2 представлена зависимость количества оборотов от времени при нулевой выдержке образца суспензии (при достижении максимума оборотов центрифуга отключалась). На данном рисунке видно, что суммарное время динамического воздействия на образец на переходном режиме сопоставимо со временем стационарного режима.

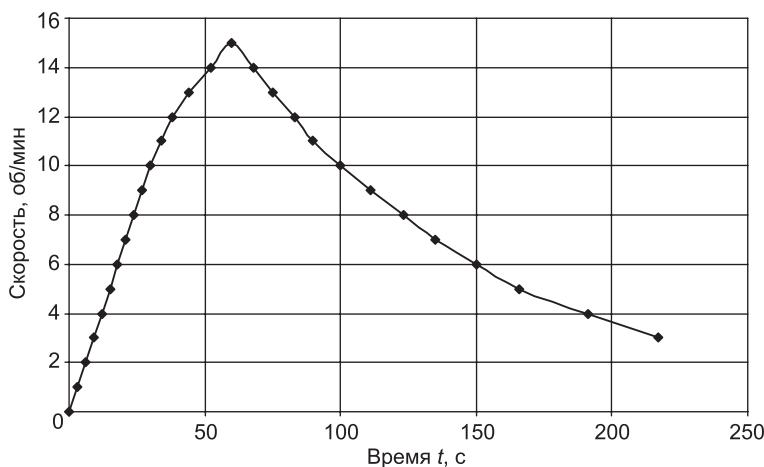


Рис. 2. Зависимость скорости вращения от времени на переходных режимах (выход на стационарный режим и остановка ротора центрифуги)

Для сравнительного анализа были проведены исследования осаждения наночастиц при различных значениях ускорения, но при постоянном времени воздействия на суспензию. Выполнено несколько серий экспериментов. Чтобы достичь близких результатов с первой серией экспериментов и получить удельную поверхность наночастиц около $200 \text{ м}^2/\text{г}$, во второй группе экспериментов было существенно увеличено осаждающее ускорение.

Сначала было определено время воздействия, которое в состоянии выдержать суспензия без полного осаждения при скорости вращения ротора центрифуги 15 000 об/мин. Установлено, что нанопорошок полностью осаждается из водной суспензии при воздействии на него с ускорением $\sim 23\ 550 \text{ м}/\text{с}^2$ (скорость 15 000 об/мин) в течение 30 мин. Высущенная суспензия не имела осадка. При воздействии того же ускорения, но в течение 15 мин, наблюдалось слабое замутнение раствора. Это время было выбрано как максимальное для проведения последующих экспериментов этой серии, а на скорости 15 000 об/мин достигалось максимальное значение ускорения. Результаты измерений приведены на рис. 3, причем при максимальном по длительности воздействии удалось увеличить удельную поверхность нанопорошка со 135 до 200 $\text{м}^2/\text{г}$.

На следующем этапе проведен эксперимент, позволивший оценить влияние времени выдержки образца суспензии на максимальных оборотах ротора центрифуги на удельную поверхность наночастиц порошка. Для этого образец подвергался воздействию с максимальным центробежным ускорением $23\ 550 \text{ м}/\text{с}^2$. При этом время, при котором образец подвергался воздействию, варьировалось. Были проведены измерения удельной поверхности наночастиц при диспергировании с выдержкой 5, 7, 10,

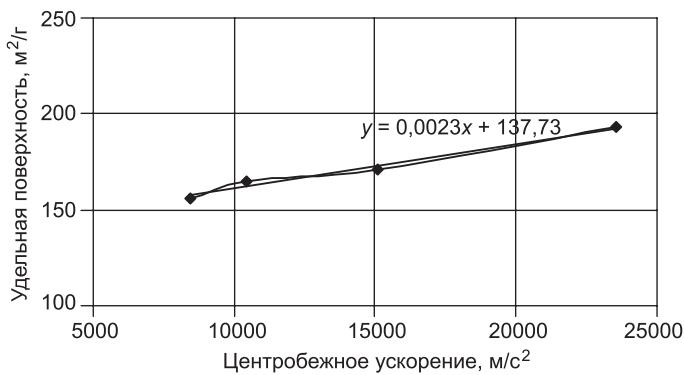


Рис. 3. Зависимость удельной поверхности наночастиц от величины центробежного ускорения

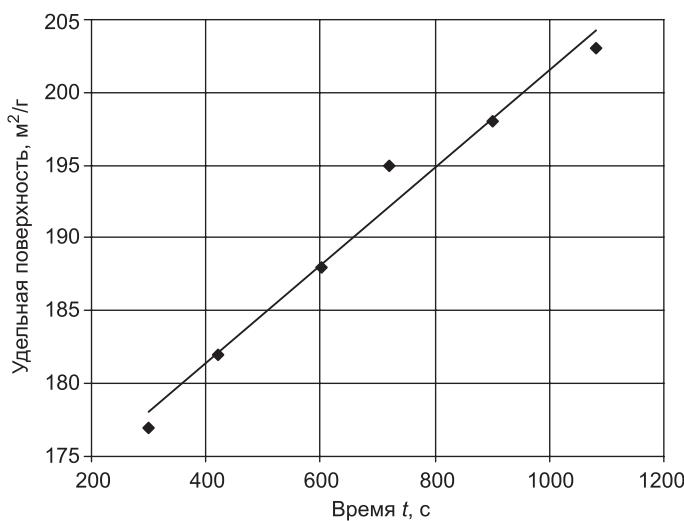


Рис. 4. Зависимость удельной поверхности наночастиц от времени центрифугирования

12, 15 и 18 мин (без учета разгона и торможения). Данная зависимость представлена на рис. 4.

В процессе анализа полученных экспериментальных результатов было принято предположение, что функция $S(a, t)$ изменения удельной поверхности наночастиц имеет вид

$$S = C_1 at^n + C_2, \quad (1)$$

здесь C_1 и C_2 — некоторые константы;

n — некоторое реальное число;

a — ускорение, равное ωR (ω — частота вращения ротора центрифуги; R — радиус ротора);

t — время воздействия на суспензию.

В связи с этим необходимо учесть время воздействия на суспензию на переходных режимах (периоды разгона и торможения ротора центрифуги). Для этого нужно получить «константную добавку» к функции $S[a, t]$: интеграл по времени от функции $S[a(t), t]$. Характеристика, используемая для анализа зависимости $a(t)$, представлена на рис. 2.

