

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**
СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 1 (673)
Январь 2015 г.

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

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.
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. Правдивец, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. 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 26.01.15. Формат 70×108 1/16
Усл. печ. л. 10,0+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 7424

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОН-
СТРУКЦИИ**

Дмитриева Т.Л., Нгуен Ван Ты. Математическое моделирование процессов автоматизированного проектирования железобетонных конструкций каркасов многоэтажных зданий с оптимальными параметрами 5

**ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕР-
НЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Курбацкий Е.Н., Нгуен Ван Хунг. Напряженно-деформированное состояние грунта при распространении поверхностных волн Рэлея 15

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МА-
ТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

**Овчаренко Г.И., Виктор-
ров А.В., Садрашева А.О.** Влияние вида тонкоизмельченных минеральных добавок на прочность цементного камня. Часть 2 28

**Белан И.В., Пичугин А.П., Денисов А.С.,
Хриганков В.Ф.** Изучение структуры и процесса массопереноса в затвердевших строительных растворах из сухих смесей 32

**Логанина В.И., Пышки-
на И.С.** Стойкость известковых покрытий с добавкой на основе синтезированных гидросиликатов 39

**ЭКОНОМИКА И ОРГА-
НИЗАЦИЯ СТРОИ-
ТЕЛЬСТВА.**

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Калугин Ю.Б. Универсальный метод оценки сроков выполнения проекта с вероятностными временными параметрами 44

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Малявина Е.Г., Цыганков А.В. Влияние различных факторов на темп остывания помещения после отключения теплоснабжения 53

Сакаш Г.В. Особенности очистки воды водохранилищ-охладителей ТЭС от органических веществ 60

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

Семикин П.П., Бацунова Т.П. Особенности объемно-пространственных решений высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии 69

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В. Гравитационные поверхностные волны при продольной качке контейнера, частично заполненного жидкостью 77

Кошелева О.Э., Борисовская Н.Е. Исследование свойств магнитной жидкости .. 84

Ленивцев А.Г., Дуданов И.В., Лаптева И.В. Процесс накопления механических примесей в силовых передачах машин с учетом воздухообмена с окружающей средой 89

Немировский Ю.В., Ажермачев А.В. Синтез гибридных ферменных конструкций 94

ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

Саленко С.Д., Гостеев Ю.А. К оценке ветровых воздействий на сооружения 108

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Замечательный ученый-практик и инноватор (к 80-летию Владимира Ивановича Костина) 114

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 1 (673)
January 2015

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
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
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

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

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTION

Dmitrieva T.L., Nguyen Van Tu. Mathematical modeling of processes automated design of reinforced concrete carcass structure multistory buildings with the optimal settings 5

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

Kurbatskiy E.N., Nguyen Van Hung. Stress and strain soil states caused by surface Rayleigh waves 15

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Ovcharenko G.I., Viktorov A.V., Sadrasheva A.O. Effect of the type of finely grinding mineral additives on the strength of cement stone. Part 2 28

Belan I.V., Pichugin A.P., Denisov A.S., Hritanov V.F. The study of the structure and process of mass transfer in the hardened building solutions from dry mixes 32

Loganina V.I., Pyshkina I.S. Resistance of mortar with the additive based on synthetic hydrosilicates 39

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION.

AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

Kalugin Yu.B. Universal method of computing finish time for networks with imprecise durations	44
SANITARY ENGINEERING	
Malyavina E.G., Tsygankov A.V. Influence of different factors on the room cooling down rate after heating is switched off	53
Sakash G.V. Particular qualities of cleaning CHP waters reservoir-refrigerant from organic substances	60
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY	
Semikin P.P., Batsunova T.P. Features of volumetric-spatial solutions of high-rise buildings with renewable energy sources	69
SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL SECTION	
Bukreev V.I., Degtyarev V.V., Chebotnikov A.V. Gravity surface waves at the longitudinal pitching of a container partially filled with liquid	77
Kosheleva O.E., Borisovskaya N.E. The analysis of the properties of magnetic liquid ..	84
Lenivtsev A.G., Dudanov I.V., Lapteva I.V. Process of accumulation of mechanical impurity in power transmissions of cars taking into account air exchange with environment	89
Nemirovskiy Yu.V., Azhermachev A.V. Synthesis of hybrid trusses	94
MANUFACTURING APPLICATION OF SCIENTIFIC DEVELOPMENTS	
Salenko S.D., Gosteev Yu.A. To the assessment wind effects on structures	108
JUBILEE'S ARTICLES	
The remarkable scientist the practitioner and the innovator (to Vladimir Ivanovich Kostin's 80 anniversary)	114

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 519.6

Т.Л. ДМИТРИЕВА, НГУЕН ВАН ТЫ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассмотрена постановка задачи оптимального проектирования железобетонных конструкций каркасов многоэтажных зданий в форме задачи нелинейного математического программирования. Приведено решение этой задачи с использованием численных методов оптимизации. Задача на условный экстремум решается путем перехода к задаче на безусловный экстремум с использованием модифицированной функции Лагранжа, обладающей более широкой областью сходимости и применимой для отыскания локального экстремума в невыпуклых задачах. Задача на безусловный экстремум решается методом деформируемого многогранника. Задача статического анализа поставлена в форме метода конечных элементов.

Ключевые слова: расчетная схема сооружения, оптимальное проектирование, железобетонный каркас зданий, нелинейное математическое программирование, метод конечных элементов, модификация функции Лагранжа.

Введение. Как известно, каркас — это конструкция, состоящая из вертикальных элементов (колонн), горизонтальных элементов (ригелей) и связей, которая воспринимает вертикальные и горизонтальные нагрузки, действующие на здание, и передает их на фундамент, выполняя несущую функцию. Каркасы железобетонных зданий широко востребованы и находят активное применение в современном строительстве. С этих позиций разработка эффективных методов оптимизации, а также их алгоритмическая и программная реализация весьма актуальна и вызывает большой интерес у исследователей и проектировщиков [1, 2], так как может существенно сократить сроки проектирования и повысить качество проектируемых конструкций. Эффективность оптимальных проектов связана с подбором архитектурно-планировочных решений, назначением геометрии сечений стержневых элементов и физических свойств материала, армированием. В большинстве случаев задача оптимизации конструкций ставится следующим образом: оптимальный проект должен соответствовать заданному критерию оптимальности при выполнении условий, обеспечивающих надежную работу конструкции.

В данной статье дается построение математической модели задачи, а также приведена ее алгоритмическая и программная реализация.

Постановка задачи оптимизации в форме нелинейного математического программирования (НМП). Приведем математическую модель задачи оптимизации в форме задачи НМП:

$$\text{найти} \quad \min f(x, P(x)), \quad x \in E^{nx} \quad (1)$$

$$\text{при ограничениях} \quad g_j(x, P(x)) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, nx. \quad (3)$$

Здесь $\{X\}$ — вектор варьируемых параметров на интервале $\{X^L\}$ – $\{X^U\}$. Функции ограничений g_j связаны с варьируемыми параметрами x через параметры состояния $P(x)$:

$$\{P(x)\} = \varphi(\delta, M, Q, N, \sigma), \quad (4)$$

куда могут входить узловые перемещения (δ), внутренние силовые факторы (M, Q, N), напряжения (σ) и т.д., определяемые решением уравнения метода конечных элементов в линейной постановке:

$$[K(x)]\{\delta\} = \{F(x)\}, \quad (5)$$

где $[K(x)]$ — матрица жесткости системы; $\{F(x)\}$ — вектор внешней нагрузки.

В качестве минимизируемой (целевой) функции $f(x)$ используется вес конструкций. Варьируются геометрические параметры сечений с учетом армирования.

Алгоритм решения задачи оптимизации. Приведем блок-схему алгоритма задачи оптимизации (рис. 1). Условно-экстремальная задача (1)–(3) приводится к задаче на безусловный экстремум с использованием функции Лагранжа F_L , а также ее модификации — функции F_P [3, 4].

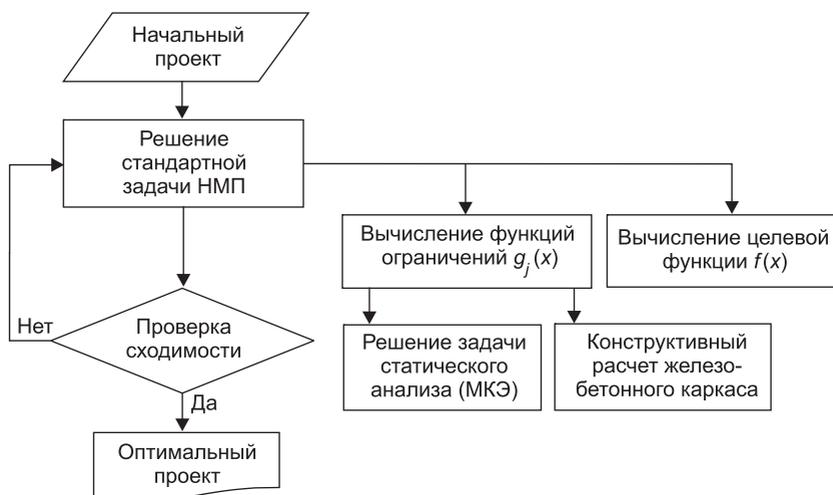


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оптимального проектирования железобетонной конструкции

Алгоритм решения стандартной задачи НМП сводится к двум попеременным шагам:

а) определение переменных варьирования x путем минимизации модифицированной функции Лагранжа F_p ;

б) поиск двойственных переменных y (множителей Лагранжа).

Блок-схема алгоритма решения этой задачи приведена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма решения условной задачи НМП

Оптимальный проект соответствует условию стационарности функции F_p по переменным X и Y :

$$\max_Y \min_X F_p(X, Y). \quad (6)$$

Итерационный процесс сходится, если выполняются проверки

$$|X^{t+1} - X^t| \leq \varepsilon_x |X^t|, \quad |\bar{g}| \leq \varepsilon_g, \quad (7)$$

где t — номер итерации;

$|\bar{g}|$ — множество потенциально активных ограничений;

$\varepsilon_x, \varepsilon_g$ — заданная точность вычислений [5].

Кроме того, устанавливается предельное число итераций решения задачи (6), а также максимальное число обращений к целевой и ограничительным функциям.

Пример оптимизации плоской железобетонной рамы. Рассмотрим плоскую железобетонную раму, входящую в состав каркаса здания. Примем следующие характеристики конструкции [6]:

— бетон класса В25 (плотность 2350 кг/м³ или 0,0235 · 10⁻³ кН/см³, $E_b = 3000$ кН/см²);

— арматура класса А400 (плотность 7850 кг/м³ или 0,0785 · 10⁻³ кН/см³, $E_s = 20000$ кН/см²);

— защитный слой арматуры $a = 4$ см;

— коэффициент армирования $\mu = 0,01$.

На рис. 3 показана расчетная схема плоского железобетонного каркаса 3-этажного здания.

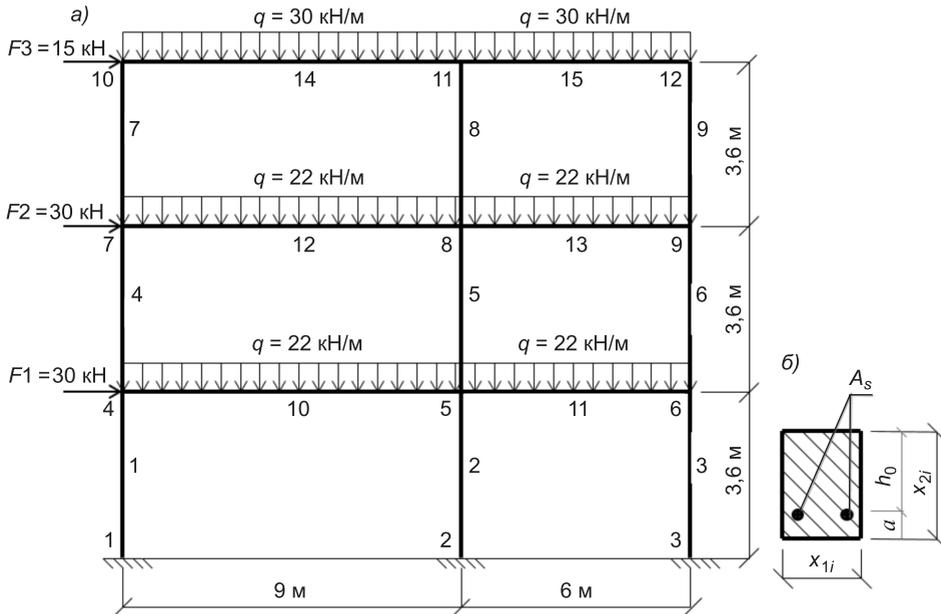


Рис. 3. Каркас железобетонного здания
а — расчетная схема; б — сечение i -го элемента

Целевая функция $f(x)$ представляет собой приведенный вес рамы:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n_e} A_{bi} l_{bi} \rho_{bi} + \sum_{i=1}^{n_e} A_{si} l_{si} \rho_{si}, \quad (8)$$

где n_e — число элементов;

A_{bi} , l_{bi} — площадь сечения и длина элемента i ;

A_{si} — площадь сечения арматуры элемента i ;

ρ_b , ρ_s — плотность бетона и арматуры.

При конструировании каркаса была выполнена группировка его элементов по нескольким типам: тип 1 — элементы 1, 3, 4, 6, 7, 9; тип 2 — элементы 2, 5, 8; тип 3 — элемент 10; тип 4 — элемент 11; тип 5 — элемент 12; тип 6 — элемент 13; тип 7 — элемент 14; тип 8 — элемент 15.

В качестве варьируемых были использованы следующие параметры:

- B_i — ширина сечения элементов i -й группы;
- H_i — высота сечения элементов i -й группы ($i = 1...8$).

Площадь арматуры A_s принята как часть площади прямоугольного сечения элементов (1 %).

Функции ограничений $g_f(x)$ представляют собой проверки по прочности и задаются в соответствии с разделами СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Они связаны с варьируемыми параметрами x через параметры состояния M (изгибающие моменты), Q (поперечные силы), N (продольные силы), которые определяются решением задачи конечно-элементного анализа в линейной постановке (5). В данной работе рассмотрены железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры, работающие по первой группе предельных состояний.

Реализовано три вида проверок для каждой группы элементов:

а) обеспечение прочности сечений изгибаемых элементов из условия п. 8.1.8, ф. (8.3), а именно:

— условие прочности железобетонного изгибаемого элемента с одиночной арматурой:

$$\frac{R_s A_s}{R_b b h_0} \leq \xi_R, \quad (9)$$

формализованное в виде функций ограничений (2):

$$g_{1i} = \frac{R_s \cdot 0,01 x_{1i} (x_{2i} - 4)}{\xi_R R_b x_{1i} (x_{2i} - 4)} - 1 \leq 0;$$

— обеспечение прочности в растянутой зоне:

$$M_{\max} \leq R_s A_s [(h_0 R_b b - 0,5 R_s A_s) / R_b b] \quad (10)$$

или

$$g_{2i} = \frac{M_{\max} R_b x_{2i}}{R_s \cdot 0,01 x_{1i} (x_{2i} - 4) ((x_{2i} - 10) R_b x_{1i} - 0,5 R_s \cdot 0,01 x_{1i} (x_{2i} - 4))} - 1 \leq 0.$$

В случае действия равномерно распределенной нагрузки на элемент расчетные (экстремальные) моменты выбирались из крайних и пролетных значений.

б) обеспечение прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил по п. 8.1.32, ф. (8.55):

$$Q_{\max} \leq \phi_{b1} R_b b h_0 \quad (11)$$

или

$$g_{3i} = \frac{Q}{\phi_{b1} R_b x_{1i} (x_{2i} - 4)} - 1 \leq 0.$$

в) обеспечение прочности железобетонных внецентренно-сжатых элементов (колонн) по п. 8.1.14, ф. (8.10):

$$Ne \leq (R_s A_s - N)(R_b b h_0 - 0,5(R_s A_s - N)) / (R_b b), \quad (12)$$

$$e_0 = \frac{M}{N}, e = e_0 - \frac{h}{2} + a$$

или

$$g_{4i} = \frac{(M - N(0,5x_{2i} + 4))R_b x_{li}}{(R_s \cdot 0,01x_{li}(x_{2i} - 4) - N)((x_{2i} - 4)R_b x_{li} - 0,5(R_s \cdot 0,01x_{li}(x_{2i} - 4) - N))} - 1 \leq 0.$$

Ограничения проверялись для наиболее нагруженного элемента в каждой группе. Таким образом, ограничения g_1-g_4 были отнесены к группе элементов, имеющих тип 1, g_5-g_8 — для элементов типа 2, g_9-g_{11} — тип 3, $g_{12}-g_{14}$ — тип 4, $g_{15}-g_{17}$ — тип 5, $g_{18}-g_{20}$ — тип 6, $g_{21}-g_{23}$ — тип 7, $g_{24}-g_{26}$ — тип 8.

Была получена следующая размерность задачи (1)–(3):

$n_x = 16$ (число варьируемых параметров);

$m = 26$ (число функции ограничений).

Решение задачи оптимизации в программе РОСКЖБ. Поставленная задача оптимального проектирования элементов плоской рамы была решена в программном комплексе **РОСКЖБ**.