Пусть в первом приближении $n = 1$. На рис. 5 показана экспериментальная зависимость измененной удельной поверхности S наночастиц от 100

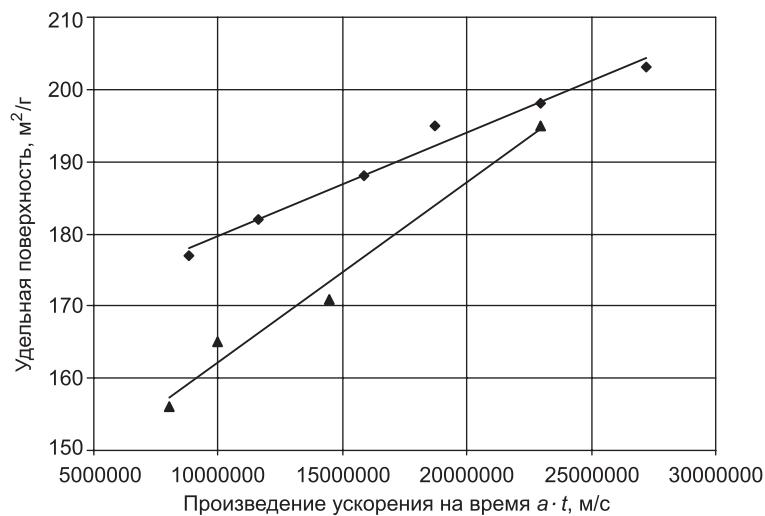


Рис. 5. Зависимость удельной поверхности наночастиц, оставшихся в суспензии, от произведения ускорения на время воздействия

$a \cdot t$, с учетом времени разгона и торможения центрифуги. Видно, что прямые, соответствующие зависимостям удельной поверхности от времени (см. рис. 4) и от ускорения (см. рис. 5), не совпадают друг с другом. Следовательно, произведение ускорения на время не может быть величиной, однозначно указывающей на изменение удельной поверхности.

Далее определен такой показатель степени n , при котором прямые совпали бы с точностью до погрешности измерения удельной поверхности. Такая зависимость представлена на рис. 6 и соответствует значению $n = 2/3$. В этом случае зависимость удельной поверхности наночастиц от ускорения и времени выдержки на заданном режиме воздействия будет следующей:

$$S = 2 \cdot 10^{-5} a t^{2/3} + 140. \quad (2)$$

Однако зависимость (2) была бы не вполне обоснованной без, по меньшей мере, еще одной (контрольной) серии экспериментов. Для кон-

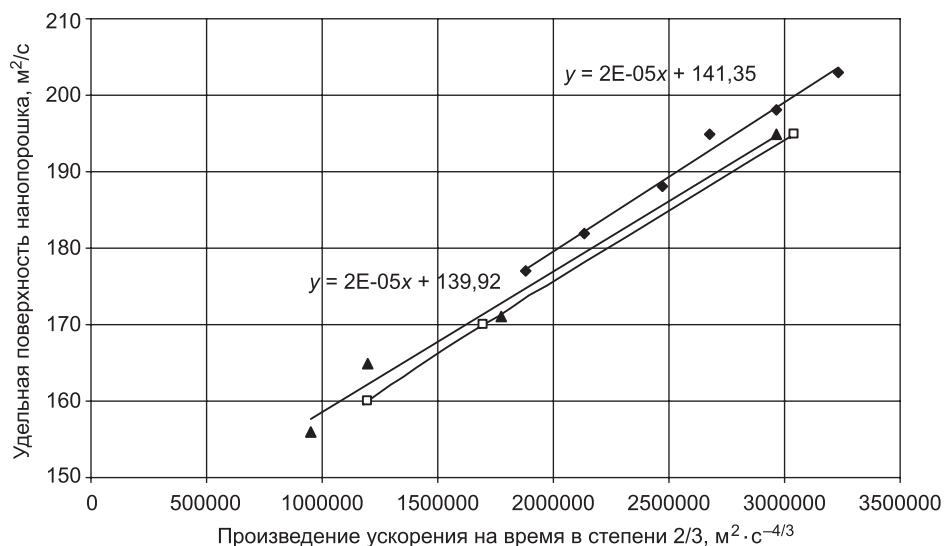


Рис. 6. Проверка численной зависимости (2) с помощью контрольной серии экспериментов

трольной серии была выбрана частота вращения ротора центрифуги 14 000 об/мин, что соответствует центробежному ускорению 20 514 м/с². Было проведено три измерения удельной поверхности наночастиц после воздействия на суспензию на стационарных режимах с максимальным временем выдержки, равным 22 мин. На рис. 6 результаты контрольной серии экспериментов показаны полыми квадратными маркерами. Видно, что полученная зависимость (2) вполне корректна.

Выводы. Эксперименты показали, что под действием объемной силы в водной суспензии происходит разделение агломератов наночастиц порошков по размерам. Найдена численная зависимость изменения удельной поверхности нанопорошков диоксида кремния «Таркосил», оставшихся в суспензии после центрифугирования, от характеристик динамического воздействия (произведения ускорения на время воздействия). Важным результатом является также то, что в полученной зависимости «константная добавка» 140 в уравнении — достаточно близка величине удельной поверхности исходного нанопорошка (135 м²/г). Это дает возможность предположить, что зависимость верна вплоть до границ диапазона воздействия, когда ускорение или время воздействия объемной силы равны нулю.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bardakhanov, S.P. Nanopowder production based on technology of solid raw substances evaporation by electron beam accelerator [Текст] / S.P. Bardakhanov, A.I. Korchagin, N.K. Kuksanov, A.V. Lavrukhin, R.A. Salimov, S.N. Fadeev, V.V. Cherepkov // Elsevier, Mater. Sci. Eng. B. — 2006. — Vol. 132. — P. 204–208.
2. Завьялов, А. Взаимодействие частиц диоксида кремния с полимерами [Текст] / А. Завьялов, Т. Брусенцова, Л. Викулина, С. Бардаханов, Т. Чимытов, В. Сызранцев // Наноиндустрия. — 2013.— Т. 1, № 39. — С. 32–35.

БАРДАХАНОВ Сергей Прокопьевич, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: bard@itam.nsc.ru

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

ГОВЕРДОВСКИЙ Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ТРУФАНОВ Дмитрий Юрьевич, канд. физ.-мат. наук; E-mail: trufanov@itam.nsc.ru

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

ПАВЛЕНКО Александр Михайлович, канд. физ.-мат. наук

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

МИХАЭЛИС Михаил Вячеславович, асп.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

Получено 15.07.13

Bardakhanov Sergey Prokopevich, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: bard@itam.nsc.ru, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Goverdovsky Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Trufanov Dmitriy Yuryevich, candidate of physical and mathematical sciences; E-mail: trufanov@itam.nsc.ru, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Pavlenko Alexander Mihailovich, candidate of physical and mathematical sciences, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Mihaelis Mikhail Vyacheslavovich, post-graduate student, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

SEPARATION OF NANOSCALE PARTICLES IN SUSPENSION UNDER THE BODY FORCE ACTION

Separation of the «Tarkosil» silica nanoparticles has been studied in an aqueous suspension under the body force. The methods of experiments are described, and a numerical relation between the specific surface, body force acceleration of the nanoparticles and the force operation time are formulated. A generalization of the results obtained allows predicting a change of the surface area of the nanoparticles, remaining in the suspension, after a certain body force effecting.

Key words: nanopowder, suspension, specific surface, separation particles.

REFERENCES

1. Bardakhanov, S.P. Nanopowder Production based on Technology of Solid Raw Substances Evaporation by Electron Beam Accelerator [Text] / S.P. Bardakhanov, A.I. Korchagin, N.K. Kuksanov, A.V. Lavrukhin, R.A. Salimov, S.N. Fadeev, V.V. Cherepkov // Elsevier, Mater. Sci. Eng. B. — 2006. — Vol. 132. — P. 204–208.
 2. Zav'yalov, A. The interaction of silica particles with polymers [Text] / A. Zav'yalov, T. Brusencova, L. Vikulina, S. Bardakhanov, T. Chimitov, V. Syzrancev // Nanoindustry. — 2013. — Vol. 1, N 39. — P. 32–35 (In Russia).
-

УДК 69.003:65.014.001.24

Ю.Б. КАЛУГИН

**ОСОБЕННОСТИ И СУЩНОСТЬ РАСЧЕТА
ВЕРОЯТНОСТНЫХ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ОТДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ (ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА)**

Изложены особенности расчета вероятностных временных параметров технологического процесса. Впервые установлен эффект влияния вероятностных временных параметров работы на достоверность сроков ее выполнения. Получен закон распределения продолжительности работы в зависимости от производительности комплекса.

Ключевые слова: достоверность планов, вероятностные временные параметры, математическое ожидание, прогнозирование сроков.

Известно, что точность и достоверность календарного планирования зависят в первую очередь от точности определения параметров соответствующих технологических процессов (отдельных работ).

Существующие методы определения продолжительности отдельной работы с детерминированными временными оценками основаны (в той или иной степени) на следующей зависимости:

$$t_i = \frac{V_i}{\Pi_i}, \quad (1)$$

где t_i — искомая продолжительность i -й работы;

V_i — объем i -й работы;

Π_i — производительность команды (бригады) (выработка, производственные возможности) при выполнении i -й работы.

Под воздействием дестабилизирующих факторов производительность команды (технологического комплекса), находящаяся в знаменателе зависимости (1), приобретает вероятностный характер, выражаемый соответствующим законом распределения.

Пусть, например, объем фронта работ (величина захватки) составляет 350 м. Производительность команды (бригады) подчиняется равномерному закону и имеет следующие равновероятные значения 100, 200, 300, 400, 500, 600 м/см. Математическое ожидание (среднее значение производительности) — 350 м/см. Тогда, с учетом зависимости (1) продолжительность выполнения работ на захватке составит одну смену.

В случае же вероятностных временных параметров равномерного закона равновероятные значения продолжительности представляют следующий ряд: 350/100; 350/200; 350/300; 350/400; 350/500; 350/600 или 3,5; 1,75; 1,167; 0,875; 0,7; 0,583. Среднее значение продолжительности — 1,429 см. Это означает, что уже на стадии определения продолжительности выполнения одной работы использование зависимости (1) с детерминированными параметрами заведомо занижает средние сроки ее

выполнения. Для данного случая (равномерного закона распределения) эта величина составила 43 %.

Реальные распределения производительности технологического комплекса для различных условий соответствуют в основном нормальному закону. В условиях различных уровней организации и управления [1, 2] установлены равновероятные значения продолжительности выполнения работ на участке, соответствующем нормативной часовой производительности (156,25 м).

Полученные результаты хорошо иллюстрируют влияние на достоверность определения временных параметров каждой отдельной работы (технологического процесса) как дестабилизирующих факторов, так и соответствующего инструмента планирования. Так, за счет влияния дестабилизирующих факторов продолжительность выполнения работ для технологических комплексов с высоким, средним и низким уровнями управления увеличивается в соответствии с поправочными коэффициентами первой группы $K_1^5 = 1,07$; $K_1^4 = 1,41$; $K_1^3 = 2,3$ [1, 2].

Вторая группа поправочных коэффициентов, учитывающих вероятностные временные параметры при планировании отдельной работы для технологических комплексов с высоким, средним и низким уровнями управления, составит $K_2^5 = 1,22$; $K_2^4 = 1,23$; $K_2^3 = 1,46$. Для неопределенного уровня организации и управления коэффициент первой группы $K_1^{345} = 1,5$; второй группы — $K_2^{345} = 1,34$. Перемножение соответствующих коэффициентов и дает итоговые значения средней расчетной продолжительности выполнения отдельной работы (технологического процесса) на единичном участке с учетом воздействия случайных факторов (таблица).

Равновероятные значения продолжительности работ на единичном участке для различных уровней организации и управления

Уровни организации и управления	12 равновероятных значений продолжительности, ч												$t_{\text{ср}}$
Низкий	10,04	6,127	4,789	3,72	3,098	2,621	2,277	2,008	1,777	1,563	1,362	1,132	3,376
Средний	4,464	2,778	2,11	1,781	1,578	1,415	1,29	1,201	1,126	1,062	0,996	0,908	1,73
Высокий	3,39	2,104	1,587	1,325	1,209	1,056	0,965	0,910	0,847	0,807	0,76	0,729	1,307
Неустановленный	5,48	3,58	2,77	2,15	1,81	1,58	1,42	1,27	1,16	1,06	0,96	0,83	2,01

Анализ представленных данных показывает, что вероятная продолжительность выполнения технологического процесса укладки пути существенно зависит от уровня организации и управления комплексом и изменяется в очень широком диапазоне:

при низком уровне — $(1,132-10,04)t$;

при среднем — $(0,908-4,464)t$;

при высоком — $(0,729-3,39)t$;

при неустановленном уровне организации и управления — $(0,83-5,48)t$.

Здесь t — нормативная продолжительность процесса (продолжительность, установленная на основании нормативной производительности с использованием зависимости (1)).

Для дальнейшего исследования вероятностных временных параметров работ на основании полученных данных (см. таблицу) следует установить характер распределения продолжительности процесса на единичном участке и построить соответствующие зависимости для работ с различным уровнем организации и управления.

Теоретический закон распределения продолжительности может быть получен на основании нормального закона распределения производительности комплекса [1, 2].

Так, нормальный закон распределения случайной величины x (производительности комплекса) описывается следующей зависимостью:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где x — случайная величина;

m — математическое ожидание;

σ — среднеквадратическое отклонение.

В этих условиях в соответствии с выражением (1) требуется построить распределение функции $y = 1/x$. Очевидно, что $x = 1/y$.

Согласно (12.1.4) [3]

$$g(y) = f(\psi(y)) |\psi'(y)|. \quad (3)$$

Здесь $\psi(y) = x = 1/y$.

Тогда

$$g(y) = f(1/y) 1/y^2 \quad (4)$$

или

$$g(y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(1/y - m_x)^2}{2\sigma_x^2}} 1/y^2.$$

Итоговое распределение может быть выражено следующей зависимостью:

$$g(y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(1 - m_{xy})^2}{2y^2 \sigma_x^2}} 1/y^2. \quad (5)$$

На рисунках 1–4 приведены графики плотности вероятностей продолжительности процессов на единичном участке для каждого уровня организации работ, рассчитанные как разница смежных значений данных таблицы.

Здесь же представлены графики распределения функции $y = 1/x$, построенные на основании теоретической зависимости (5), а также бета-распределение.

Анализ графиков совместно с данными таблицы позволяет сделать следующие выводы.