Расчет выполнялся согласно алгоритмам, блок-схемы которых приведены на рис. 1, 2.

Приняты следующие начальные значения и пределы изменения:

— для ширины сечения колонн: $B_0 = 40$ см ($B_{\min} = 30$ см; $B_{\max} = 80$ см);

— высоты сечения колонн: $H_0 = 50$ см ($H_{\min} = 40$ см; $H_{\max} = 120$ см);

— ширины сечения ригелей: $B_0 = 30$ см ($B_{\min} = 25$ см; $B_{\max} = 80$ см);

— высоты сечения ригелей: $H_0 = 40$ см ($H_{\min} = 40$ см; $H_{\max} = 120$ см).

Параметры задачи оптимизации: $k_{\min} = 300$; $\Delta Z_{\max} = 0,3$.

Внутренняя задача безусловной минимизации по варьируемым параметрам решалась с использованием метода деформируемого многогранника [7, 8], который относится к методам прямого поиска. Такой подход предполагает большое число обращений к вычислению целевой и ограничительных функций (порядка 10^3-10^4 раз). Однако к его достоинствам относится высокая устойчивость на малом числе внешних итераций решения задачи (6).

Результаты решения задачи оптимизации.

Результаты расчета:

— оптимальное значение целевой функции $f(x)$ 263,2722017 кН;

— число обращений к целевой функции 7134;

— число итераций 6.

Были получены следующие потенциально активные ограничения по нормальным напряжениям $g_{10} = -0,7200 \cdot 10^{-4}$ в элементе 10 (тип 3), $g_{16} = 0,2000 \cdot 10^{-4}$ в элементе 12 (тип 5), $g_{25} = -0,5100 \cdot 10^{-4}$ в элементе 15 (тип 8). Точность результатов можно оценить по невязке ограничения g_{16} , которая превышает допустимое значение на 0,002 %.

Для использования в практическом проектировании полученные значения параметров сечений были округлены (табл. 1). Соответственно были скорректированы значения целевой функции и потенциально активных ограничений:

$$f(x) = 261,356134 \text{ кН,}$$

$$g_{10} = 0,78 \cdot 10^{-2}; \quad g_{16} = 1,7 \cdot 10^{-2}; \quad g_{25} = 1,8 \cdot 10^{-2}.$$

Таблица 1. Значения оптимальных параметров варьирования

Тип элементов	Оптимальные параметры			Округленные значения оптимальных параметров		
	B , см	H , см	A_s , см ²	B , см	H , см	A_s , см ²
1	30,0000	40,0000	10,8000	30,0000	40,0000	9,82
2	30,0000	61,3504	17,2051	30,0000	62,0000	16,08
3	25,0978	53,0449	12,3092	25,0000	55,0000	12,32
4	25,0000	40,0007	9,0001	25,0000	40,0000	9,82
5	26,1568	42,5346	10,0794	25,0000	45,0000	9,82
6	25,0000	69,8241	9,0001	25,0000	70,0000	9,82
7	25,0134	62,4644	14,6161	25,0000	62,0000	12,32
8	30,6340	40,3050	11,1217	30,0000	40,0000	12,32

Полученные значения потенциально активных ограничений не выходят за пределы значений перенапряжений, допустимых при проектировании строительных конструкций (как правило, в пределах 3 %), поэтому скорректированное решение может быть принято как оптимальное.

На рис. 4 показаны изменения целевой функции на итерациях. Видно, что уже вторая итерация поискового процесса дает решение близкое к оптимальному, которое на последующих итерациях меняется незначительно. Таким образом, для сокращения числа итераций могут быть ослаблены требования к точности вычисления невязок ограничений.

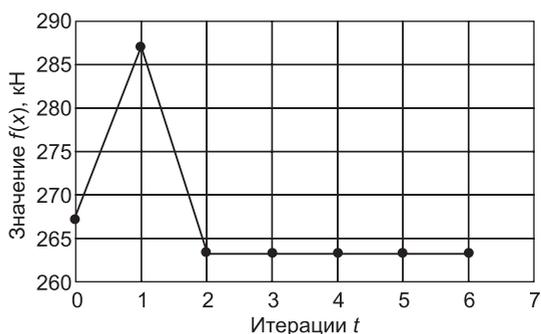


Рис. 4. Изменение целевой функции на итерациях

Исследование оптимального решения на единственность. В качестве начального проекта использовались различные величины ширины (B_0) и высоты (H_0) сечения элементов. Результаты пяти решений приведены в табл. 2. При решении задачи с различных начальных проектов было получено практическое совпадение оптимальных значений целевой функции (разброс составил 0,026 %).

Таблица 2. Оптимальное решение с разных начальных проектов

Тип элемента	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	B_0 , см	H_0 , см	B_0 , см	H_0 , см	B_0 , см	H_0 , см	B_0 , см	H_0 , см	B_0 , см	H_0 , см
Колонны	40,000	50,000	40,000	40,000	40,000	40,00	40,000	50,000	40,000	50,000
Ригели	30,000	40,000	30,000	40,000	25,000	40,0000	30,000	60,000	30,000	65,000
$f(x)_{\text{опт}}$, кН	263,2722017	263,94538	263,2374997	263,5482269	263,3224408					
Число итераций	6	5	6	6	6					
g_{max}	$0,20 \cdot 10^{-4}$	$-0,61 \cdot 10^{-4}$	$-0,73 \cdot 10^{-5}$	$0,14 \cdot 10^{-5}$	$-0,93 \cdot 10^{-4}$					

Исследования влияния коэффициента k_{\min} на сходимость алгоритма. Отметим, что эффективность используемой в алгоритме функции F_p (см. рис. 2) определяется ее выпуклостью по переменным варьирования x , которая обеспечивается соответствующими значениями параметров этой функции, и прежде всего, величиной коэффициента штрафа. При некоторых величинах этого коэффициента функция не обладает достаточной выпуклостью в области оптимума, что сказывается на сходимости поискового процесса (рис. 5). Для обеспечения надежной работы алгоритма было отслежено влияние параметра k_{\min} , входящего в штрафной коэффициент, на скорость сходимости к оптимуму.

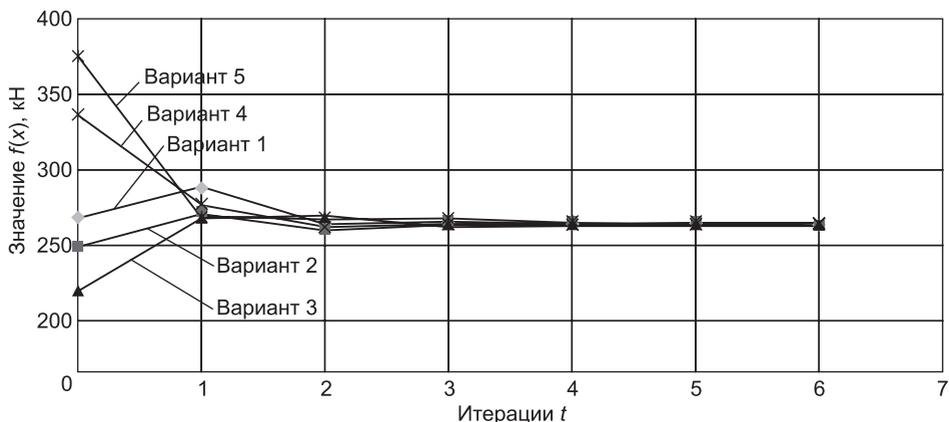


Рис. 5. Сходимость алгоритма с разных начальных значений

В табл. 3 показаны изменения целевой функции на итерациях при четырех вариантах решения задачи, в которых были назначены различные величины параметра k_{\min} . Видно, что более высокие значения этого параметра дают лучшую сходимость. Можно соотнести порядок параметра k_{\min} с порядком величины целевой функции. Практические расчеты по-

Таблица 3. Изменения целевой функции на итерациях при различных значениях k_{\min}

Итерации	$f(x)$ ($k_{\min} = 30$)	$f(x)$ ($k_{\min} = 80$)	$f(x)$ ($k_{\min} = 200$)	$f(x)$ ($k_{\min} = 300$)
0	267,2757049	267,2757049	267,2757049	267,2757049
1	272,4318507	257,9627321	262,0371367	287,0058556
2	257,4537421	224,2786945	261,9983444	263,2696883
3	263,4470481	263,2756455	263,9656541	263,2723413
4	263,4527592	263,2753396	263,9644143	263,2707424
5	263,4505334	263,2749899	263,9644635	263,2702003
6	263,4477518	263,2761705	263,9378143	263,2708601
7	263,4628217	263,2761541	263,9378631	
8	263,4505806	263,2761715	263,9378111	
9	263,4569426	263,2768776		
10	263,2628217	263,2761121		

казали, что наилучшая сходимость имеет место, если задавать k_{\min} в пределах 200–500.

Выводы. 1. Принятая модель вычислительного алгоритма оптимально проектирования рам обеспечивает независимую работу основных ее блоков, что позволяет дополнять каждый блок (например, расширять список проверок в конструктивном расчете железобетонных конструкций).

2. Результаты продемонстрировали хорошую сходимость к оптимальному решению при достаточно высокой скорости.

3. Для обеспечения удовлетворительной сходимости алгоритма необходимо задавать высокое значение параметра k_{\min} , входящего в выражение штрафного коэффициента. Практические расчеты показали, что повышение этого параметра до определенного предела увеличивает скорость сходимости. Таким образом, мы можем регулировать выпуклость модифицированной функции Лагранжа F_p по переменным проектирования X .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гребенюк, Г.И. Расчет и оптимизация уголкового ядра жесткости связевых железобетонных каркасов высотных, нерегулярных в плане зданий при произвольном направлении ветра [Текст] / Г.И. Гребенюк, Н.Н. Пантелеев, С.Г. Чапаева // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 12. — С. 4–10.
2. Гребенюк, Г.И. Разработка расчетных моделей и оптимизация ядра жесткости уголкового профиля связевых железобетонных каркасов [Текст] / Г.И. Гребенюк, Н.Н. Пантелеев, С.Г. Чапаева // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 10. — С. 109–114.
3. Безделев, В.В. Гибридный метод решения условно-экстремальных задач оптимизации конструкций, основанный на двух модифицированных функциях Лагранжа [Текст] / В.В. Безделев, Г.И. Гребенюк, Т.Л. Дмитриева // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1987. — № 7. — С. 23–28.
4. Гольштейн, Е.Г. Модифицированные функции Лагранжа и методы оптимизации [Текст] / Е.Г. Гольштейн, Н.В. Третьяков. — М.: Наука, 1989. — 400 с.
5. Дмитриева, Т.Л. Параметрическая оптимизация в проектировании конструкций, подверженных статическому и динамическому воздействию: моногр. [Текст] / Т.Л. Дмитриева. — Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2010. — 176 с.
6. Нгуен Ван Ты. Расчет стержневых железобетонных конструкций с учетом неупругой работы методом конечных элементов [Текст] / Нгуен Ван Ты, В.В. Кажарский // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. — 2014. — № 5(88). — С. 107–114.
7. Mckinnon, K. Convergence of the Nelder-Mead simplex method to a nonstationary point [Текст] / K. Mckinnon // SIAM Journal on Optimization. — 1998. — N 9. — P. 148–158.
8. Nelder, J.A. A simplex method for function minimization [Текст] / J.A. Nelder, R. Mead // Computer Journal. — 1965. — N 7. — P. 308–313.

ДМИТРИЕВА Татьяна Львовна, д-р техн. наук, проф.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет
НГУЕН ВАН ТЫ, асп.*

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Получено после доработки 15.12.14

Dmitrieva Tatiana Lvovna, doctor of technical sciences, professor, National Research Irkutsk Technical University, Russia

Nguyen Van Tu, post-graduate student, National Research Irkutsk Technical University, Russia

MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES AUTOMATED DESIGN OF REINFORCED CONCRETE CARCASS STRUCTURE MULTISTORY BUILDINGS WITH THE OPTIMAL SETTINGS

We consider the problem of optimal design of reinforced concrete constructions of carcasses of multi-storey buildings in the form of a nonlinear mathematical programming. The solution of this problem using numerical optimization methods. Conditional extremum problem is solved by the transfer to the problem to an unconditional extremum using modified Lagrange functions, which has wider range of convergence and applicable for finding local extremum in nonconvex problems. Unconditional extremum problem is solved by the flexible polyhedron. In each iteration solves the problem of static analysis in the form of the finite element method.

Key words: calculation scheme structures, optimal design, reinforced concrete frame buildings, nonlinear mathematical programming, finite element method, a modification of the Lagrangian.

REFERENCES

1. Grebenyuk, G.I. Calculation and optimization of angle structural cores of concrete supported frameworks in high-rise and irregular in plan buildings at arbitrary direction of the wind [Text] / G.I. Grebenyuk, N.N. Panteleyev, S.G. Chapayeva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2007. — N 12. — P. 4–10.
2. Grebenyuk, G.I. Development of computational models and optimization of stiffening cores of angle sections of braced reinforced concrete framings [Text] / G.I. Grebenyuk, N.N. Panteleyev, S.G. Chapaeva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 10. — P. 109–114.
3. Bezdelev, V.V. Hybrid method for solving optimization problems conditionally extreme designs based on two modified Lagrange function [Text] / V.V. Bezdelev, G.I. Grebenyuk, T.L. Dmitrieva // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1987. — N 7. — P. 23–28.
4. Holstein, E.G. Modified Lagrange functions and optimization methods [Text] / E.G. Holstein, N.V. Tretyakov. — M. : Nauka, 1989. — 400 p.
5. Dmitrieva, T.L. Parametric optimization in the design of structures subjected to static and dynamic effects: monograph [Text] / T.L. Dmitrieva. — Irkutsk : Irkutsk State Technical University Publishing House, 2010. — 176 p.
6. Nguyen Van Tu. Calculation of core concrete structures taking into account the work of inelastic finite element method [Text] / Nguyen Van Tu, V.V. Kazharsky // Bulletin of Irkutsk State Technical University. — 2014. — N 5 (88). — P. 107–114.
7. Mckinnon, K. Convergence of the Nelder-Mead simplex method to a nonstationary point [Text] / K. Mckinnon // SIAM Journal on Optimization. — 1998. — N 9. — P. 148–158.
8. Nelder, J.A. A Simplex method for function minimization [Text] / J.A. Nelder, R. Mead // Computer Journal. — 1965. — N 7. — P. 308–313.

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.131

Е.Н. КУРБАЦКИЙ, НГУЕН ВАН ХУНГ

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ

Анализ разрушений тоннелей при землетрясениях показывает, что наибольшие повреждения появляются в тоннелях мелкого заложения в результате воздействия поверхностных волн Рэлея. Оценка воздействия сейсмических волн на сооружения определяется напряженно-деформированным состоянием грунтового массива в окрестности тоннелей, для нахождения максимальных напряжений в которых используются пиковые значения скоростей движения частиц грунта.

Определены зависимости максимальных значений напряжений в массиве грунта, которые изменяются по глубине. Для получения решения используются скалярные и векторные потенциальные функции и интегральное преобразование Фурье. Полученные результаты позволяют установить внутренние усилия в тоннельных обделках с помощью коэффициентов передачи напряжений и коэффициентов передачи перемещений.

Ключевые слова: волны Рэлея, потенциальные функции, сейсмическое воздействие и преобразование Фурье.

1. Введение. При падении сейсмических волн на земную поверхность возникают два типа волн, которые существуют только вблизи поверхности, — это волны Рэлея и волны Лява. При распространении волн Лява частицы грунта колеблются параллельно поверхности грунта перпендикулярно направлению распространения. При распространении волн Рэлея частицы грунта двигаются в вертикальной плоскости по эллипсовидным траекториям. Амплитуда этих приповерхностных волн убывает по мере удаления от поверхности. В расчетах на сейсмические воздействия тоннелей глубокого заложения поверхностные волны не учитываются.

Как следует из анализа повреждений тоннелей при землетрясениях, наибольшие повреждения и даже разрушения появляются в тоннелях мелкого заложения в результате воздействия поверхностных волн. Для оценки воздействия сейсмических волн на тоннели необходимо определить напряженно-деформированное состояние массива грунта в окрестности тоннелей при распространении сейсмических волн, расчетные схемы которых представлены на рис. 1.

2. Сейсмическое воздействие. Так как повреждения подземных сооружений при землетрясениях в большей мере коррелируются с пиковыми скоростями движения грунта PGV и пиковыми перемещениями PGD [1], будем полагать, что предполагаемое сейсмическое воздействие задано в виде зависимостей от времени ускорений, скоростей и перемещений поверхности грунта. Эти функции получены при записи колебаний грунта при землетрясении или в результате синтезирования.