Форма и вид эмпирических графиков идентичен для всех уровней организации и управления и имеет форму нормального распределения, смещенного к минимальным значениям продолжительности. Так, наибольшую плотность имеют значения, составляющие 50–70 % от средней про-

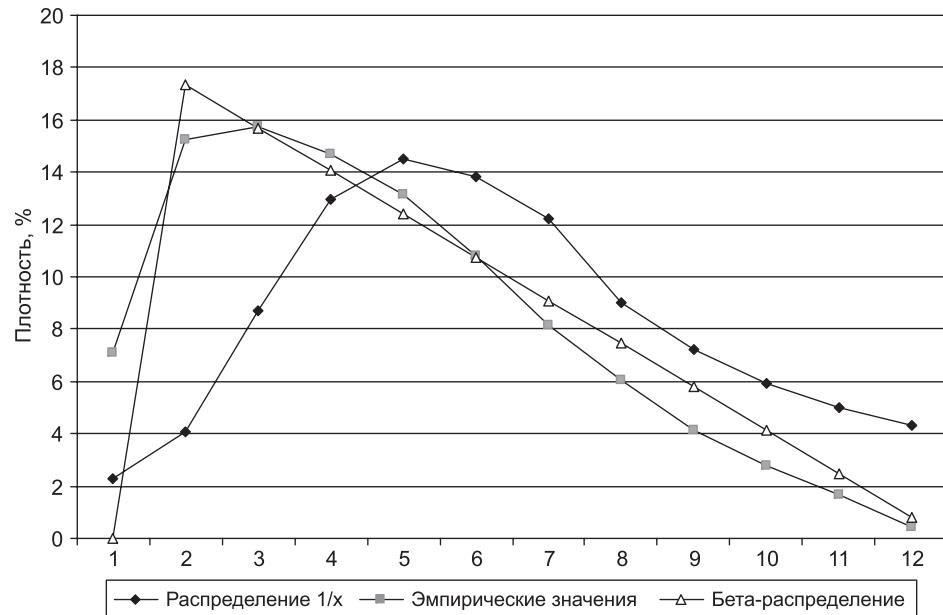


Рис. 1. Плотность вероятности продолжительности процесса при низком уровне организации и управления

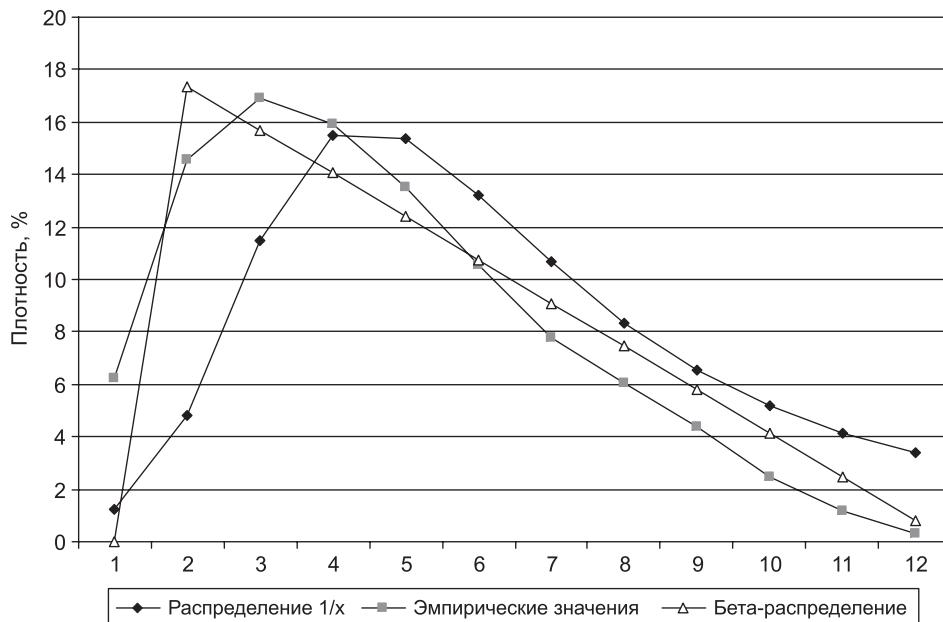


Рис. 2. Плотность вероятности продолжительности процесса при среднем уровне организации и управления

длительности для каждого уровня. Вместе с тем более 30 % значений превышают соответствующие средние значения.

Полученный закон распределения функции случайного аргумента (продолжительности работ от производительности комплекса) хорошо интерпретирует сущность процесса и во многом совпадает с эмпирическими зависимостями. Кроме того, для расчета вероятностных параметров работы (продолжительности технологического процесса) может быть использовано и бета-распределение с параметрами $p = 1$ и $q = 2$.

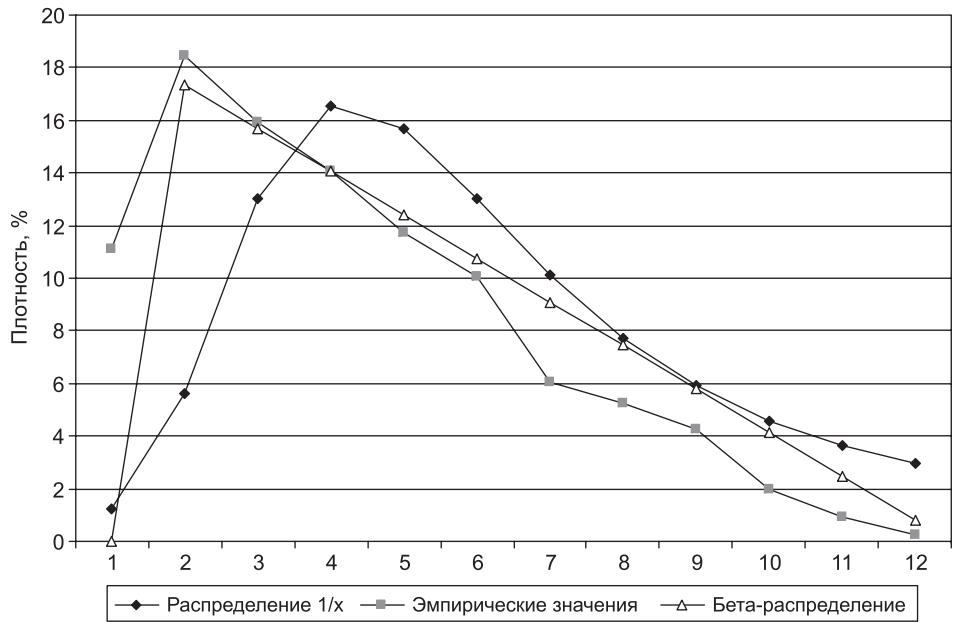


Рис. 3. Плотность вероятности продолжительности процесса при высоком уровне организации и управления

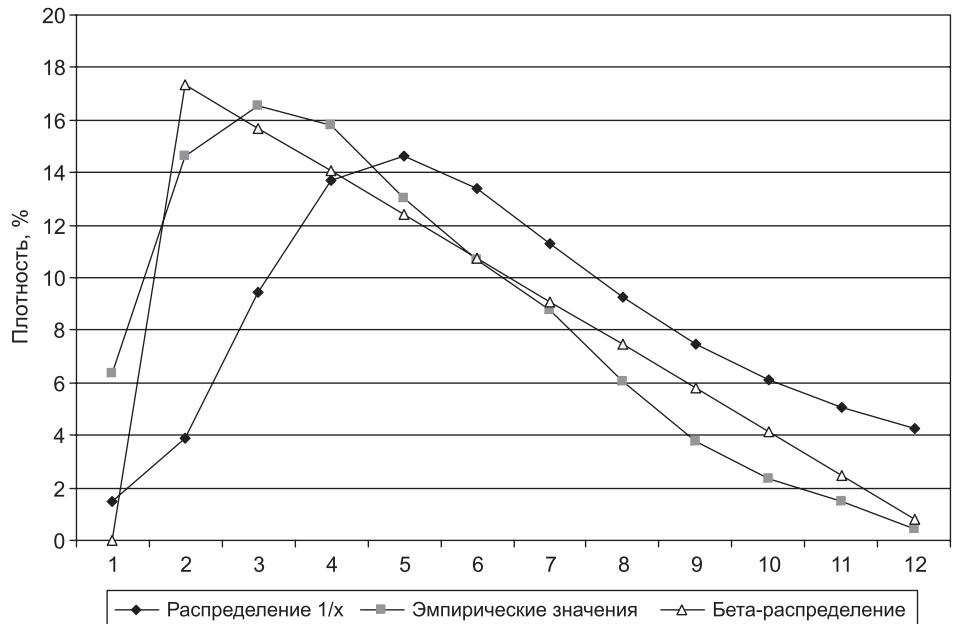


Рис. 4. Плотность вероятности продолжительности процесса при неустановленном уровне организации и управления

Выводы. 1. Установлено, что на достоверность определения параметров отдельной работы влияют как дестабилизирующие факторы, действующие на технологический процесс, так и соответствующий инструмент планирования.