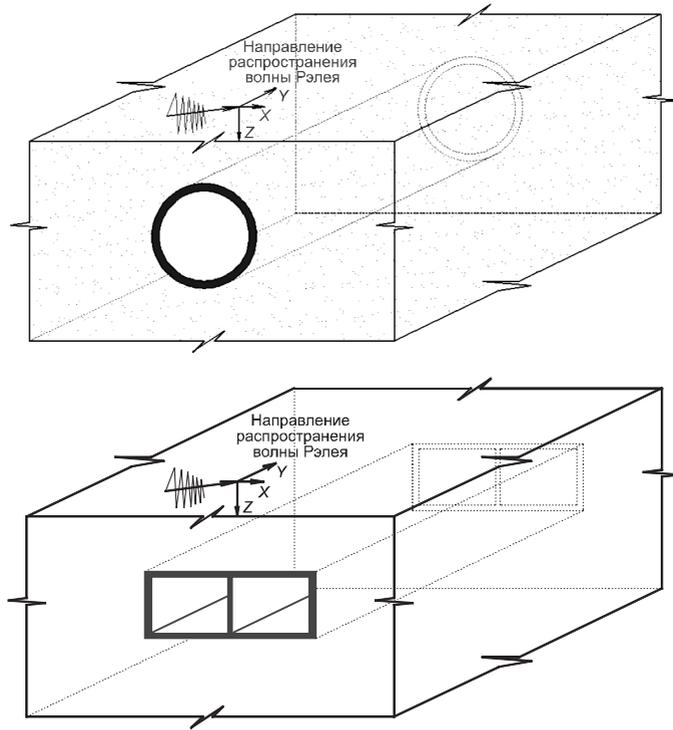


Рис. 1. Расчетные схемы тоннелей неглубокого заложения

Учитывая, что распространение сейсмических волн достаточно хорошо описывается линейными уравнениями теории упругости, для описания состояния грунта будет использоваться однородная, изотропная и упругая среда. Оси декартовой системы координат x и z совместим с горизонтальной плоскостью ($y = 0$), ограничивающей полупространство. Эта плоскость свободна от напряжений. Ось z направим в глубину полупространства, а ось x — вдоль горизонтальной поверхности (см. рис. 1). Движение частиц грунта происходит в вертикальной плоскости (x, z), компоненты перемещений u_y равны нулю. Оценим воздействие волн Рэлея на тоннели мелкого заложения. Волны Лява в этой работе не рассматриваются.

В качестве примера используются параметры землетрясения: (Loma Prieta) 17 октября 1989 г. Графики ускорений, скоростей, перемещений и их амплитудные спектры Фурье представлены на рис. 2–4.

3. Исходные данные. Характеристики грунта:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \text{ — скорость распространения продольных волн;}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \text{ — скорость распространения поперечных волн,}$$

где λ , μ и ρ — коэффициенты Лямэ и соответственно плотность материала грунта.

4. Дифференциальные уравнения и граничные условия. Для определения напряженно-деформированного состояния грунтового мас-

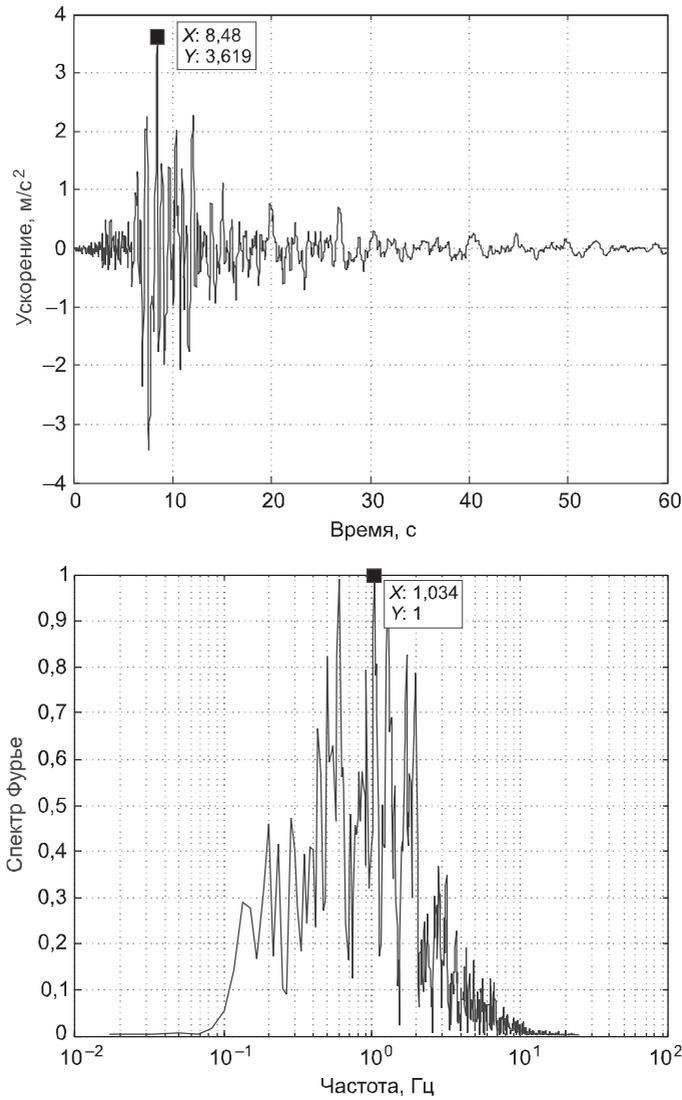


Рис. 2. Акселерограмма колебаний поверхности грунта и спектр Фурье
 PGA = 3,62 м/с², доминирующая частота $f_A = 1,03$ Гц

свива при распространении волн воспользуемся скалярными и векторными потенциальными функциями перемещений.

Компоненты перемещений определяются следующими выражениями:

$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}; \quad (1)$$

$$u_x = \frac{\partial \psi_z}{\partial y} - \frac{\partial \psi_y}{\partial z}; u_y = \frac{\partial \psi_z}{\partial z} - \frac{\partial \psi_z}{\partial x}; u_z = \frac{\partial \psi_y}{\partial x} - \frac{\partial \psi_x}{\partial y}. \quad (2)$$

При указанных выше условиях распространения волн компоненты перемещений выражаются через потенциальные функции в виде

$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi_y}{\partial z}; u_y = 0; u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi_x}{\partial x}. \quad (3)$$

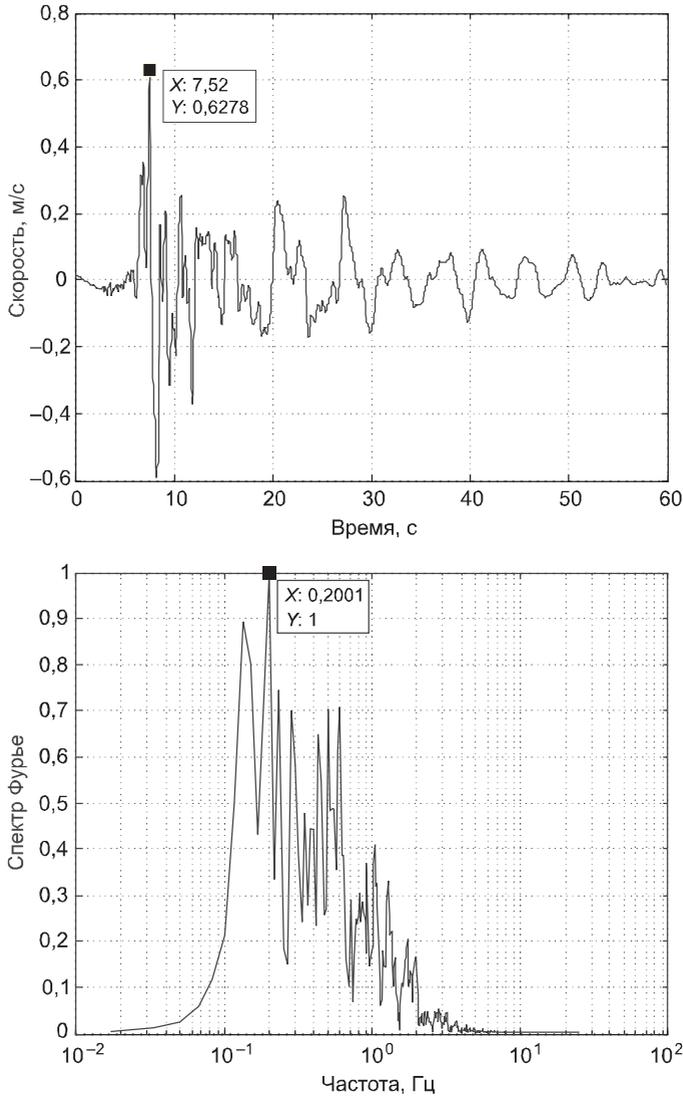


Рис. 3. Велосиграмма колебаний поверхности грунта и спектр Фурье
 PGV = 0,628 м/с, доминирующая частота $f_V = 0,20$ Гц

Напряжения определяются выражениями:

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x \partial z} \right); \quad (4)$$

$$\sigma_{yz} = 0; \quad (5)$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial z^2} \right). \quad (6)$$

Дифференциальные уравнения движения, выраженные через потенциальные функции, имеют вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}; \quad (7)$$

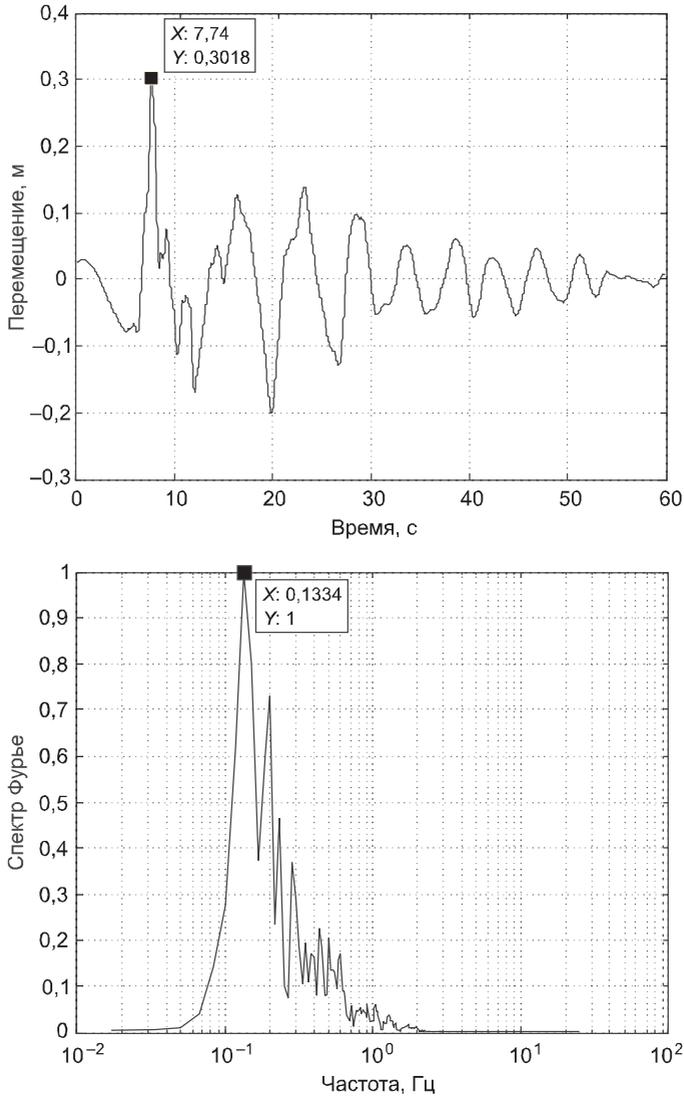


Рис. 4. Функция перемещений поверхности грунта и спектр Фурье
 PGD = 0,302 м, доминирующая частота $f_D = 0,133$ Гц

$$\frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial z^2} = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial t^2}. \quad (8)$$

Уравнение (7) описывает распространение продольных волн, уравнение (8) — поперечных. Применив преобразование Фурье по времени к этим уравнениям, получим:

$$\frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{\alpha^2} \tilde{\varphi} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\psi}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\psi}_y}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{\beta^2} \tilde{\psi}_y = 0. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) могут быть решены методом разделения переменных, с использованием представления изображений Фурье потенциальных функций в виде

$$\bar{\varphi}(x, z, \omega) = \tilde{f}_1(x, \omega) \tilde{f}_2(z, \omega) \quad \text{и} \quad \tilde{\psi}_y = \tilde{g}_1(x, \omega) \tilde{g}_2(z, \omega). \quad (11)$$

Из подстановки выражений (11) в уравнения (9) и (10) следует, что зависимости функций $\tilde{f}_1(x, \omega)$, $\tilde{f}_2(z, \omega)$ и $\tilde{g}_1(x, \omega)$, $\tilde{g}_2(z, \omega)$ от переменных x и z должны быть экспоненциальными. Таким образом, решения уравнений можно представить в виде:

$$\bar{\varphi}(x, y, \omega) = A(\omega) e^{Lx} e^{Mz} e^{\Omega t}; \quad (12)$$

$$\tilde{\psi}_y(x, y, \omega) = B(\omega) e^{Lx} e^{Nz} e^{\Omega t}, \quad (13)$$

при этом параметры L , M , N и Ω должны удовлетворять следующим характеристическим уравнениям:

$$M^2 + L^2 = \frac{\Omega^2}{\alpha^2} \quad \text{и} \quad N^2 + L^2 = \frac{\Omega^2}{\beta^2}. \quad (14)$$

Кроме того, для получения приемлемых решений эти параметры должны удовлетворять дополнительным условиям. Так как время может изменяться от $-\infty$ до $+\infty$, а упругое полупространство простирается в направлении оси от $-\infty$ до $+\infty$, для выполнения условия конечности значений потенциальных функций параметры Ω и L должны быть чисто мнимыми величинами. Поэтому положим $\Omega = i\omega$, где ω — любое действительное положительное или отрицательное число; $L = -il$, а l — любое действительное положительное или отрицательное число.

Параметр ω — частота, параметр l — волновое число. Произведение $e^{-ilx} e^{i\omega t} = e^{i\omega \left(t - \frac{l}{\omega} x \right)} = e^{i\omega \left(t - \frac{x}{c} \right)}$ представляет собой гармоническую волну, распространяющуюся в положительном направлении оси x с фазовой скоростью $c = \frac{\omega}{l}$.

Так как экспоненты e^{-mx} и e^{-nx} убывают при положительных и отрицательных значениях частоты ω , должны выполняться условия:

$$m = |\omega| \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{\alpha^2} \right)^{1/2} \quad \text{и} \quad n = |\omega| \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{\beta^2} \right)^{1/2}, \quad (15)$$

которые эквивалентны выражениям:

$$m = \omega (c^{-2} - \alpha^{-2})^{1/2} \operatorname{sgn} \omega \quad \text{и} \quad n = \omega (c^{-2} - \alpha^{-2})^{1/2} \operatorname{sgn} \omega,$$

параметры m и n должны быть действительными, т.е. $|c| < \beta < \alpha$.

Общие решения уравнений (9) и (10) имеют вид:

$$\bar{\varphi}(x, z, \omega) = [A_1(\omega) e^{mx} + A_2(\omega) e^{-mx}] e^{-ilz}; \quad (16)$$

$$\tilde{\psi}_y(x, z, \omega) = [B_1(\omega) e^{nx} + B_2(\omega) e^{-nx}] e^{-ilz}. \quad (17)$$

При условии отсутствия падающих продольных и поперечных волн необходимо приравнять нулю функции $A_1(\omega)$ и $B_1(\omega)$. Тогда изображения Фурье потенциальных функций определяются выражениями:

$$\bar{\varphi} = A_2(\omega)e^{-mz}e^{-ilx}; \quad \bar{\psi}_y = \bar{B}_2(\omega)e^{-nz}e^{-ilx}. \quad (18)$$

Во временной области потенциальные функции можно представить в виде интегралов:

$$\varphi(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_2(\omega)e^{-mz}e^{-ilx}e^{i\omega t} d\omega; \quad (19)$$

$$\psi(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_2(\omega)e^{-nz}e^{-ilz}e^{i\omega t} d\omega. \quad (20)$$

Множители $e^{-ilz}e^{i\omega t} = e^{i\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)}$ в выражениях (19) и (20) свидетельствуют о том, что эти выражения представляют собой гармонические волны, распространяющиеся в положительном направлении оси z с фазовой скоростью $c = \frac{\omega}{l}$, которая равна скорости распространения волн Рэлея c_R .

Условия равенства нулю нормальных и касательных напряжений на поверхности позволяют получить еще два соотношения:

$$\frac{A_2(\omega)}{B_2(\omega)} = -\frac{2i(1-c^2/\beta^2)^{1/2}\text{sgn}\omega}{2-c^2/\beta^2} \quad \text{и} \quad \frac{A_2(\omega)}{B_2(\omega)} = \frac{2-c^2/\beta^2}{2i(1-c^2/\alpha^2)^{1/2}\text{sgn}\omega}, \quad (21)$$

из равенства которых следует уравнение для определения фазовой скорости:

$$\left(2 - \frac{c^2}{\beta^2}\right)^2 - 4\left(1 - \frac{c^2}{\alpha^2}\right)^{1/2}\left(1 - \frac{c^2}{\beta^2}\right)^{1/2} = 0. \quad (22)$$

Действительный корень этого уравнения $c = c_R$ представляет собой скорость поверхностной волны Рэлея.

Введем обозначения: $\delta = \frac{\beta}{\alpha}$, $\delta_1 = \frac{c_R}{\alpha}$ и $\delta_2 = \frac{c_R}{\beta}$. Все эти отношения меньше единицы, так как $\alpha > \beta > c_R$. Кроме того, они зависят только от одного параметра — коэффициента Пуассона (рис. 5).

Учитывая, что $c = c_R$ и используя соотношения (21), получим выражения для определения изображений Фурье потенциальных функций:

$$\bar{\varphi} = A_2(\omega)e^{-mz}e^{-ilx}; \quad \bar{\psi}_y = A_2(\omega) \frac{2i\text{sgn}\omega\sqrt{1-\delta_1^2}}{2-\delta_2^2} e^{-nz}e^{-ilx}. \quad (23)$$

Функцию $A_2(\omega)$ можно определить, используя спектры Фурье перемещений, скоростей или ускорений поверхности грунта. Если известны параметры горизонтальных колебаний грунта при расчетном землетрясе-

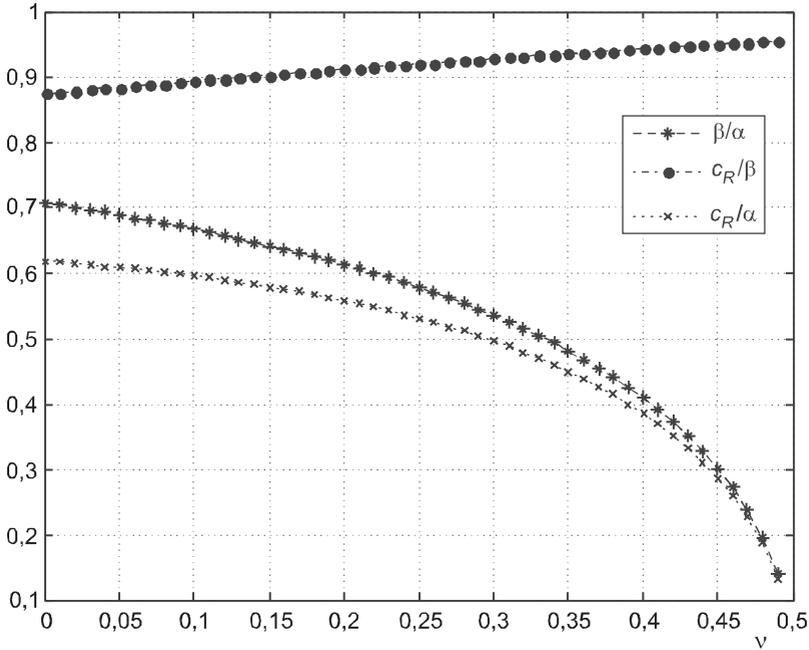


Рис. 5. Зависимость отношений скоростей распространения волн от коэффициента Пуассона ν

нии, можно, учитывая зависимость $u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_y}{\partial z}$, воспользоваться одной из трех представленных ниже формул:

$$\tilde{u}_x(0, 0, \omega) = A_2(\omega) \frac{i\omega}{c_R} \left(-1 + \frac{2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}}{2-\delta_2^2} \right); \quad (24)$$

$$\tilde{\dot{u}}_x(0, 0, \omega) = -A_2(\omega) \frac{\omega^2}{c_R} \left(-1 + \frac{2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}}{2-\delta_2^2} \right); \quad (25)$$

$$\tilde{\ddot{u}}_x(0, 0, \omega) = A_2(\omega) \frac{i\omega^3}{c_R} \left(-1 + \frac{2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}}{2-\delta_2^2} \right). \quad (26)$$

В качестве точки, в которой известно колебание поверхности, не теряя общности, можно принять точку с координатами $(x=0, z=0)$. Допустим, что известна функция скорости $\dot{u}_x(0, 0, t)$, описывающая горизонтальные колебания поверхности грунта при расчетном землетрясении. Тогда из уравнения (25) следует

$$A_2(\omega) = \frac{c_R(2-\delta_2^2)}{\omega^2 [(2-\delta_2^2) - 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}]} \tilde{\dot{u}}_x(0, 0, \omega), \quad (27)$$

где $\tilde{\dot{u}}_x(0, 0, \omega)$ — изображение Фурье функции $\dot{u}_x(0, 0, t)$.

Подставляя выражение $A_2(\omega)$ в уравнения (23), получим изображения Фурье потенциальных функций:

$$\tilde{\varphi} = \frac{c_R(2-\delta_2^2)}{\omega^2 [(2-\delta_2^2) - 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}]} \tilde{u}_x(0,0,\omega) e^{-mz} e^{-ilx}; \quad (28)$$

$$\tilde{\Psi}_y = \frac{2ic_R \text{sign}\omega \sqrt{1-\delta_1^2}}{\omega^2 [(2-\delta_2^2) - 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}]} \tilde{u}_x(0,0,\omega) e^{-nz} e^{-ilx}. \quad (29)$$

Для определения поля напряжений при распространении волны Рэлея воспользуемся выражениями напряжений, представленными через потенциальные функции:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial x \partial z} \right); \\ \sigma_{zz} &= \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial x \partial z} \right); \\ \sigma_{yy} &= \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right); \\ \sigma_{xz} &= \mu \varepsilon_{xz} = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (30)$$

Подставляя выражения (28) и (29) в уравнения (30), получим:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{xx} &= \left[-\frac{(\delta_2^2 + 2 - 2\delta_1^2)(2 - \delta_2^2)}{(2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}} e^{-mz} + \right. \\ &\left. + \frac{4\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}}{(2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}} e^{-nz} \right] \frac{\rho\beta}{\delta_2} \tilde{u}_x(0,0,\omega) e^{-ilx}; \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{zz} &= \left[\frac{(2 - \delta_2^2)^2}{(2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}} e^{-mz} - \right. \\ &\left. - \frac{4(\sqrt{1-\delta_1^2}\sqrt{1-\delta_2^2})}{(2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}} e^{-nz} \right] \frac{\rho\beta}{\delta_2} \tilde{u}_x(0,0,\omega) e^{-ilx}; \end{aligned} \quad (32)$$

$$\bar{\sigma}_{yy} = - \left(\frac{\rho c_R [2(1-\delta^2)(2-\delta_2^2)]}{[(2-\delta_2^2) - 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2}]} \right) \tilde{u}_x(0,0,\omega) e^{-mz} e^{-ilx}; \quad (33)$$

$$\bar{\sigma}_{zx} = \frac{\rho\beta 2i(2-\delta_2^2)\sqrt{1-\delta_1^2}}{\delta_2((2-\delta_2^2) + 2\sqrt{1-\delta_2^2}\sqrt{1-\delta_1^2})} \tilde{u}_x(0,0,\omega) (e^{-mz} - e^{-nz}) e^{-ilx}. \quad (34)$$

Учитывая, что волны Рэлея распространяются в направлении горизонтальной оси x без дисперсии, множители $e^{-i\omega x} = e^{-i\frac{\omega}{c_R}x}$ в выражениях (31)–(34) можно опустить.

Для упрощения выражений введем коэффициенты k_i , не зависящие от частоты:

$$\tilde{\sigma}_{xx} = \left[-k_1 e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} + k_2 e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right] \frac{\rho\beta}{\delta_2} \tilde{u}_x(0,0,\omega); \quad (35)$$

$$\tilde{\sigma}_{zz} = \left[k_3 e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} - k_4 e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right] \frac{\rho\beta}{\delta_2} \tilde{u}_x(0,0,\omega); \quad (36)$$

$$\tilde{\sigma}_{yy} = -k_5 \rho c_R \tilde{u}_x(0,0,\omega) e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z}; \quad (37)$$

$$\tilde{\sigma}_{zx} = k_6 i \left(e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} - e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right) \frac{\rho\beta}{\delta_2} \tilde{u}_x(0,0,\omega). \quad (38)$$

Коэффициенты k_i зависят от отношения скоростей распространения волн, т.е. только от коэффициента Пуассона:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{(\delta_2^2 + 2 - 2\delta_1^2)(2 - \delta_2^2)}{(2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1 - \delta_2^2} \sqrt{1 - \delta_1^2}}; & k_2 &= \frac{4\sqrt{1 - \delta_2^2} \sqrt{1 - \delta_1^2}}{(2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1 - \delta_2^2} \sqrt{1 - \delta_1^2}}; \\ k_3 &= \frac{(2 - \delta_2^2)^2}{(2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1 - \delta_2^2} \sqrt{1 - \delta_1^2}}; & k_4 &= \frac{4(\sqrt{1 - \delta_1^2} \sqrt{1 - \delta_2^2})}{(2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1 - \delta_2^2} \sqrt{1 - \delta_1^2}}; \\ k_5 &= \frac{[2(1 - \delta^2)(2 - \delta_2^2)]}{[(2 - \delta_2^2) - 2\sqrt{1 - \delta_2^2} \sqrt{1 - \delta_1^2}]}; & k_6 &= \frac{2(2 - \delta_2^2)\sqrt{1 - \delta_1^2}}{\delta_2((2 - \delta_2^2) + 2\sqrt{1 - \delta_2^2} \sqrt{1 - \delta_1^2})}. \end{aligned} \quad (39)$$

Повреждения тоннелей коррелируются с пиковыми значениями скоростей колебаний частиц грунта. Учитывая это, представим сейсмическое воздействие в виде синусоидальной волны с доминирующей частотой спектра скоростей, равной 0,2 Гц, и с амплитудой, равной пиковому значению скорости 0,63 м/с (см. рис. 3)

$$\begin{cases} \dot{u}_x(0,0,t) = V_{pic} \sin 2\pi f_V t = V_{pic} \sin \omega_V t = V_{pic} \frac{e^{i\omega_V t} - e^{-i\omega_V t}}{2i} \\ \tilde{u}(0,0,t) = \frac{V_{pic}}{2i} (\delta(\omega - \omega_0) - \delta(\omega + \omega_0)) \end{cases} \quad (40)$$

или

$$\begin{cases} \dot{u}_x(0,0,t) = V_{pic} \cos 2\pi f_V t = V_{pic} \cos \omega_V t = V_{pic} \frac{e^{i\omega_V t} + e^{-i\omega_V t}}{2} \\ \tilde{u}(0,0,t) = \frac{V_{pic}}{2} (\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)). \end{cases} \quad (41)$$

Выполнив обратное преобразование Фурье, получим выражения возможных напряжений в массиве грунта:

$$\sigma_{xx} = \left(-k_1 e^{-\frac{|\omega_0|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} + k_2 e^{-\frac{|\omega_0|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right) \frac{V_{pic} \rho \beta}{\delta_2} \cos(\omega_0 t); \quad (42)$$

$$\sigma_{zz} = \left[k_3 e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} - k_4 e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right] \frac{\rho \beta V_{pic}}{\delta_2} \cos(\omega_0 t); \quad (43)$$

$$\sigma_{yy} = -k_5 \rho c_R e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} V_{pic} \cos(\omega_0 t); \quad (44)$$

$$\sigma_{zx} = k_6 \left(e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} - e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right) V_{pic} \sin(\omega_0 t). \quad (45)$$

Тогда максимальные напряжения определяются формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} = \left(-k_1 e^{-\frac{|\omega_0|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} + k_2 e^{-\frac{|\omega_0|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right) \frac{\rho \beta V_{pic}}{\delta_2} \\ \sigma_{zz} = \left(k_3 e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} - k_4 e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right) \frac{\rho \beta V_{pic}}{\delta_2} \\ \sigma_{yy} = -k_5 \rho c_R e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} V_{pic} \\ \sigma_{zx} = k_6 \left(e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_1^2} z} - e^{-\frac{|\omega|}{c_R} \sqrt{1-\delta_2^2} z} \right) V_{pic} \end{array} \right. \quad (46)$$

В тех случаях, когда жесткость тоннельной обделки не отличается от жесткости замещенного массива грунта, напряжения на контуре обделки можно полагать равными напряжениям свободного поля (рис. 6).

Для учета влияния жесткости тоннельной обделки можно использовать коэффициенты передачи напряжений и коэффициенты передачи перемещений [2, 3]. С помощью коэффициентов передачи напряжений можно определить перемещения контура обделки.

5. Выводы. 1. Анализ спектров ускорений, скоростей и перемещений показывает, что доминирующие частоты этих спектров не совпадают друг с другом.

2. Разрушения тоннельных обделок коррелируются с пиковыми скоростями колебаний частиц грунта, поэтому для определения частот преобладающих гармоник необходимо использовать спектр скоростей.

3. Для определения сейсмического воздействия установлены напряжения и деформации свободного поля.

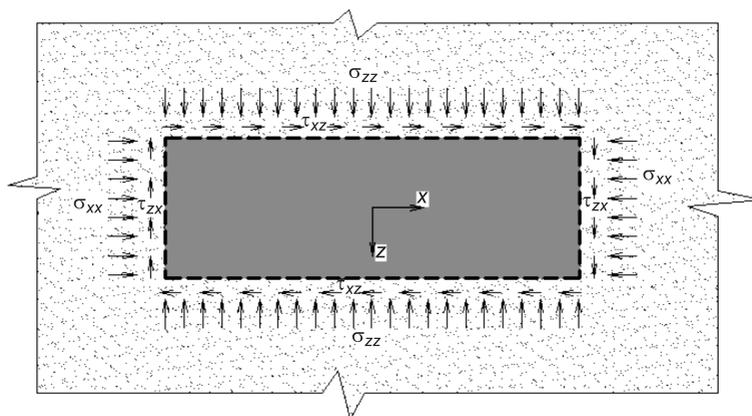


Рис. 6. Напряжения на контуре тоннеля, соответствующие напряжениям свободного поля

4. На предварительном этапе оценки сейсмического воздействия на тоннели мелкого заложения напряжения на контуре обделки можно определять с помощью параметров напряженно-деформированного состояния свободного поля, возникающего при распространении поверхностных волн Рэлея.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jeremy Hung, C. Technical manual for design and construction of road tunnels-civil elements [Текст] / С. Jeremy Hung, James Mosees, Nasri Munfah, John Wisniewki // US Department of Transportation Federal Highway Administration. — 2009. — N FHWA-NHI-10-034. — 702 p.
2. Wang, J. Seismic design of tunnels: Monograph 7 [Текст] / J. Wang. — New York : Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc., 1993. — 147 p.
3. Penzien, J. Seismically induced racking of tunnel linings [Текст] / J. Penzien // Journal of Earthquake Eng. Structural Dynamics. — 2000. — N 29. — P. 683–691.

КУРБАЦКИЙ Евгений Николаевич, д-р техн. наук, проф.
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)
НГУЕН Ван Хунг, асп.; E-mail: vanhungnguyen@mail.ru
Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)

Получено 02.12.14

Kurbatskiy Evgeniy Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor; Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Russia
Nguyen Van Hung, post-graduate student; E-mail: vanhungnguyen@mail.ru, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Russia

STRESS AND STRAIN SOIL STATES CAUSED BY SURFACE RAYLEIGH WAVES

Analysis of tunnels damage during earthquakes shows that the greatest damage occurs in shallow tunnels, as a result of the impact of Rayleigh waves. To assess the impact of seismic waves on structures it is necessary to determine the stress strain state of the soil in the vicinity of the tunnels. To determine the maximum stresses are used peak velocities of soil particles.

The dependence of the maximum value of the array of soil, which varies in depth, is obtained. For solutions using scalar and vector potential functions and the Fourier integral are used. The obtained results allow determining the internal forces in the tunnel lining using transmission coefficients of stresses and displacements transfer coefficients.

Key words: Rayleigh waves, potential functions, seismic effects and the Fourier transform.

REFERENCES

1. J e r e m y H u n g, C. Technical manual for design and construction of road tunnels-civil elements [Text] / C. Jeremy Hung, James Mosees, Nasri Munfah, John Wisniewki // US Department of Transportation Federal Highway Administration. — 2009. — N FHWA-NHI-10-034. — 702 p.
 2. W a n g, J. Seismic design of tunnels: Monograph 7 [Text] / J. Wang. — New York : Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc., 1993. — 147 p.
 3. P e n z i e n, J. Seismically induced racking of tunnel linings [Text] / J. Penzien // Journal of Earthquake Eng. Structural Dynamics. — 2000. — N 29. — P. 683–691.
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.542:539.4

Г.И. ОВЧАРЕНКО, А.В. ВИКТОРОВ, А.О. САДРАШЕВА

ВЛИЯНИЕ ВИДА ТОНКОИЗМЕЛЬЧЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Часть 2

Исследована прочность камня из теста нормальной густоты из смешанных цементов с добавками на основе кремнеземов (кварц, микрокремнезем), корунда, силикатов кальция (природный и искусственный волластониты, ранкинит), гидросиликатов кальция (тоберморит, ксонотлит), техногенных шлаков (доменные, топливные высококальциевые и каменноугольные кислые). Показано влияние гиперпластификатора глениум 115, длительности и условий (ТВО и нормальные) твердения на прочность камня с различными минеральными наполнителями, включающими структурно-активные разновидности.

Ключевые слова: структурно-активные минеральные добавки, прочность смешанных цементов, влияние пластификатора, длительности и условий твердения.

В первой части статьи [1] нами были исследованы некоторые структурно-активные минеральные добавки (САМД), обеспечивающие прирост прочности смешанных цементов за счет особенностей кристаллохимического строения их поверхностей. По эффекту действия данных добавок оставались нераскрытыми вопросы, связанные с длительным твердением или пропариванием цементов, а также с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ) в виде супер- и гиперпластификаторов. Последнее особенно актуально, так как ПАВ будет блокировать поверхность САМД, и эффект действия от добавки может снижаться или устраняться.