2. Впервые выявлен следующий эффект или казус инструмента планирования: использование детерминированных параметров уже на стадии определения продолжительности выполнения одной работы заведомо занижает средние сроки ее выполнения на 20–50 % в зависимости от уровня организации и управления исполнителей.

3. Вероятная продолжительность выполнения отдельной работы (технологического процесса укладки пути на участке) изменяется в очень широком диапазоне при уровне организации и управления:

- низком ($1,132-10,04)t$;
- среднем ($0,908-4,464)t$;
- высоком ($0,729-3,39)t$;
- неустановленном ($0,83-5,48)t$.

Здесь t — нормативная продолжительность процесса (продолжительность, установленная на основании нормативной производительности с использованием детерминированных оценок).

4. Установленный закон распределения функции случайного аргумента (продолжительности работы от производительности комплекса) (5) хорошо интерпретирует сущность процесса и во многом совпадает с эмпирическими зависимостями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калугин, Ю.Б. Модель воздействия случайных факторов на технологический процесс укладки пути [Текст] / Ю.Б. Калугин, А.Е. Годунов // Научно-технический сборник. № 25-2. — Петродворец, ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2013. — С. 87–93.
2. Калугин, Ю.Б. Моделирование воздействия дестабилизирующих факторов на технологический комплекс [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 7. — С. 93–102.
3. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель. — М. : Физматгиз, 1958. — 464 с.

*КАЛУГИН Юрий Борисович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург*

Получено 15.07.13

Kalugin Yury Borisovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru, Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, Saint-Petersburg, Russia

FEATURES AND ESSENCE OF CALCULATION OF PROBABILISTIC TEMPORARY PARAMETERS FOR WORK (TECHNOLOGICAL PROCESS)

Features of calculation of probabilistic temporary parameters of technological process are stated. For the first time the effect of influence of probabilistic temporary parameters of work on reliability of terms of its performance is established. The law of distribution of period of operation depending on productivity is received.

Key words: reliability of plans, probabilistic temporary parameters, the mathematical expectations, predicting the timing.

REFERENCES

1. Kalugin, Yu.B. Model of influence of probabilistic factors on technological process of stowage of the railway [Text] / Yu.B. Kalugin, A.E. Godunov // Works of Military Institute of rail transport troops and military communications. N 25-2. — St. Petersburg, 2013. — P. 87–93.
2. Kalugin, Yu.B. Modeling of influence of destabilizing factors of the technological complex [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 7. — P. 93–102.
3. Ventsel, E.S. Theory of probabilities [Text] / E.S. Ventsel. — M. : Fizmatgiz, 1958. — 464 p.

УДК 504.055:69

И.М. СЕНИЮЩЕНКОВА

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ
В ПЕРИОД СТРОИТЕЛЬСТВА**

Произведен анализ современной практики учета акустического воздействия на окружающую среду в период строительства, выявлены основные методологические недостатки и определены пути их устранения.

Ключевые слова: охрана окружающей среды, шум, акустические расчеты, экологическое проектирование.

Современные требования, предъявляемые к составу и качеству проектной документации, предполагают разработку перечня мероприятий по охране окружающей среды, в том числе от акустического воздействия на отдельных этапах строительства, реконструкции и капитального ремонта объекта. Научно-производственная практика разработки перечня данных мероприятий выявила следующие актуальные аспекты, нуждающиеся в методологическом сопровождении.

1. Подготовительный этап и этап производства строительно-монтажных работ являются наименее проработанными по сравнению с этапом эксплуатации.

2. Раздел проектной документации «Проект организации строительства» содержит, как правило, информацию по необходимому количеству машин и механизмов без детализации ее использования во временном отношении и отношении стадийности.

3. Инвентаризация источников шума, их идентификация и территориальная привязка зачастую носят субъективный характер.

4. Информация по шумовым характеристикам машин и механизмов недостаточна, так как основным источником является каталог [1], в котором содержатся сведения, нуждающиеся в корректировке с учетом уровня современного развития техники.

5. Часто и проектировщиками, и экспертами некорректно трактуются нормируемые параметры. В основном используется только эквивалентный уровень звукового давления и игнорируется уровень максимальный.

6. Наличие, расположение и характеристики экранирующих сооружений (препятствий) трактуются также весьма «субъективно», так как современные программные продукты по акустическим расчетам позволяют либо не отражать, либо корректировать данную информацию в отчетах [2].

7. Отсутствует сложившаяся практика производства акустического мониторинга на всех стадиях строительства [3].

© Сенищенко И.М., 2013

В итоге намечаются следующие тенденции:

1. Из проекта организации строительства в перечень мероприятий по охране окружающей среды переносится вся запроектированная техника без учета стадийности выполнения работ и ее необходимого количества.

2. Шумовые характеристики источников шума выбираются из каталога, что дает завышение результатов по сравнению с результатами натурных измерений до 15 дБА. Для целого ряда современной техники, используемой в строительстве, но не отраженной в каталоге, уровень звукового давления берется по аналогу с указанными в каталоге машинами и механизмами, что также существенно завышает показатели.

3. Ручные инструменты вообще исключаются из рассмотрения, так как для них отсутствуют доступные изданные шумовые характеристики.

4. Источники шума на стадии эксплуатации идентифицируются в основном как постоянные, в связи с чем в качестве нормируемого параметра используется уровень звукового давления в октавных полосах частот и для ориентировочных расчетов используется эквивалентный уровень. Но на стадии строительства основные источники шума непостоянные, поэтому нормируемыми параметрами здесь являются эквивалентный и максимальный уровень звукового давления в октавных полосах частот с возможностью использования в качестве ориентировочных показателей эквивалентного и максимального уровня в дБА.

5. Разложение уровня звукового давления на октавные полосы частот производится без учета особенностей источника, что приводит к недоучету низкочастотных составляющих и как следствие отсутствию мероприятий по шумоглушению и жалобам населения при наличии положительных согласовательных документов.

6. Строительная техника при расчете представляется в виде точечных источников шума, сосредоточенных в центре строительной площадки для максимального удаления от расчетных точек, работающих исключительно в дневное время суток, что существенно искажает реальную акустическую картину.

7. Вольная трактовка расположения экранирующих сооружений и высотных отметок источников шума и расчетных точек, а также внесение в экологические программы рельефа местности в качестве препятствий с набором характеристик, применимых исключительно к техногенным, но не природным объектам [4].