Сырьевые материалы и методы исследования описаны нами в [1]. Дополнительно для сравнения использовались прокаленные кислые золошлаки от сжигания каменных углей Кузбасса с п.п.п. не более 1 % и высококальциевая зола от сжигания бурых углей Канско-Ачинского месторождения. В качестве ПАВ использовали гиперпластификатор глениум 115 в дозировке 1 % от массы смешанного цемента.

Сравнительная эффективность добавок при длительном твердении в течение 3 мес приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, эффект от действия САМД, проявлявшийся в 28 сут, нивелируется со временем. Так, если превышение прочности цементов с добавками волластонита и ранкинита в 28 сут твердения составляет 27 и 21 % соответственно, с добавкой ДГШ — 22 %, то в возрасте 3 мес прочность цементов с этими добавками соответствует прочности контрольного состава. В то же время за этот срок прочность состава с кислыми золошлаками увеличивается на 29 % за счет пуццолановой реакции.

© Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Садрашева А.О., 2015

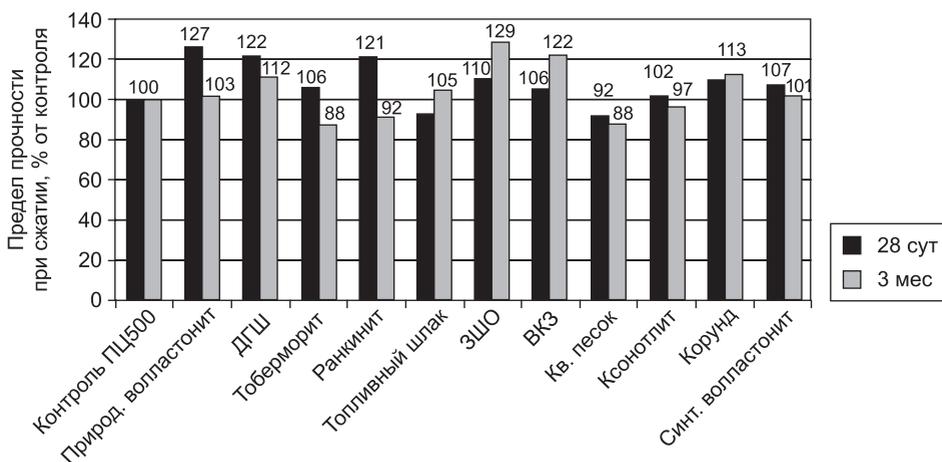


Рис. 1. Влияние вида добавок при их содержании 10 % на прочность цементного камня после твердения в нормальных условиях (цемент ПЦ500 Д0)

Картина меняется при твердении смешанных цементов с гиперпластификатором глениум 115 (рис. 2). В 28 сут структурно-активные минеральные добавки (вулканиты, ранкинит, ДГШ) по сравнению с контролем (контроль с глениумом) эффекта не проявляют. И, наоборот, при дальнейшем твердении до 3 мес значительно увеличивают прочность составов. Это можно объяснить блокированием поверхности структурно-активных добавок поверхностно-активным гиперпластификатором в ранние сроки твердения (до 28 сут) и в дальнейшем усилении эффекта от действия поверхности САМД в стесненных условиях в более плотном камне с меньшим В/Ц. Это подтверждает и рис. 3, на котором можно отметить более тесное расположение точек составов с глениумом в сравнении с аналогичным графиком без ПАВ [1, рис. 2], что указывает на нивелирование эффекта действия от влияния поверхности добавок.

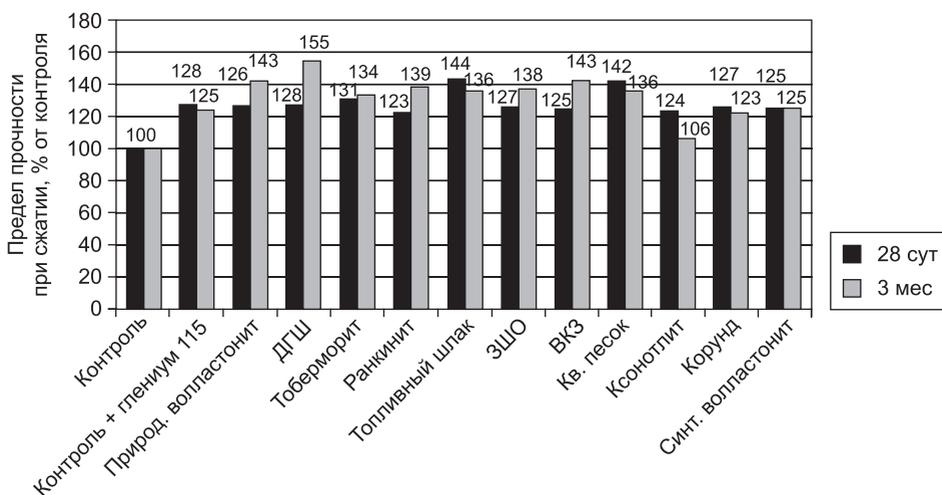


Рис. 2. Влияние вида добавок при их содержании 10 и 1 % гиперпластификатора глениум 115 на прочность цементного камня после твердения в нормальных условиях (цемент ПЦ500 Д0)

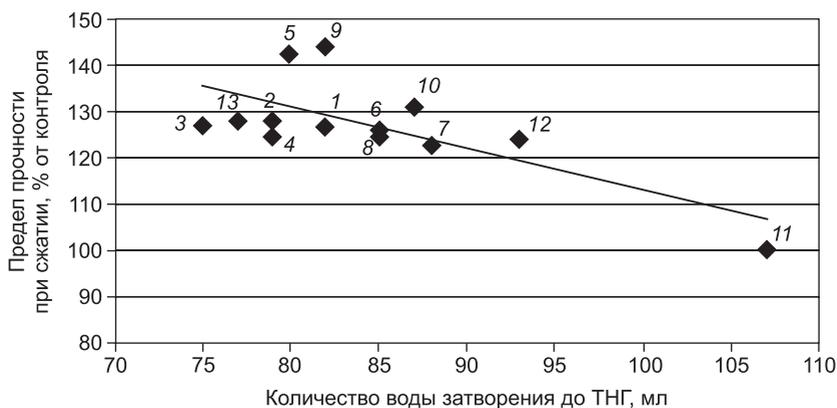


Рис. 3. Зависимость прочности цементного камня после 28 сут нормального твердения с 10 % минеральных добавок и 1 % гиперпластификатора глениум 115 от ТНГ (цемент ПЦ500 Д0)

1 — корунд; 2 — ДГШ; 3 — ЗШО; 4 — высококальциевая зола; 5 — тоберморит; 6 — природный волластонит; 7 — ранкинит; 8 — синтетический волластонит; 9 — топливный шлак; 10 — кварцевый песок; 11 — контроль; 12 — ксонотлит; 13 — контроль + глениум 115

Эксперименты по пропариванию цементов с САМД показали, что оно менее эффективно для таких добавок по сравнению с нормальными условиями твердения.

Выводы. 1. Структурно-активные минеральные добавки, имеющие определенное кристаллохимическое строение их поверхности, теряют эффект увеличения прочности камня при длительном твердении (до 3 мес) в составах без пластификаторов.

2. Пластифицирование смешанных цементов гиперпластификатором глениум 115 ликвидирует поверхностный эффект от структурно-активных минеральных добавок в 28 сут твердения, но усиливает его в поздние сроки (в 3 мес).

3. Эффективность структурно-активных минеральных добавок в составах смешанных цементов при пропаривании меньше по сравнению с нормальными условиями твердения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчаренко, Г.И. Влияние вида тонкоизмельченных минеральных добавок на прочность цементного камня. Часть 1. [Текст] / Г.И. Овчаренко, Е.Г. Аввакумов, А.В. Песоцкий, А.В. Викторов, А.О. Садрашева // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 12. — С. 19–24.

ОВЧАРЕНКО Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

ВИКТОРОВ Артем Владимирович, асп.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

САДРАШЕВА Айжана Олеговна, асп.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Получено после доработки 09.12.14

Ovcharenko Gennadiy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Altay State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Viktorov Artem Vladimirovich, post-graduate student, Altay State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Sadrasheva Ayiana Olegovna, post-graduate student, Altay State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

EFFECT OF THE TYPE OF FINELY GRINDING MINERAL ADDITIVES ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE

Part 2

Strength of the stone from the cement paste of mixed cements based on silica (quartz, silica fume), corundum, calcium silicates (natural and artificial wollastonite, rankinite), calcium hydrosilicates (tobermorite, xonotlite), slags (granulated blast furnace, high calcium coal) are investigated. Impact plasticizer Glenium 115, the long-term and conditions (steaming and normal) hardening on the strength of stone with various mineral fillers, including active structural variations are shown.

Key words: structurally active mineral additives, strength of blended cements, the plasticizer effect, effect of long-term and conditions of curing.

REFERENCES

1. Ovcharenko, G.I. Effect of the type of finely grinding mineral additives on the strength of cement stone. Part 1. [Text] / G.I. Ovcharenko, E.G. Avvakumov, A.V. Pesotskiy, A.V. Viktorov, A.O. Sadrasheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 12. — P. 19–24.

УДК 691.55:666.914.5

И.В. БЕЛАН, А.П. ПИЧУГИН, А.С. ДЕНИСОВ, В.Ф. ХРИТАНКОВ

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА В ЗАТВЕРДЕВШИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРАХ ИЗ СУХИХ СМЕСЕЙ

На основе исследований массопереноса в затвердевших строительных растворах из сухих строительных смесей изучена микропористая структура и предложены варианты повышения эксплуатационных свойств путем введения минеральных и полимерных добавок. Показано, что введение отходов хризотилцементного производства способствует микроармированию растворной смеси и снижению усадочных деформаций; добавка проникающей композиции дегидрол совместно с редиспергируемым полимерным порошком — сополимером винилацетата и этилена увеличивает адгезию раствора к стеновому материалу и устойчивость к старению в атмосфере. Это повышает прочность и долговечность строительного материала. Разработаны технологическая схема производства с дополнительными линиями подготовки и сушки компонентов, временные технические условия и осуществлено опытно-производственное внедрение.

К л ю ч е в ы е с л о в а: массоперенос, диффузия, пористая структура, сухие строительные смеси, минеральные и полимерные добавки.

Используемые сухие строительные смеси имеют ряд недостатков, к которым относятся: повышенные пористость и усадка, низкая трещиностойкость и недостаточная адгезионная способность затвердевших растворов. Эти показатели особенно важны в условиях значительного температурного перепада сибирского климата. Известно, что большинство свойств зависят от микроструктуры и структурных превращений в цементном камне, при этом важным фактором разрушения являются процессы массопереноса. Повышение эксплуатационных характеристик может быть достигнуто путем введения в их состав дополнительных добавок — минеральных и органических компонентов, вызывающих упрочнение структуры и усиление контактной зоны. Это может способствовать улучшению всех остальных качественных показателей [1].

Условия эксплуатации строительных конструкций зданий и сооружений в Сибири отличаются повышенным содержанием конденсационной влаги и насыщенными парами газов, что приводит к интенсивному разрушению (деградации) материалов. Наиболее очевидным фактором разрушения являются взаимодействия между жидкостью и твердым телом (растворение, кристаллизация, выщелачивание, сушка) и твердым телом и газом (адсорбция, десорбция) [1, 2].

В общем случае при малой концентрации диффундирующего вещества скорость диффузии (диффузионный поток) пропорциональна градиенту концентрации ∇C и имеет противоположное ему направление:

$$j_i = -\rho D \nabla C_i = -D \nabla \rho_i, \quad (1)$$

где j_i — диффузионный поток, т.е. поток массы данного компонента через единичную площадку в единицу времени;

D — коэффициент диффузии;

ρ — полная плотность смеси;

ρ_i — парциальная плотность одного компонента.

Анализ литературных источников показывает, что процессы массопереноса оказывают большое влияние на стойкость и долговечность строительных материалов, в том числе и искусственных строительных конгломератов, находящихся в условиях воздействия эксплуатационных сред. Показатели диффузионной проницаемости веществ важны для защитных композиций и материалов, работающих в условиях воздействия эксплуатационных сред. Для косвенной оценки показателей массопереноса экспресс-методом служит метод капиллярной пропитки, предложенный В.М. Казанским и И.Ю. Петренко, теоретической основой которого является параболическое уравнение массопереноса в изотермических условиях [3]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \nabla(a_m \nabla U). \quad (2)$$

Метод капиллярной пропитки достаточно удобен для измерения на его основе коэффициента переноса влаги, так как в этом случае массоперенос почти не осложнен теплопереносом. Для решения уравнения (2) вводится интегральный параметр:

$$\Psi = \frac{1}{l^2} \int_0^\tau d_m(\tau) d\tau, \quad (3)$$

который при $d_m = \text{const}$ совпадает с числом Фурье:

$$F = \frac{a_m \tau}{l^2}, \quad (4)$$

и тогда выражение (3) сводится к дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами [3]:

$$\frac{\partial U(x, y, z, \tau)}{\partial \Psi} = l^2 \Delta^2 U(x, y, z, \tau). \quad (5)$$

После соответствующих преобразований получены основные расчетные формулы, представляющие собой зависимости среднего по объему массосодержания U образца от времени τ , позволяющие рассчитать коэффициент $a_m(U)$ массопереноса, который для случая одномерной пропитки может иметь следующий вид [3]:

$$a_m = \frac{\pi l_1^2}{16} \frac{dv^2}{d\tau} \quad \text{при } 0 \leq v \leq 0,48; \quad (6)$$

$$a_m = -\frac{l_1^2}{\pi^2} \frac{d \ln(1-v)}{d\tau} \quad \text{при } 0,48 \leq v \leq 1, \quad (7)$$

где $v = U/U_m$ — относительное массосодержание образца;

U_m — максимальное массосодержание образца;

l_1 — толщина образца при обеспечении одномерной пропитки, достигаемой влагоизоляцией его боковых сторон.

По результатам измерений рассчитывалось максимальное массосодержание образцов по формуле [1–3]:

$$U_m = \frac{P_m - P_0}{P_0}, \quad (8)$$

а также относительное массосодержание в различные моменты времени

$$v = 1 - \frac{F_m - F}{P_m - P_0}. \quad (9)$$

Для всех значений $v < 0,48$ вычисляли вспомогательную величину v^2 , а для $v > 0,48$ — вспомогательную величину $\ln(1 - v)$. По результатам вычислений строились графики зависимости $v^2 = f_1(\tau)$ и $\ln(1 - v) = f_2(\tau)$, которые путем графического дифференцирования кривых с помощью формул (8) и (9) позволили определить коэффициент массопереноса a_m для разных моментов времени. Окончательным результатом исследований являются графики зависимости коэффициента массопереноса a_m от среднего относительного массосодержания v образца в совокупности с измеренным значением максимального массосодержания U_m и проницаемостью (рис. 1) [1–4].

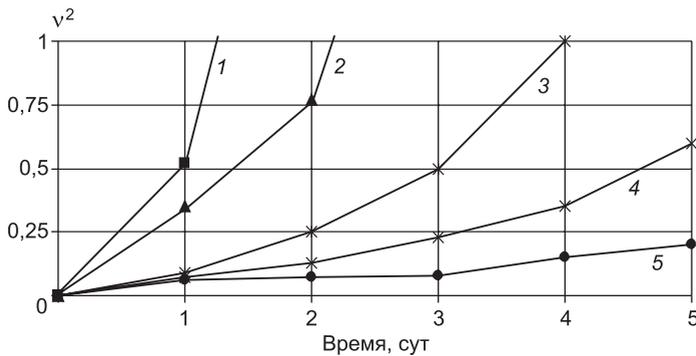


Рис. 1. Характеристики массопереноса в материалах (степень массонасыщения — коэффициент массопереноса)

1 — на керамзитовом песке без добавки; 2 — то же, на кварцевом песке; 3 — то же, с добавкой ОХЦ; 4 — то же, с ретиспергируемым полимерным порошком — сополимером ВАЭ; 5 — то же, + дегидрол

По вышеприведенным методикам определялись характеристики массопереноса в материалах и делались выводы об их соответствии и стойкости в реальных эксплуатационных средах сельскохозяйственного производства (см. рис. 1).

С учетом анализа полученных характеристик в виде основных кинетических зависимостей по распределению показателей от времени воздействия эксплуатационной среды на строительный раствор можно сделать следующие выводы. Характерные кривые зависимости диффузионных показателей от свойств и параметров строительных растворов с учетом сопротивляемости воздействию эксплуатационных сред зависят от ряда факторов: водопоглощения, проницаемости, толщины растворного слоя, температуры, общей и скрытой пористости.

Снижение степени массопереноса строительных растворов из сухих смесей связано с добавкой дегидрола и винилацетата и этилена (ВАЭ), оказывающих существенное влияние на пористую структуру цементного камня в растворной смеси (табл. 1). Отмечено, что при введении отходов хризотилцемента (ОХЦ) значительно увеличивается удельная поверхность пор (с 11–17 до 31–32 м²/г), общая суммарная пористость (с 0,069 до 0,168 см³/г), объем микропор (с 0,004–0,008 до 0,012 см³/г). В табл. 1 приведены показатели пористости контактных зон цементного камня с различными добавками направленного действия.

Таблица 1. Показатели пористости контактной зоны на заполнителе в строительном растворе

Цементный камень из строительного раствора на песке	Суммарная пористость, см ³ /г	Удельная поверхность, м ² /г		Объем микропор ($r < 2$ нм), см ³ /г	Эффективный радиус микропор, нм	Объем пор $r = 2-20$ нм, см ³ /г
		по интерферометру	по БЭТ			
Кварцевом без добавок	0,069	17	11	0,004	1,0–2,0	0,075
Керамзитовом без добавок	0,168	15	19	0,008	1,0	0,093
Шлаковом без добавок	0,124	13	16	0,007	1,0–2,0	0,097
Кварцевом с добавкой ОХЦ	0,440	32	31	0,012	1,0–4,0	0,092
Кварцевом с добавкой ВАЭ	0,027	13	13	0,004	1,0–2,0	0,096
Кварцевом с добавкой дегидрола	0,061	11	7	0,006	1,0–4,0	0,124
Кварцевом с добавкой ОХЦ, ВАЭ и дегидрола	0,043	14	12	0,007	1,0–2,0	0,166

При введении добавок направленного действия, в частности проникающей композиции дегидрол, может быть осуществлено регулирование параметров микропористости и диффузионной проницаемости. Это обеспечивает решение проблемы увеличения долговечности материала в конкретных эксплуатационных условиях.

На рис. 2 представлены кривые структурной пористости образцов цементного камня в строительных растворах из сухих смесей, из которых следует, что при введении дегидрола и ВАЭ большая часть объема пористой структуры переходит в зону пониженного размера пор. Это обеспечивает дополнительную стойкость материала за счет уменьшения проницаемости цементного камня, что отражено на графике (рис. 2, кривая 3).

Данная рецептура строительного раствора обеспечивает высокую эксплуатационную стойкость и непроницаемость в химических средах при ускоренных испытаниях (табл. 2).

Микро- и переходная пористость наиболее высока у затвердевшего цементного камня без соответствующих добавок, что объясняется значительно большим объемом вяжущего в растворах на единицу материала по сравнению с традиционными тяжелыми бетонами. Измерения переходной и макропористости для затвердевших минеральных вяжущих на границе с минеральными компонентами показали, что наименьший объем таких пор имеет цементный камень без добавок. Структура его в основ-

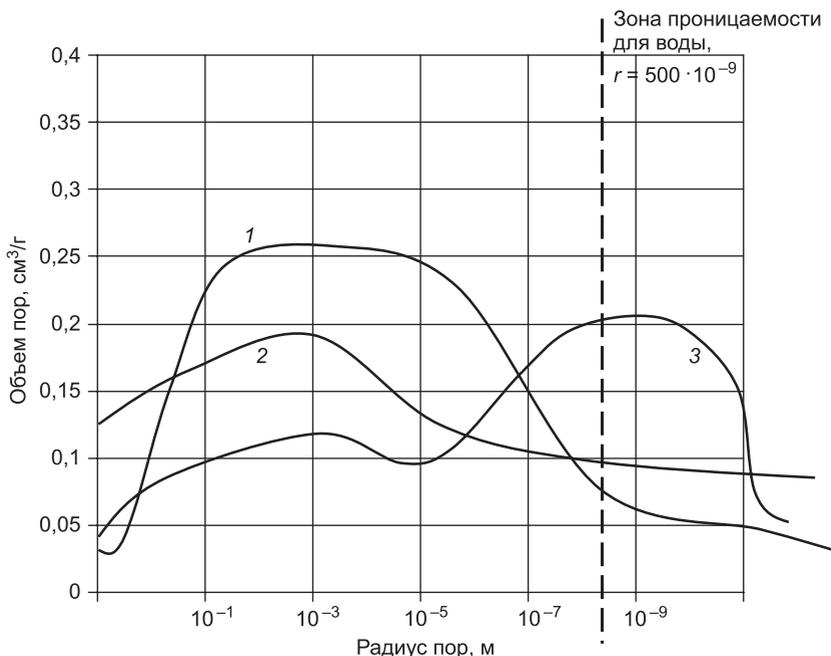


Рис. 2. Пористая структура цементного камня

1 — без добавок; 2 — с добавкой дегидрола; 3 — с добавкой дегидрола и ВАЭ

ном является макропористой, что подтверждается наименьшей внутренней удельной поверхностью при высокой суммарной пористости (рис. 2, кривая 1).

Интегральные и дифференциальные структурные кривые порометрических испытаний наглядно характеризуют пористую структуру цементного камня в строительном растворе с добавками. Основной объем падает на макропоры с радиусом более 10^{-7} м. При введении добавок существенно изменяется характер пористой структуры цементного камня, что подтверждается дифференциальными кривыми распределения объемов пор по их радиусам с ярко выраженным максимумом, лежащим в области пор с радиусом более 500 нм. Она соответствует зоне возможной фильтрации воды. При этом мельчайшие поры и капилляры (более крупные по диаметру, чем поры) образуются в гелевой фазе затвердевших вяжущих. Введение добавки дегидрола способствует коагуляции макропор и пере-

Таблица 2. Диффузионные характеристики строительных растворов из сухих смесей с добавкой дегидрола и ВАЭ

Химическая среда	Коэффициент		Поглощение химических реагентов, %
	диффузии D , см ³ /см	проницаемости, см/см ³	
Вода	0,43	0,08	0,26
Соляная кислота	0,61	0,23	0,74
Серная кислота	0,72	0,49	2,94
Углекислота	0,34	0,31	0,83
Аммиак	0,98	0,52	0,87

воду их в область микропористой структуры, о чем свидетельствует появление максимума при 10^{-9} м на кривой 3 (см. рис. 2). Эта особенность структуры совместно с физико-химическими свойствами обуславливает высокую водо- и морозостойкость цементных материалов с добавками дегидрола и ВАЭ.

Заключение. Проведены исследования процесса массопереноса в затвердевших строительных растворах из сухих смесей с добавками, позволившие установить взаимосвязь между степенью проницаемости, пористостью и прочностью материалов в результате изменения структурной пористости. Это подтверждается также результатами порометрических исследований. Комплекс физико-химических исследований, в том числе порометрические измерения, позволившие оценить наличие пор различного диаметра в цементном камне строительных растворов из сухих смесей, показал положительное влияние добавок проникающей композиции дегидрол и релаксанта полимерного порошка — сополимера винилацетата и этилена на формирование микропористой структуры. Их введение способствует созданию благоприятных условий для повышения сопротивляемости материала эксплуатационным воздействиям. Установлены особенности структуры в зависимости от рецептуры составов, определяющие высокие физико-химические свойства рекомендованных вариантов строительного раствора из сухих смесей с добавками направленного действия. Показано их упрочняющее влияние, обеспечивающее долговременную и надежную работу строительного раствора в стеновых конструкциях зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пичугин, А.П. Сухие строительные смеси с повышенными эксплуатационными характеристиками: моногр. [Текст] / А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков, И.В. Белан. — Новосибирск : НГАУ-РАЕН, 2014. — 165 с.
2. Белан, И.В. Разработка составов сухих строительных смесей с повышенными эксплуатационными характеристиками [Текст] / И.В. Белан, Т.К. Акчурин, А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков // Изв. Волгогр. гос. архитектурно-строит. ун-та. — 2014. — № 2. — С. 34–38.
3. Казанский, В.М. Физические методы исследования структуры строительных материалов [Текст] / В.М. Казанский, И.Ю. Петренко. — Киев : КИСИ, 1984. — 76 с.
4. Белан, И.В. Сухие строительные смеси с активными и микроармирующими добавками [Текст] / И.В. Белан, А.П. Пичугин, А.С. Денисов // Инновационные разработки и новые технологии в строительном материаловедении: междунар. сб. науч. тр. — Новосибирск : НГАУ-ТГАСУ-РАЕН, 2014. — С. 186–190.

БЕЛАН Иван Васильевич, асп.

Новосибирский государственный аграрный университет

ПИЧУГИН Анатолий Петрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный аграрный университет

ДЕНИСОВ Александр Сергеевич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный аграрный университет

ХРИТАНКОВ Владимир Федорович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный аграрный университет

Belan Ivan Vasilievich, post-graduate student, Novosibirsk State Agrarian University, Russia

Pichugin Anatoliy Petrovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Agrarian University, Russia

Denisov Alexandr Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Agrarian University, Russia

Hritankov Vladimir Fedorovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Agrarian University, Russia

THE STUDY OF THE STRUCTURE AND PROCESS OF MASS TRANSFER IN THE HARDENED BUILDING SOLUTIONS FROM DRY MIXES

On the basis of the conducted studies of mass transfer in the hardened construction solutions from dry building mixtures studied microporous structure and proposed ways to improve operational properties by the introduction of mineral and polymer additives. It is shown that the introduction of waste christinamodel production promotes microarray mortar and reduce shrinkage deformation; additive penetrating composition digital together with redispersible polymer powder is a copolymer of vinyl acetate and ethylene increase the adhesion of the solution to stenosoma material and resistance to aging in the atmosphere. This contributes to the strength and durability of construction material. Developed technological scheme of production with additional lines of preparation and drying of components, temporary technical requirements and implemented a pilot plant implementation.

Key words: mass transfer, diffusion, porous structure, dry mixes, mineral and polymer additives.

REFERENCES

1. Pichugin, A.P. Dry building mixtures with enhanced performance characteristics: Monogr. [Text] / A.P. Pichugin, V.F. Hritankov, I.V. Belan. — Novosibirsk : NSAU-RANS, 2014. — 165 p.
2. Belan, I.V. Development of dry mixes with enhanced performance characteristics [Text] / I.V. Belan, T.K. Akchurin, A.P. Pichugin, V.F. Hritankov // Proceedings of the Volgograd state architectural and construction University. — 2014. — N 2. — P. 34–38.
3. Kazanskiy, V.M. Physical methods of investigating the structure of building materials [Text] / V.M. Kazanskiy, I.Yu. Petrenko. — Kyiv : Kari, 1984. — 76 p.
4. Belan, I.V. Dry building mixtures with active and microarrays additives [Text] / I.V. Belan, A.P. Pichugin, A.S. Denisov // Innovative designs and new technologies in building materials science: proc. sat. the scientific. tr. — Novosibirsk : NSAU-science-RANS, 2014. — P. 186–190.

УДК 691.51:666.92

В.И. ЛОГАНИНА, И.С. ПЫШКИНА

**СТОЙКОСТЬ ИЗВЕСТКОВЫХ ПОКРЫТИЙ
С ДОБАВКОЙ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ
ГИДРОСИЛИКАТОВ**

Приведена оценка гидрофизических свойств покрытий на основе известковой сухой строительной смеси с применением добавок, синтезированных в присутствии гидросиликатов кальция. Показано, что введение добавок гидросиликатов способствует повышению водостойкости и морозостойкости покрытий.

Ключевые слова: добавка, гидросиликаты кальция, сухие строительные смеси, диатомит.

В проведенных ранее исследованиях была подтверждена эффективность введения в рецептуру отделочных известковых сухих строительных смесей (ССС) минеральных добавок на основе синтезированных гидросиликатов кальция, способствующих повышению стойкости известковых покрытий [1, 2]. Синтез добавки заключался в осаждении из жидкого стекла в присутствии раствора хлорида кальция. Известковые составы с применением синтезированных гидросиликатов кальция (ГСК) образуют покрытия повышенной водостойкости (коэффициент размягчения составляет $K_{\text{разм}} = 0,61$).

Синтезируемые гидросиликаты представляют собой смесь низко- и высокоосновных гидросиликатов. Учитывая, что низкоосновные гидросиликаты кальция обладают более высокой прочностью, в дальнейших исследованиях при синтезе добавки использовали вещества, содержащие аморфный кремнезем, в частности, диатомит Инзенского месторождения.

В работе изучались два режима синтеза ГСК: 1-й — осаждение в присутствии 15%-го раствора CaCl_2 в количестве 50 % от массы жидкого стекла; 2-й — осаждение в присутствии 10%-го раствора CaCl_2 в количестве 50 % от массы жидкого стекла с добавлением диатомита, при этом соотношение жидкость : твердая фаза составляло 1 : 2. Полученный осадок высушивался при температуре 100 °С.

Синтезированные добавки применялись для разработки рецептуры известковой ССС. Разработанная рецептура включает в себя известь пушонку 2-го сорта, кварцевый песок 80 % фракции 0,63–0,315, 20 % фракции 0,315–0,14. Для регулирования структурно-механических характеристик известкового композита в рецептуру были введены пластифицирующая добавка кратасол — ПФМ в количестве 1 % от массы извести, редуцируемый порошок Neolith P-4400 0,3 %, гидрофобизатор Zinchip-5 в количестве 0,5 % от массы извести. Содержание добавки ГСК составляло 30 % от массы извести. Готовились смеси с водоизвестковым отношением В/И = 1,2.

Выявлено, что в возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения прочность при сжатии $R_{сж}$ известковых образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму, выше и составляет $R_{сж} = 5,5$ МПа, в то время как у известковых образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму, $R_{сж} = 2,86$ МПа. Прочность при сжатии контрольного образца $R_{сж} = 1,475$ МПа [3].

Для оценки эксплуатационной стойкости покрытий на основе известковой ССС были проведены испытания на морозостойкость путем попеременного оттаивания и замораживания отделочного слоя, нанесенного на цементно-песчаное основание, после 28 сут воздушно-сухого твердения. Оценку внешнего вида покрытий проводили по ГОСТ 6992–68 «Покрытия лакокрасочные. Метод определения устойчивости покрытия в атмосферных условиях». За «отказ» принималось состояние покрытия, оцененное III.4 баллами (табл. 1).

Таблица 1. **Качество внешнего вида покрытия**

Состав	Количество циклов	Балл
Известковый с добавкой на основе гидросиликатов кальция, синтезированных по 1-му режиму	До испытания	V.8
	6	V.8
	12	V.8
	18	V.7
	24	V.6
	30	V.6
	35	V.5
	40	IV.4
Известковый с добавкой на основе гидросиликатов кальция, синтезированных по 2-му режиму	До испытания	V.8
	6	V.8
	12	V.8
	18	V.7
	24	V.7
	30	V.7
	35	V.5
	40	V.4
	45	IV.4

Установлено, что известковые образцы с добавкой на основе ГСК выдержали 35 циклов испытания, при этом состояние покрытия после 35 циклов испытания оценено V.5 баллами, что соответствует состоянию покрытия с потерей блеска до 5 %, с едва заметным изменением цвета и отсутствием белесоватости, бронзирования, грязеудержания, отслаивания, растрескивания, сыпи и пузырей поверхности. Начиная с 24 циклов замораживания-оттаивания, наблюдается отличие в состоянии покрытий. Так, после 30 циклов оценка состояния покрытий на основе состава с ГСК (1-й режим синтеза) составляет V.6 баллов, а покрытий на основе состава с ГСК (2-й режим синтеза) — V.7 баллов (см. табл. 1).

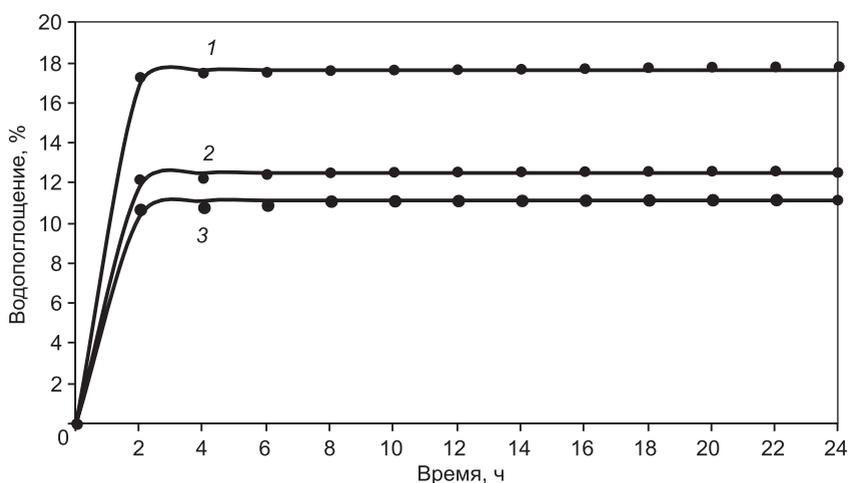
Более высокая стойкость к переменному замораживанию-оттаиванию покрытий на основе состава с ГСК (2-й режим синтеза) обусловлена, на наш взгляд, изменением пористой структуры. Установлено, что введение в рецептуру известковых составов добавок на основе ГСК приводит к снижению пористости. Так, пористость образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму, составляет $P = 29,7 \%$, а с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму, — $26,7 \%$ (табл. 2).

Таблица 2. Пористость известковых композитов, %

Состав	$P_{\text{закр}}$	$P_{\text{откр}}$	$P_{\text{общ}}$
Контрольный	7,1	28	35,1
Известковый с добавкой на основе гидросиликатов кальция, синтезированных по 1-му режиму	5,4	24,3	29,7
Известковый с добавкой на основе гидросиликатов кальция, синтезированных по 2-му режиму	4,5	22,2	26,7

Известковые покрытия на основе составов с добавкой ГСК характеризуются повышенной водостойкостью. Так, коэффициент размягчения у известковых образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму, составляет $K_{\text{разм}} = 0,61$, в то время как у известковых образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму, — $K_{\text{разм}} = 0,73$. Коэффициент размягчения контрольных образцов $K_{\text{разм}} = 0,29$.