В данной работе был произведен акустический расчет для строительной площадки, предназначенный для размещения мобильной электростанции для двух вариантов: с учетом действительных шумовых характеристик источников шума, их количества и местоположения и без учета данных факторов.

Площадка с западной и восточной части граничит с отдельными одноэтажными жилыми зданиями, разной степени удаленности от границы станции порядка до 50–60 м, с северной стороны — с промплощадкой, с южной — озелененным, свободным от застройки участком. Территория станции ограждена сплошным забором высотой 2,5 м, изготовленным из металла и являющимся препятствием на пути распространения шума.

Таблица 1
Допустимые уровни звукового давления и уровни звука в зоне жилой застройки

Время суток, ч	Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
7–23	75	66	59	54	50	47	45	44	55
23–7	67	57	49	44	40	37	35	33	45

Нормируемые параметры и допустимые уровни шума на территории жилой застройки согласно СН 2.2.4/2.1.8.562–96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» представлены в табл. 1.

Согласно календарному плану сроки строительства определяются на основании физических объемов работ, компоновочных решений и принятой технологической последовательности выполнения строительно-монтажных работ. Работа всех машин и механизмов осуществляется под открытым небом. Режим всех источников шума периодический с 07.00 до 23.00 ч. Вочные часы производство работ не предусмотрено. Следовательно, для источников шума, действующих на всех этапах, за исключением эксплуатационного, в соответствии с п. 6.2 СП 51.13330.2011 при нормировании непостоянного во времени шума допускается использование эквивалентных уровней звука La экв, дБА, и максимальных уровней La макс, дБА (табл. 2).

Таблица 2
Шумовые характеристики машин и механизмов

№ п/п	Наименование машины или механизма	Кол-во, шт.	Вариант 1 (в соответствии с протоколами измерений)		Вариант 2 (по каталогу шумовых характеристик)	
			максимальный уровень звука, La макс, дБА	эквивалентный уровень звука, La экв, дБА	эквивалентный уровень звука, La экв, дБА	эквивалентный уровень звука, La экв, дБА
1	2	3	4	5	6	

Землеройные и дорожные машины

1	Экскаватор ЭО-3322Д	1	86	76	95
2	Экскаватор ЭО-2621В2	1	86	76	95
3	Экскаватор Fiat Hitachi EX 355	1	79	74	95
4	Бульдозер	2	80	75	85
5	Каток прицепной ДУ-39Б	1	80	74	85
6	Бурильная машина КАТО РЕ-600	1	86	76	95
7	Автогрейдер ДЗ-143	1	86	76	95
8	Трактор Т-170	1	74	65	95

Подъемно-транспортное оборудование

1	Автомобильный кран КС-45717	1	79	74	85
2	Автомобильный кран КС-3574	2	79	74	85
3	Гусеничный кран ДЭК-251	1	79	74	85
4	Гусеничный кран ДЭК-50	1	79	74	85

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
5	Автоподъемник АГП-22.04	1	79	74	85
6	Комбинированный погрузчик Gase 580	1	75	70	85
7	Телескопический погрузчик Bobcat 1420	1	75	70	85

Средства транспорта

1	Автосамосвал КАМАЗ-55102	4	78	72	95
2	Автосамосвал ЗИЛ-4508-03	4	78	72	95
3	Бортовая машина КАМАЗ-5320	4	78	72	95
4	Тягач с прицепом КЗКТ-537Л	2	78	72	95
5	Автобетоносмеситель СБ-92А	2	86	76	95

Расчетные точки расположены на границе жилой застройки (точки 1–6) и на границе промзоны (точки 7, 8) на высоте 1,5 м от поверхности земли в соответствии с ситуационной картой-схемой. Расчет выполнялся с помощью программного продукта ШУМ «Эко центр».

Шумовое воздействие будет осуществляться в следующие этапы производства работ (табл. 3).

Таблица 3

Источники шума по этапам производства работ

Этап производства работ	Машины и механизмы	Максимальное кол-во одновременного нахождения на стройплощадке, шт.	
		Вариант 1	Вариант 2
1	2	3	4
1. Подготовительный	Гусеничный кран ДЭК-251	1	1
	Гусеничный кран ДЭК-50	1	1
	Трактор Т-170	1	1
	Автогрейдер ДЗ-143	1	1
	Бульдозер	1	2
	Автосамосвал КАМАЗ-55102	4	4
	Гусеничный кран ДЭК-251	1	1
	Автосамосвал КАМАЗ-55102	1	4
	Экскаватор ЭО-3322Д	1	1
	Автосамосвал ЗИЛ-4508-03	4	4
	Каток прицепной ДУ-39Б	1	1
	Экскаватор Fiat Hitachi EX 355	1	1
	Автосамосвал КАМАЗ-55102	1	4
	Автомобильный кран КС-3574	1	2
	Автомобильный кран КС-45717	1	1
	Телескопический погрузчик Bobcat 1420	1	1
	Автоподъемник АГП-22.04	1	1
	Комбинированный погрузчик Gase 580	1	1

Окончание табл. 3

1	2	3	4
2. Основной. Работы нулевого цикла	Экскаватор ЭО 3322Д	1	1
	Экскаватор ЭО 2621В2	1	1
	Экскаватор Fiat Hitachi EX 355	1	1
	Бульдозер	2	2
	Бурильная машина КАТО РЕ-600	1	1
	Автомобильный кран КС-45717	1	1
	Автомобильный кран КС-3574	1	2
	Тягач с прицепом КЗКТ-537Л+4МЗАП-83981	2	2
	Автобетоносмеситель СБ-92А	2	2
	Автосамосвал КАМАЗ-55102	4	4
	Каток прицепной ДУ-39Б	1	1
	Комбинированный погрузчик Gase 580	1	1
	Телескопический погрузчик Bobcate 1420	1	1
	Автоподъемник АГП-22.04	1	1
	Автомобильный кран КС-3574	1	2
	Бульдозер	1	2
3. Основной. Работы выше отм. +0,000 м	Телескопический погрузчик Bobcate 1420	1	1
	Автоподъемник АГП-22.04	1	1
	Автомобильный кран КС-3574	1	2
4. Демонтажные работы	См. этап 3	—	—

По варианту 1 одновременное нахождение всех машин и механизмов на строительной площадке исключено. Наиболее неблагоприятным с точки зрения шумового загрязнения является основной этап производства работ нулевого цикла. Рабочая техника и механизмы перемещаются по строительной площадке, но пространственно источники шума локализованы в технологических зонах производства работ в строгом соответствии с последовательностью выполнения технологических операций и условий размещения машин и механизмов. Таким образом, строительная площадка представляет собой совокупность точечных источников шума,

Таблица 4
Результаты расчета максимального уровня звукового давления (вариант 1)

Точка	Уровень звукового давления, дБ									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	La, дБА
1. На границе жилой застройки	13,4	59,1	56,2	47,2	40,8	35	30,2	23,8	14,7	44,8
2. На границе жилой застройки	13,4	59,4	56,5	47,5	41,1	35,3	30,5	24,1	14,6	45,1
3. На границе жилой застройки	13,4	58,9	55,9	47	40,6	34,8	29,9	23,5	14,1	44,5
4. На границе жилой застройки	13,4	57,7	54,7	45,8	39,3	33,5	28,6	21,9	13,4	43,3
5. На границе жилой застройки	13,4	60,5	57,6	48,7	42,3	36,5	31,8	25,6	16,5	46,2
6. На границе жилой застройки	13,4	60,5	57,5	48,6	42,2	36,5	31,7	25,6	16,3	46,2
7. На границе промзоны	13,4	58,8	55,9	47	40,5	34,8	29,9	23,5	14,7	44,5
8. На границе промзоны	13,4	60,3	57,4	48,4	42	36,2	31,4	25,2	16,3	46

Таблица 5
Результаты расчета эквивалентного уровня звукового давления (вариант 1)

Точка	Уровень звукового давления, дБ									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	La, дБА
1. На границе жилой застройки	13,4	51,6	48,7	39,8	33,3	27,6	22,7	16	13,4	37,3
2. На границе жилой застройки	13,4	52,1	49,2	40,2	33,8	28	23,2	16,2	13,4	37,8
3. На границе жилой застройки	13,4	51,7	48,8	39,8	33,4	27,6	22,7	15,7	13,4	37,4
4. На границе жилой застройки	13,4	50,5	47,6	38,6	32,2	26,4	21,4	14,7	13,4	36,2
5. На границе жилой застройки	13,4	52,4	49,4	40,5	34,1	28,4	23,5	17	13,4	38,1
6. На границе жилой застройки	13,4	52,6	49,7	40,8	34,3	28,6	23,8	17,4	13,4	38,3
7. На границе промзоны	13,4	51,4	48,5	39,5	33,1	27,3	22,4	15,7	13,4	37,1
8. На границе промзоны	13,4	52	49,1	40,1	33,7	27,9	23	16,6	13,4	37,7

Таблица 6
Результаты расчета эквивалентного уровня звукового давления (вариант 2)

Точка	Уровень звукового давления, дБ										
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	La, дБА (экран h 2,5 м)	La, дБА (экран h 10 м)
1. На границе жилой застройки	13,4	39,1	41,2	43,8	47,9	50,6	51,3	47,8	37,4	56,1	54,7
2. На границе жилой застройки	13,4	40,1	42,3	44,8	48,9	51,6	52,3	48,9	39,1	57,1	55,9
3. На границе жилой застройки	13,4	39,8	41,9	44,5	48,6	51,2	51,9	48,5	38,5	56,7	55,5
4. На границе жилой застройки	13,4	38,3	40,4	43	47,1	49,7	50,4	46,8	35,8	55,2	53,8
5. На границе жилой застройки	13,4	36,8	38,9	41,5	45,6	48,2	48,9	45,1	33,1	53,6	52,1
6. На границе жилой застройки	13,4	37,2	39,3	41,9	46	48,7	49,4	45,6	34	54,1	52,6
7. На границе промзоны	13,4	36,5	38,7	41,2	45,3	47,9	48,6	44,7	32,6	53,3	51,8
8. На границе промзоны	13,4	36,3	38,5	41,1	45,1	47,7	48,4	44,4	31,9	53,1	51,6

размечаемых в технологических зонах согласно этапам производства работ.

Вариант 2 предполагает максимальное одновременное расположение техники на строительной площадке с ее сосредоточением в центре. Расчеты выполнены с помощью программы ШУМ «Эко центр».

Расчетные результаты для расположения источников шума в центре строительной площадки выполнены для двух случаев: с действительной высотой препятствия 2,5 м и высотой с учетом рельефа местности 10 м. Шумовые карты представлены на рис. 1, 2.

Основным недостатком существующей системы проведения акустического мониторинга является соблюдение обязательного условия — отсутствие каких-либо объектов, создающих экранирующий эффект между точками измерений и границами объекта, что практически неосу-

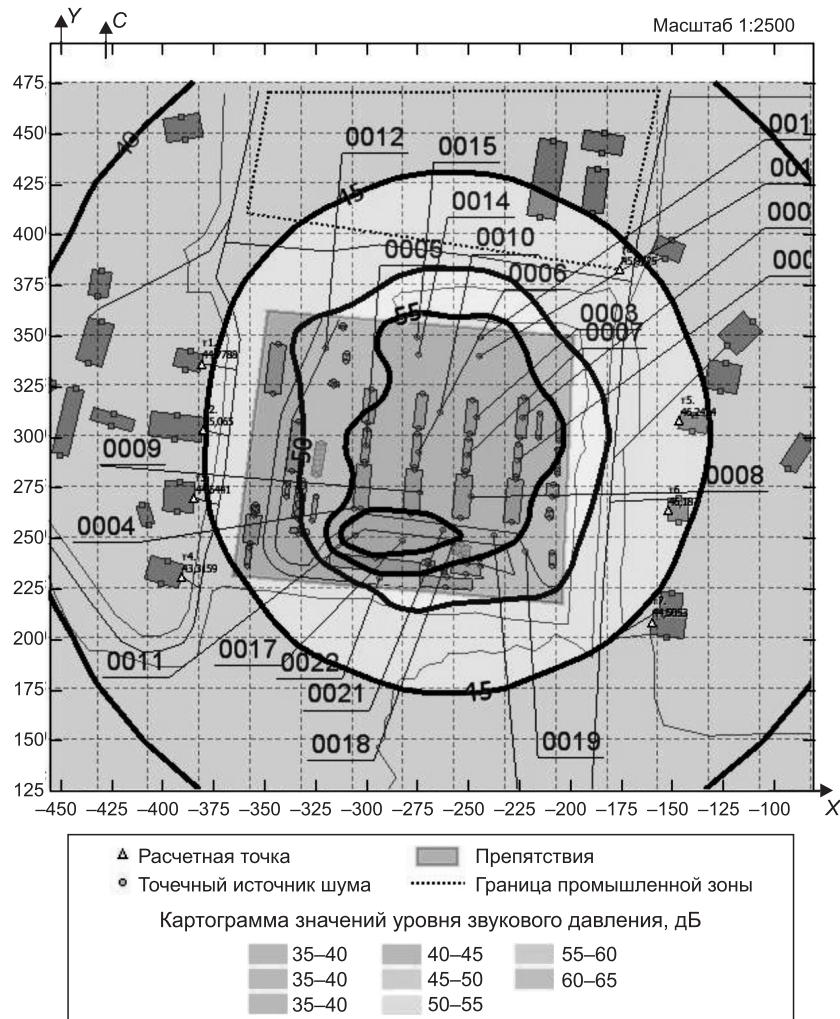


Рис. 1. Шумовая карта (вариант 1)

ществимо в стесненной городской застройке. Точки измерений должны располагаться вне объекта вдоль каждой стороны площадки на расстоянии 15 м от границы, на высоте $(1,2 \pm 0,1)$ м от поверхности. Вдоль каждой стороны объекта должно быть не менее трех точек измерений. Точки следует располагать равномерно вдоль сторон так, чтобы разность эквивалентных уровней звука в соседних точках вдоль одной стороны не превышала 5 дБА. Если данное условие не выполняется, вводятся промежуточные точки.

Выводы. 1. Необходимо подготовить актуализированный каталог шумовых характеристик машин и механизмов с указанием не только эквивалентного, но и максимального уровня звукового давления.

2. Территориальная привязка источников шума на строительной площадке должна производиться в строгом соответствии с технологией производства строительных работ и их стадийностью. Недопустимо субъективно размещать источники на максимальном удалении от расчетной точки.