На рисунке приведены кривые водопоглощения по массе известковых композитов. Производилась аппроксимация данных с помощью программы SigveExpert 1.3. Исходя из результатов аппроксимационных и экспериментальных исследований, следует, что у известковых образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму, водо-



Водопоглощение по массе известковых композитов

1 — контрольный состав на известковом вяжущем; 2 — состав с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму; 3 — состав с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 2-му режиму

поглощение ниже, чем с добавкой на основе ГСК, синтезированных по 1-му режиму.

Кривые, представленные на рисунке, описываются экспоненциальным уравнением:

$$y = a(1 - e^{-bx}), \quad (1)$$

где a — константа, учитывающая максимально возможное водопоглощение;

b — константа скорости водопоглощения;

x — время.

Значения констант a и b приведены в табл. 3. Результаты расчета свидетельствуют, что константа скорости водопоглощения образцов на основе составов с добавкой ГСК значительно ниже и составляет 1,512–1,754 ч⁻¹.

Таблица 3. Значения констант уравнения водопоглощения

Состав	a	b
Контрольный	17,671	1,902
Известковый с добавкой на основе гидросиликатов кальция, синтезированных по 1-му режиму	12,517	1,754
Известковый с добавкой на основе гидросиликатов кальция, синтезированных по 2-му режиму	11,117	1,512

Таким образом, составы с добавкой на основе ГСК, синтезированных в присутствии диатомита, формируют покрытия с повышенной водостойкостью и стойкостью к переменному оттаиванию и замораживанию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логанина, В.И. Тонкодисперсные наполнители на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей [Текст] / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Ю.А. Мокрушина // Строительные материалы. — 2010. — № 2. — С. 36–39.
2. Логанина, В.И. Повышение водостойкости покрытий на основе известковых отделочных составов [Текст] / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, С.Н. Кислицина, К.А. Сергеева // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 1. — С. 41–46.
3. Логанина, В.И. Разработка наполнителя для сухих строительных смесей на основе гидросиликатов кальция с применением опал-кристобалитовых пород [Текст] / В.И. Логанина, И.С. Пышкина // Академ. вест. УралНИИпроект РААСН. — 2014. — № 2. — С. 96–98.

*ЛОГАНИНА Валентина Ивановна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: loganin@mail.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ПЫШКИНА Ирина Сергеевна, асп.; E-mail: glazycheese@gmail.com
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено 17.12.14

Loganina Valentina Ivanovna, doctor of technical sciences, professor; E-mail: loganin@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia
Pyshkina Irina Sergeevna, post-graduate student; E-mail: glazycheese@gmail.com, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

RESISTANCE OF MORTAR WITH THE ADDITIVE BASED ON SYNTHETIC HYDROSILICATES

The assessment of hydro-physical properties of the coatings on the basis of dry lime mortar using additives synthesized in the presence of calcium Hydrosilicates. It is shown that supplementation improves the water resistance of hydrosilicates and frost coatings.

Key words: additive, hydrous calcium, dry mixes, diatomite.

REFERENCES

1. Loganina, V.I. Fine fillers based on calcium silicate for dry construction mixtures [Text] / V.I. Loganina, L.V. Makarova, Yu.A. Mokrushina // Building materials. — 2010. — N 2. — P. 36–39.
 2. Loganina, V.I. Increase of water resistance of coverings on the basis on limy finishing structures [Text] / V.I. Loganina, L.V. Makarova, S.N. Kislitsyna, K.A. Sergeeva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 1. — P. 41–46.
 3. Loganina, V.I. Development filler for dry construction mixtures based on calcium Hydrosilicates using opalkristobalitovyh rocks [Text] / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina // Academic Gazette UralNIiproekt RAASN. — 2014. — N 2. — P. 96–98.
-

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.05:658.512.6

Ю.Б. КАЛУГИН

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СРОКОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА С ВЕРОЯТНОСТНЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Изложен метод оценки сроков выполнения работ с вероятностными временными параметрами, основанный на последовательной композиции распределений сроков свершения событий. Сравнение алгоритма с известными методами PERT и «Монте-Карло» показало его эффективность. Отклонения от истинного значения математического ожидания сроков свершения событий не превышают 5 %.

Реализация предлагаемого метода позволит еще на стадии планирования определить наиболее вероятные сроки выполнения комплексов работ, повысить надежность и достоверность календарных планов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: календарное планирование и управление проектом, метод критического пути с неопределенными продолжительностями работ, законы распределения продолжительности, вероятное время окончания проекта, вычислительный алгоритм, методы PERT и «Монте-Карло».

Исследование вероятностных параметров календарных планов [1–3] показало, что на их итоговые показатели (достоверность, надежность) влияют, прежде всего, параметры отдельного технологического процесса, а также структура календарного плана (насыщенность, совмещенность работ) и иерархическая структура исполнителей. Сроки свершения событий календарного плана с детерминированными временными оценками устанавливаются достаточно тривиально. Сущность задачи в случае вероятностных временных параметров рассмотрена в [1].

Процессы или работы (в данном случае $i-j$ и $k-l$) выполняются параллельно по времени и определяют после совместного завершения срок раннего начала работы $m-n$. Очевидно, что этот срок определится максимальным из ранних сроков окончания:

$$t_{mn}^{PH} = \max(t_{ij}^{PO}, t_{kl}^{PO}). \quad (1)$$

Продолжительности выполнения каждой работы являются случайными величинами (X и Y), подчиненными соответствующим законам распределения $f_1(x)$ и $f_2(y)$.

В этих условиях требуется найти закон распределения величины:

$$Z = \max(X, Y). \quad (2)$$

В отсутствии функциональной связи между параллельными работами решение поставленной задачи реализовано с помощью универсального метода расчета вероятностных параметров следующим образом:

1. Площадь под кривой плотности распределения случайной величины (продолжительности работы) делится на 12 равных площадей, равных $0,0833\Phi_0$, центры тяжести которых (t) и определяют 12 равновероятных значений продолжительности выполнения данной работы.

2. Устанавливаются вероятностные параметры начальных событий работ ij и kl .

3. Определяются вероятные сроки раннего окончания работ суммированием параметров начального события и вероятностных параметров продолжительности выполнения работы.

4. Поздний срок свершения события устанавливается путем последовательной парной композиции 12 равновероятных сроков раннего окончания одной работы с 12 равновероятными сроками раннего окончания другой, при выборе максимального в каждой композиции (2).

В результате формируется ряд из 144 равновероятных значений. С целью сокращения размерности для дальнейших расчетов этот ряд укрупняется в ряд из 12 равновероятных значений позднего срока свершения события m .

Для данного метода возникает задача определения минимально необходимого числа значений равновероятных сроков (количества равных площадей под кривой плотности распределения). Очевидно, что с увеличением их числа точность расчетов будет возрастать. Вместе с тем будут возрастать и вычислительные сложности.

Пусть для двух параллельных работ с совместным событием их окончания продолжительность каждой распределена в соответствии с нормальным законом. При этом функция Лапласа

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (3)$$

где $t = (x - m) / \sigma$.

При делении площади под кривой плотности распределения на две равные части значения центра тяжести одной составит $+0,6745$, а другой $-0,6745$. С учетом того что в трех случаях из четырех значение x составит $0,6745$, а в одном $-0,6745$, средневзвешенное значение x $0,33724$.

При делении площади под кривой плотности распределения на четыре равные части значения их центров тяжести составят $1,15035$ и $-1,15035$, а также $0,31864$ и $-0,31864$. Последовательно парная композиция вероятностных параметров двух параллельных работ при выборе максимального значения в каждой композиции предполагает, что в семи случаях из шестнадцати значение x равно $1,15035$, в пяти $0,31864$, в трех $-0,31864$, в одном $-1,15035$. Средневзвешенное значение x для 16 вариантов (математическое ожидание) $0,47121$.

Аналогичные расчеты были выполнены и для других вариантов (8, 10, 12, 14, 16, 32, 64, 128, 256, 512 равных площадей) (табл. 1).

Таблица 1. Результаты расчета вероятностных параметров двух параллельных работ с равными временными параметрами

Показатель	Значения математического ожидания позднего срока свершения совместного события (x) в зависимости от количества равных площадей (n)												
	n	2	4	8	10	12	14	16	32	64	128	256	512
x		0,33724	0,47121	0,52494	0,53426	0,54014	0,54419	0,54709	0,55654	0,56069	0,56256	0,56342	0,56385
Δ_i			0,13397	0,05373				0,02215	0,00945	0,00415	0,00187	0,00086	0,00042
q		1	1/2,493	1/2,426				1/2,345	1/2,276	1/2,219	1/2,174	1/2,048	
$(x_i - x^*)_0\%$		40,2	14,8	6,97	5,32	4,28	3,56	3,04	1,37	0,63	0,30	0,15	0,07

Для ряда $n = 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512$ установлены разности Δ_i в смежных значениях x . Ряд Δ_i является бесконечно убывающей геометрической прогрессией с суммой

$$S = \frac{\Delta_i}{1-q}, \tag{4}$$

где q — знаменатель прогрессии.

Тогда для n_{512} остаточная сумма ряда Δ_i не более 0,00042. Точное значение x^* не превысит 0,56427. Принимая эту величину за истинное значение (которое незначительно уменьшится), можно установить и значения отклонений x_i от x^* для различных вариантов в процентах. Учитывая требуемую точность расчета вероятностных временных параметров 5 %, можно утверждать, что при использовании универсального алгоритма деление площади под кривой плотности распределения на 12 равных частей обеспечит требуемую точность (возможные отклонения расчетных параметров, полученных при использовании данного алгоритма, не превысят 4–5 % от истинных значений).

Вызывает существенный интерес и сравнение изложенного метода с методами PERT и статистических испытаний («Монте-Карло»). С этой целью для сетевой модели, представленной на рис. 1, с продолжительностями работ, подчиняющимися бета-распределению [4, рис. 10], были выполнены соответствующие расчеты.

Результаты расчетов (табл. 2) показали следующее:

1. Математическое ожидание сроков свершения события 65 составило 801,19 дн.

2. С вероятностью $P(t) = 0,75$ все работы закончатся в течение 817,03 дн.

3. С вероятностью $P(t) = 0,25$ все работы завершатся в течение 785,5 дн.

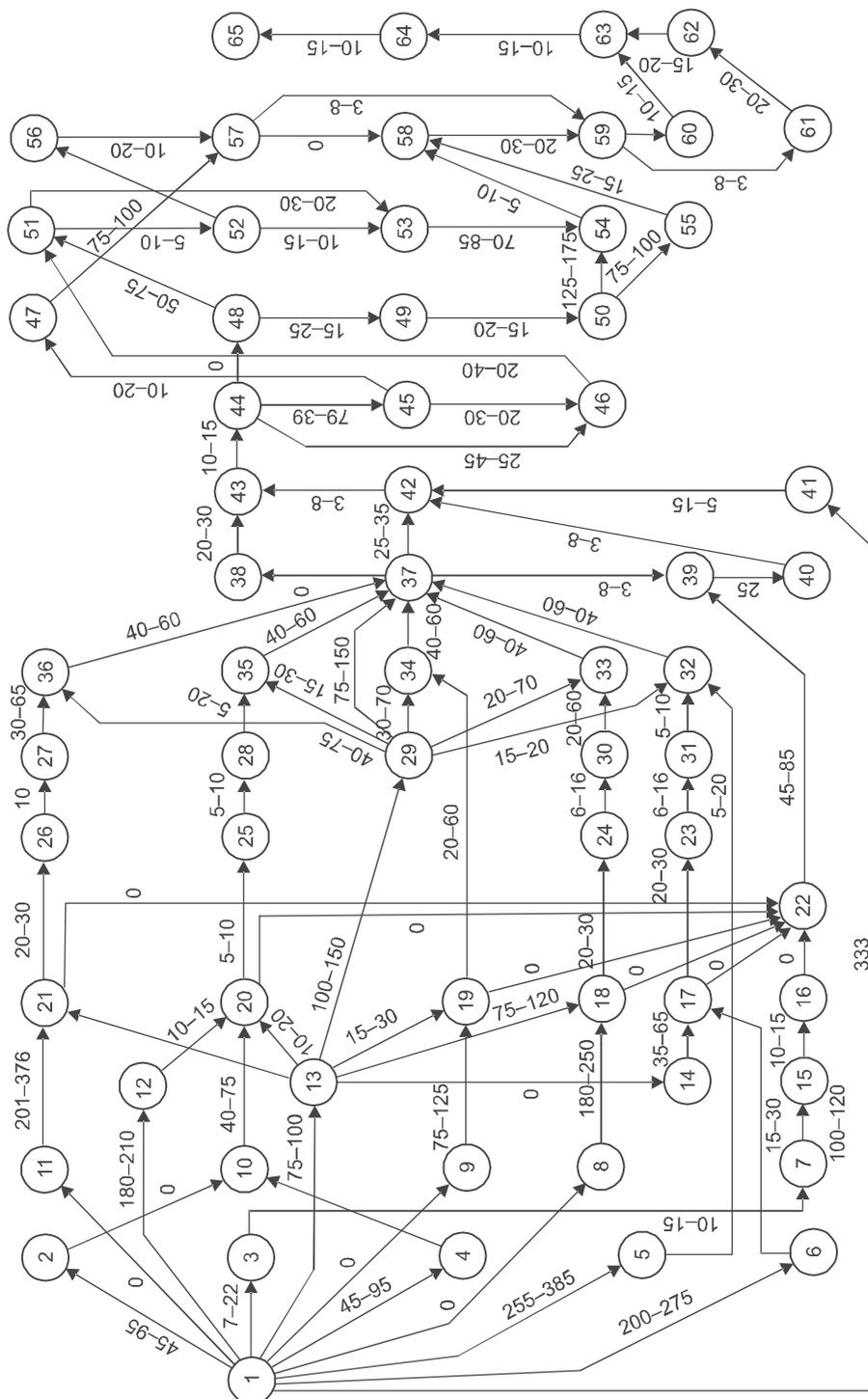


Рис. 1. Расчетная сетевая модель

Гистограмма плотности распределения сроков свершения события 65 представлена на рис. 2.

На рис. 3 приведены графики плотностей распределения времени выполнения проекта, полученные по детерминированной схеме PERT (при которой вероятностные параметры рассчитываются лишь для критических

Таблица 2. Расчеты вероятностных параметров событий сетевой модели (см. рис. 1)

Событие	Равновероятные сроки свершения событий														МО	$P(t) 0,75$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	47,13	49,36	51,70	54,18	56,81	59,65	62,73	66,13	70,00	74,59	80,57	85,00	89,99	94,99	99,99	104,99
3	7,64	8,31	9,01	9,75	10,54	11,40	12,32	13,34	14,50	15,88	17,67	19,99	22,70	25,99	29,99	34,99
4	47,13	49,36	51,70	54,18	56,81	59,65	62,73	66,13	70,00	74,59	80,57	85,00	89,99	94,99	99,99	104,99
5	260,53	266,3360	272,420	278,855	285,711	293,090	301,085	309,938	320,000	331,929	347,474	365,000	384,36	405,96	430,96	458,96
6	203,19	206,54	210,05	213,76	217,72	221,98	226,59	231,70	237,50	244,38	253,35	263,99	275,00	287,48	301,94	318,94
7	18,73	19,92	20,83	21,65	22,52	23,39	24,33	25,34	26,52	27,95	30,01	33,94	39,59	48,24	61,24	79,24
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	51,35	55,933	59,4	62,7	65,8	68,7	71,1	74,6	78,6	80,6	83,8	87,9	92,47	97,57	103,57	110,57
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
12	181,3	182,616	184	186	187	189	191	193	195	198	201	210	219,39	229,38	240,38	252,38
13	76,06	77,18	78,4	79,6	80,9	82,3	83,9	85,6	87,5	89,8	92,8	100	109,49	119,65	130,65	142,65
14	76,06	77,18	78,4	79,6	80,9	82,3	83,9	85,6	87,5	89,8	92,8	100	109,49	119,65	130,65	142,65
15	121,9	124,388	126	128	129	131	132	134	136	138	141	146	152,19	158,69	165,69	173,69
16	133,5	136,123	138	140	141	143	144	146	148	150	153	158	164,09	170,73	177,73	185,73
17	222,1	226,907	231	235	239	243	247	253	259	265	275	296	318,18	341,00	365,00	390,00
18	183,8	187,418	191	195	198	203	205	210	215	221	230	250	272,42	296,21	321,21	347,21
19	94,81	97,5958	100	102	104	105	108	110	111	115	121	125	132,74	140,93	149,93	159,93
20	192,6	194,439	196	197	199	201	203	205	207	210	213	222	230,29	239,36	249,36	259,36