3. Сложившаяся методологическая практика акустических расчетов дает «широкое» поле для корректировки как исходных данных, так и по-

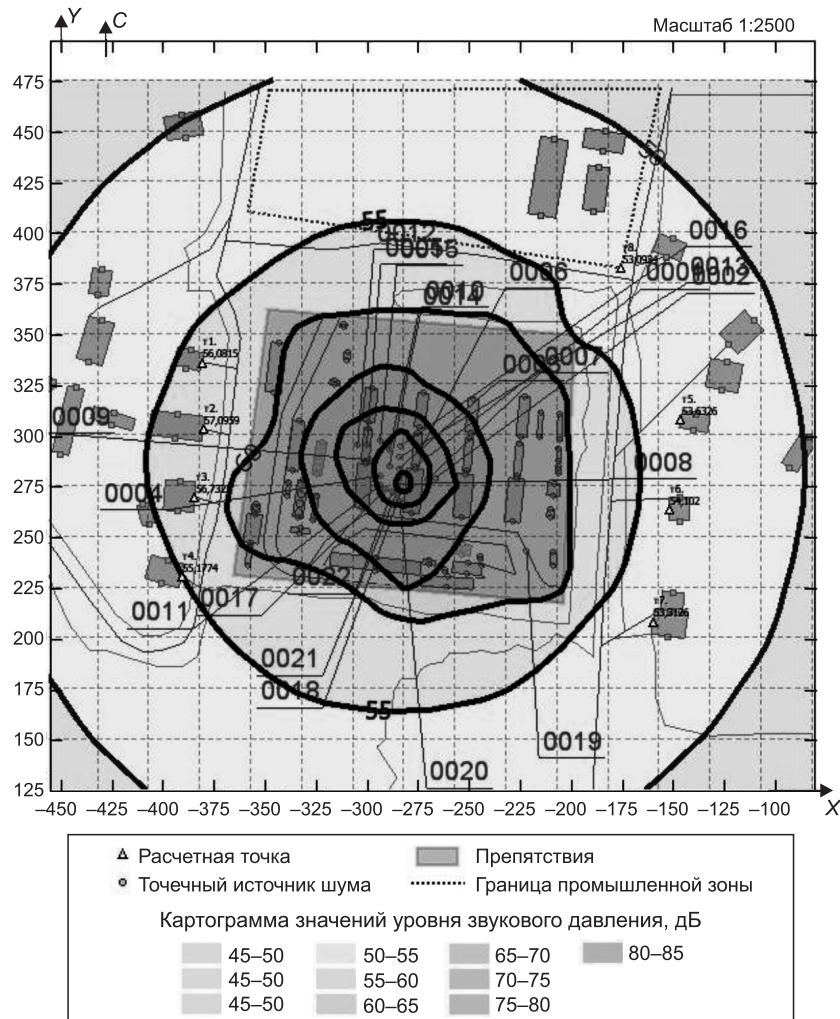


Рис. 2. Шумовая карта (вариант 2, при высоте экрана 2,5 м)

лученных результатов в части высотных отметок и препятствий на пути распространения шума.

4. Проведенные расчеты показали, что применение существующих подходов акустических расчетов в период строительства дает недостоверный результат и в случае нахождения вблизи стройплощадки объектов с повышенными требованиями в части акустического комфорта приводит к субъективной корректировке данных и как следствие грубым промахам, результаты которых будут проявляться уже на стадии реализации и проекта.

5. Существующая практика разработки и проведения акустического мониторинга в период строительства не позволяет корректно размещать расчетные точки в стесненных городских условиях, таким образом, его данные являются недостоверными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев, А.В. Снижение шума транспортных потоков в условиях современного города [Текст] / А.В. Васильев // Экология и промышленность России. — 2004. — № 6. — С. 37–41.

2. И в а н о в, Н.И. Расчет и исследование шума автотранспортных потоков и стройплощадок [Текст] / Н.И. Иванов, Н.Н. Минина // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. — 2010. — Т.12, № 1–9. — С. 2229–2235.
3. Ш у б и н, И.Л. К расчету проектирования придорожных экранов, предназначенных для защиты жилой застройки от транспортного шума [Текст] / И.Л. Шубин // Промышленное и гражданское строительство. — 2010. — № 1. — С. 11–12.
4. Н и к о н о в, Н.Д. Новая теоретическая модель распространения транспортного шума [Текст] / Н.Д. Никонов // Приволжский научный журнал. — 2010. — № 1. — С. 86–96.

*СЕНЮЩЕНКОВА Ирина Михайловна, д-р техн. наук, доц.; E-mail: irina-sen811@yandex.ru
Московский государственный строительный университет*

Получено 22.07.13

Senyushchenkova Irina Michailovna, doctor of technical sciences, assistant professor; E-mail: irina-sen811@yandex.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ACOUSTIC ENVIRONMENTAL IMPACT DURING CONSTRUCTION

The analysis of modern accounting practice of acoustic impact on the environment during the construction period, identified major methodological shortcomings and the ways to address them.

Key words: environmental protection, noise, acoustic calculations, environmental design.

REFERENCES

1. Vasiliev, A.V. Snizhenie traffic noise in a modern city [Text] / A.V. Vasiliev // Ecology and industry of Russia. — 2004. — N 6. — P. 37–41.
 2. Ivanov, N.I. Raschet and investigation of the noise and traffic-building sites [Text] / N.I. Ivanov, N.N. Minina // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. — 2010. — Vol. 12, N 1–9. — P. 2229–2235.
 3. Shubin, I.L. Towards the calculation of the design of roadside screens designed to protect residential areas from traffic noise [Text] / I.L. Shubin // Industrial and civil construction. — 2010. — N 1. — P. 11–12.
 4. Nikonorov, N.D. A new theoretical model of the distribution of traffic noise [Text] / N.D. Nikonorov // The list of scientific journal. — 2010. — N 1. — P. 86–96.
-

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
- сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подпись автора или руководителя представляющей статью организации. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

- рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);
- экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;
- разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Суг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

- индекс УДК;
- инициалы, фамилии авторов;
- название статьи;
- аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);
- ключевые слова;
- текст статьи;
- библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);
- сведения об авторах: *фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания* (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и *английском языках*;
- почтовые адреса, телефоны и *e-mail* авторов;
- *название статьи на английском языке*;
- *аннотацию на английском языке*;
- *ключевые слова на английском языке*;
- *библиографический список на английском языке*.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. *Русские и греческие буквы* и индексы, а также *цифры*, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются *прямым шрифтом*. *Латинские буквы* набирать *курсивом*. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2013 г. — из расчета 750 р. за 1 журнальную страницу.

Индекс 70377

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(SI).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru и www.izvuzstr.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

12. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

13. Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

14. Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 2-е полугодие 2013 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений
Строительные материалы и изделия
Экономика и организация строительства
Автоматизация и технология строительного производства
Гидротехническое строительство
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов
Строительные и дорожные машины
Научные проблемы архитектуры и экологии
Научно-методический В лабораториях вузов
Внедрение научных достижений в производство
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 2100 р.

Цена отдельного номера — 350 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ISSN 0536—1052. Известия вузов. Строительство. 2013. № 8 (656). 1–118

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 8 (656) 2013

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*