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
21	208,4	216,26	224	233	242	252	263	275	289	305	325	376	267,45	296,53
22	229,1	239,532	247	252	261	266	275	284	294	305	325	376	279,50	299,23
23	245,3	250,485	255	258	262	267	271	277	282	289	298	319	272,97	285,95
24	206,8	211,158	215	218	222	226	230	234	239	245	254	274	231,22	242,17
25	199,1	201,202	203	204	206	208	210	212	214	217	220	229	210,19	215,35
26	232,1	240,089	248	257	266	276	287	299	312	328	349	400	291,25	320,33
27	242,1	250,089	258	267	276	286	297	309	322	338	359	410	301,25	330,33
28	205,7	207,956	210	211	213	215	217	219	221	224	227	236	217,09	222,33
29	181,9	186,65	190	193	196	200	203	206	211	215	223	235	203,48	212,88
30	216	220,779	225	228	232	236	240	244	249	255	264	284	241,01	252,14
31	254,7	260,056	264	268	272	277	281	286	292	299	308	329	282,77	295,88
32	276,7	286,149	293	300	305	312	318	327	335	343	358	396	320,87	338,84
33	247,1	254,996	260	265	269	273	279	282	286	293	304	321	277,92	289,61
34	220	227,547	233	237	241	245	249	253	258	264	272	286	248,67	261,12
35	216,6	220,842	224	226	228	231	233	236	239	244	247	256	233,45	241,15
36	282,1	292,57	302	311	320	330	341	353	366	383	404	453	344,62	374,46
37	345,8	359,303	368	377	385	392	402	411	426	441	451	501	405,07	433,73
38	345,8	359,303	368	377	385	392	402	411	426	441	451	501	405,07	433,73
39	354,4	367,776	377	387	393	402	413	426	435	446	456	506	413,58	440,49
40	379,4	392,776	402	412	418	427	438	451	460	471	481	531	438,58	465,49
41	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333,00	333,00
42	400,2	417,456	427	436	447	456	466	473	479	485	526	535	462,32	481,90

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
43	415	431,887	444	454	463	472	477	482	488	519	531	540	476,34	503,56
44	426,9	443,786	456	466	475	484	489	494	500	531	543	552	488,24	515,46
45	453,3	469,968	482	492	501	509	515	521	529	557	569	580	514,83	542,79
46	495,3	513,579	524	531	537	543	555	569	579	585	593	604	552,32	582,00
47	467,1	483,765	496	506	515	523	529	535	543	570	583	594	528,63	556,65
48	426,9	443,786	456	466	475	484	489	494	500	531	543	552	488,24	515,46
49	445,7	462,583	475	485	494	502	507	513	519	549	561	571	507,03	534,38
50	462,6	479,481	492	501	510	519	524	530	536	566	578	588	523,93	551,27
51	534,4	550,891	560	566	578	589	598	604	611	613	621	632	588,11	612,24
52	541,3	557,79	567	573	585	595	605	611	618	621	628	639	595,01	619,14
53	555,2	569,919	578	585	596	607	617	623	629	633	640	651	607,10	631,04
54	644,5	659,264	671	681	691	697	705	708	714	720	726	740	696,31	716,77
55	546,5	563,303	576	586	595	602	608	614	624	650	662	674	608,43	636,83
56	541,3	557,79	567	573	585	595	605	611	618	621	628	639	595,01	619,14
57	577,4	595,822	607	616	622	628	632	639	650	654	667	680	630,56	651,86
58	657,4	671,921	681	689	698	704	712	715	721	726	733	747	704,61	723,67
59	681,4	695,675	705	713	721	728	735	739	745	750	757	771	728,44	747,53
60	681,4	695,675	705	713	721	728	735	739	745	750	757	771	728,44	747,53
61	686,3	700,574	710	718	726	733	740	744	750	755	762	776	733,33	752,43
62	710,1	724,326	733	742	750	757	763	768	773	779	786	799	757,13	776,33
63	735,7	749,901	758	765	771	777	781	785	790	796	803	816	777,39	793,23
64	747,6	761,799	770	777	782	789	793	797	802	808	815	828	789,29	805,13
65	759,5	773,698	782	789	794	801	805	809	814	820	827	840	801,19	817,03

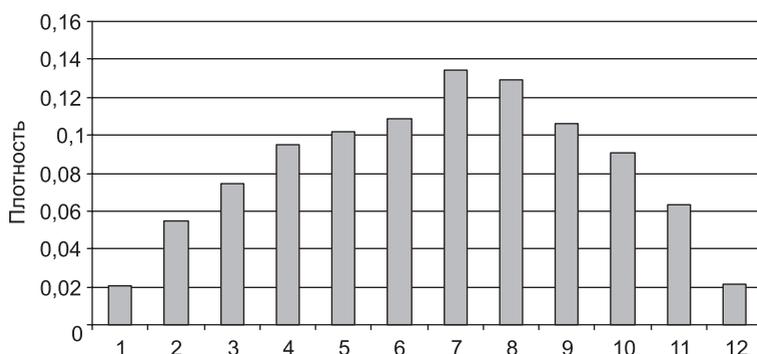


Рис. 2. Гистограмма плотности распределения сроков свершения события 65

работ), с помощью моделирования по методу «Монте-Карло» [4] и с использованием изложенного универсального метода.

Анализ полученных результатов показывает следующее. Длина критического пути по методу PERT составила 720 дн. Этот срок совершенно не

учитывает возможные смещения сроков свершения событий, вследствие параллельных работ. Среднее значение сроков реализации проекта, полученное методом «Монте-Карло» после 1000 «розыгрышей» модели, составило 795 дн.

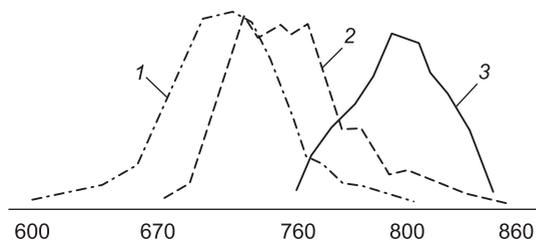


Рис. 3. Графики плотностей распределения времени выполнения проекта методами

1 — PERT; 2 — «Монте-Карло»; 3 — универсальным

Математическое ожидание сроков свершения события 65, рассчитанное в табл. 2, составило 801,2 дн. Несколько сжатая с боков кривая плотности

итогового распределения вызвана округлением крайних значений. Очевидно, что результаты, полученные с помощью универсального метода, в большей степени учитывают смещение сроков событий, вызванное структурой графика и значительным числом параллельных работ.

Выводы. 1. Исследование вероятностных параметров календарных планов показало, что на их итоговые показатели (достоверность, надежность) влияют как параметры отдельного технологического процесса, так и его структура. Универсальный метод расчета вероятностных параметров совместных событий календарных планов, основанный на последовательной парной композиции равновероятных сроков окончания одной работы с равновероятными сроками окончания другой работы при выборе максимального в каждой композиции, позволяет определять сроки свершения событий с требуемой вероятностью.

2. Метод базируется на делении кривой плотности распределения продолжительности работы на n равных площадей, центры тяжести которых и определяют равновероятные значения продолжительности. Расчеты по определению минимально необходимого числа значений n показали, что при использовании универсального метода деление площади под кривой плотности распределения на 12 равных частей обеспечит требуемую

точность (возможные отклонения расчетных параметров не превысят 4–5 % от истинных значений).

3. Сравнение изложенного метода с методами PERT и «Монте-Карло» показало его эффективность. Универсальный метод в большей степени учитывает смещение сроков совместных событий, вызванных структурой графика и параллельными работами, и позволяет определять сроки событий с требуемой вероятностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калугин, Ю.Б. Сущность календарного планирования работ с вероятностными временными параметрами [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 9. — С. 92–106.
2. Калугин, Ю.Б. Расчет календарных планов работ с вероятностными временными параметрами [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 10. — С. 51–59.
3. Калугин, Ю.Б. Календарное планирование работ с вероятностными временными параметрами в иерархических структурах [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 30–39.
4. Голенко, Д.И. Статистические методы сетевого планирования и управления [Текст] / Д.И. Голенко. — М. : Наука, 1968. — 400 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 16.12.14

Kalugin Yuriy Borisovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru, Military Institute of rail transport troops and military communications, St. Petersburg, Russia

UNIVERSAL METHOD OF COMPUTING FINISH TIME FOR NETWORKS WITH IMPRECISE DURATIONS

The method of computing finish time for networks with imprecise duration is stated. It is based on consecutive comparison of distributions of time of a fulfillment of events. Comparison of algorithm with the known PERT and «Monte-Carlo» methods showed its efficiency. Deviations from true value of a the mathematical expectations don't exceed 5 %.

Realization of the offered method will allow to determine the most probable terms of performance of complexes of works at a stage of planning, to increase reliability of planned schedules.

Key words: scheduling and management of the project, metod of critical way with uncertain durations of works, laws of distribution of duration, probable time of the termination of the project, computing algorithm, methods PERT and «Monte-Carlo».

REFERENCES

1. Kalugin, Yu.B. Essence of scheduling of works with probabilistic temporary parameters [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 9. — P. 92–106.
2. Kalugin, Yu.B. Calculations of the schedules of works with probabilistic temporary parameters [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 10. — P. 51–59.
3. Kalugin, Yu.B. Planning of works with probabilistic temporary parameters in hierarchical structures [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 10. — P. 30–39.
4. Golenko, D.I. Statistical methods of network planning and management [Text] / D.I. Golenko. — M. : Nauka, 1968. — 400 p.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.112.2

Е.Г. МАЛЯВИНА, А.В. ЦЫГАНКОВ

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕМП ОСТЫВАНИЯ ПОМЕЩЕНИЯ ПОСЛЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрены факторы, влияющие на тепловой режим помещения после отключения теплоснабжения здания. В качестве примера произведен расчет жилого помещения в Москве. Изучены лучистый теплообмен каждой обращенной в помещение поверхности с каждой другой, конвективный теплообмен поверхности с воздухом, а также лучистые и конвективные теплопоступления от внутренних источников теплоты (в том числе от остывающей системы отопления).

Показано, что на темп остывания самое большое влияние оказывает величина теплопотерь через ограждающие конструкции за счет теплопередачи и на нагревание инфильтрационного воздуха. Большие площади остекления помещения являются фактором повышения теплопотерь и, следовательно, быстрого остывания здания после отключения отопления.

Ключевые слова: теплопотери, темп остывания, температура помещения, совместное остывание системы отопления и здания, сквозная теплоустойчивость, внутренняя теплоустойчивость.

Введение. Вопрос о темпе остывания здания после отключения отопления важен, так как, во-первых, от него зависит комфортность нахождения в помещениях, а, во-вторых, время, которое имеется у ремонтных служб, влияет на необходимость слива из местной системы отопления дорогостоящей воды. Что касается степени комфорта пребывания в помещении, то в стандарте СТО НОСТРОЙ 2.15.70–2012. «Устройство систем теплоснабжения, отопления, вентиляции, кондиционирования и холодоснабжения», правда, относящемся к высотным зданиям, нормируется возможность снижения температуры помещения за 54 ч после отключения теплоснабжения здания не ниже 16 °С в жилых помещениях, не ниже 12 °С в общественных и не ниже 5 °С в технических помещениях.

На темп остывания здания влияют величина теплопотерь, зависящая от наружных тепловых условий и теплозащиты помещений, и теплоустойчивость здания. Теплопотери помещения связаны как с теплозащитными качествами наружных ограждающих конструкций, так и с их размерами.

Теплоустойчивость здания по [1] подразделяется на сквозную и внутреннюю. Сквозная теплоустойчивость относится к способности наружной ограждающей конструкции снижать амплитуду наружного температурного воздействия и обеспечивать запаздывание во времени температурной реакции внутренней поверхности. Внутренняя теплоустойчивость по [2] — это свойство помещения поддерживать относительное постоян-

ство температуры при изменении тепловых воздействий. Из приведенных понятий теплоустойчивости следует, что сквозная теплоустойчивость влияет на изменение температуры помещения опосредованно через изменение величины теплопотерь, а внутренняя — непосредственно.

Для того чтобы оценить влияние сквозной и внутренней теплоустойчивости на темп остывания помещения, необходимо иметь количественную оценку теплоустойчивости. Российская теория теплоустойчивости [1, 2] разработана для условий периодических тепловых воздействий. Характеристиками сквозной теплоустойчивости являются затухание и запаздывание температурной волны определенного временного периода при прохождении ее от наружной среды до внутренней поверхности ограждающей конструкции [1]. Внутренняя теплоустойчивость характеризуется показателем теплоусвоения помещения, равным сумме произведений коэффициентов теплоусвоения каждой поверхности, обращенной в помещение, и ее площади [2]. Для непериодических тепловых воздействий характеристикой внутренней теплоустойчивости обычно служит постоянная времени [3], которая обычно применяется в теории автоматического регулирования. Характеристика для оценки сквозной теплоустойчивости при непериодических процессах нам не известна, поэтому для сравнения теплоустойчивости ограждений и помещений будут применены характеристики теории теплоустойчивости.

Цель работы — выявить степень влияния теплопотерь помещения, наличия инфильтрации, а также сквозной и внутренней теплоустойчивости на темп охлаждения помещения при отключении в нем отопления. Работа выполнена расчетом изменения теплового режима помещения в Москве при расчетных для отопления наружных условиях, т.е. при температуре наружного воздуха $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$, в помещении перед отключением отопления поддерживалась результирующая температура $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчет выполнялся методом конечных разностей по неявной схеме. Учитывался лучистый теплообмен каждой поверхностью, обращенной в помещение, с каждой другой и конвективный теплообмен с воздухом помещения [4]. Так как в [5] показано, что в домах коттеджного типа вода в системе отопления остывает до температуры помещения за 2 ч, в расчетах предполагалось снижение теплоступлений от системы отопления до нуля за 2,5 ч.

Рассматривались рядовое и угловое помещения размерами $3,75 \times 6 \times 3(h)$ м. Общая площадь внутренней поверхности всех (наружных и внутренних) ограждений равна $103,5\text{ м}^2$.

Наружная стена принята со штукатурным фасадом, минераловатным утеплителем по конструктивному слою трех вариантов: железобетонному (вариант 1), кирпичному из полнотелого глиняного кирпича (вариант 2) и из ячеисто-бетонных блоков плотностью $\rho = 600\text{ м}^3/\text{ч}$ (вариант 3). Сопrotивление теплопередаче стены во всех случаях было с точностью до третьего знака одинаковым и равным $3,147\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ (при нормируемом по табл. 3 СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02–2003. Тепловая защита зданий» в московских условиях значении $3,13\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$). Затухание температурной волны снаружи внутрь соответственно вариантам равно 251,16; 234,3; 102,2.

В наружной стене $3,75 \times 3(h)$ м имеется окно с сопротивлением теплопередаче $0,54\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, площадь которого варьировалась и принимала

значения 18, 25, 50 и 80 % от суммарной площади стены с окном. Понятно, что с увеличением площади окна площадь стены уменьшается, а теплотери помещения возрастают. Расход инфильтрационного воздуха для помещений с инфильтрацией принят одинаковым и равным 10 м³/ч на помещение (это максимально разрешенный расход при окнах в деревянных переплетах с площадью остекления наружной стены 18 %).

Результаты расчета. В таблице приведены значения теплотерь помещений перед отключением отопления и показателя теплоусвоения помещения, а также некоторые результаты расчета теплового режима

Характеристики помещений и значения температуры помещения через каждые 12 ч после отключения отопления

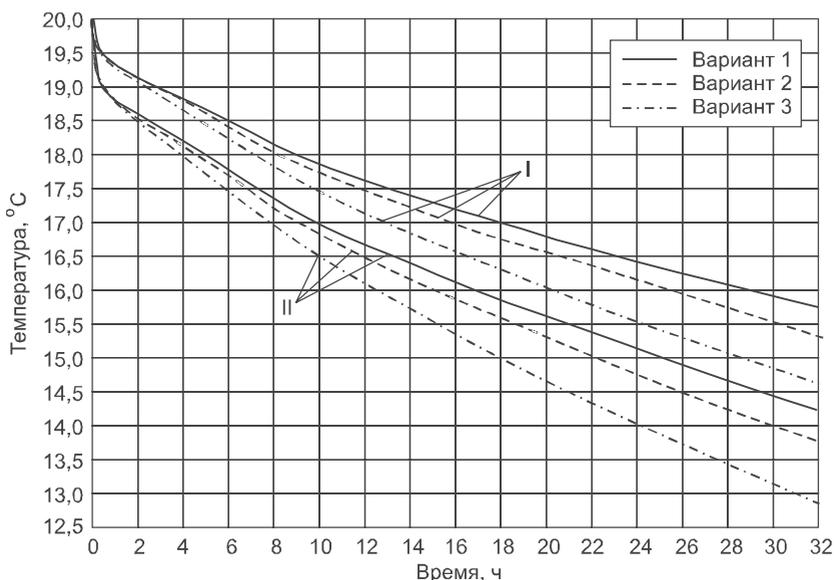
Вариант помещения	Вариант стены	Показатель теплоусвоения помещения, Вт/°С	Теплотери помещения, Вт	Время, через которое образуется лед на окне, ч	Результирующая температура помещения, °С, через число часов						
					12	24	36	48	54	60	72
Рядовое помещение											
1	1	1294,82	147,04	Более 125	18,7	18,0	17,4	16,8	16,5	16,2	15,6
2	1	1283,33	173,61	» »	18,4	17,6	16,9	16,1	15,8	15,4	14,8
3	1	1242,31	268,52	105,00	17,5	16,2	15,1	14,0	13,4	12,9	11,9
4	1	1196,72	373,97	64,75	16,4	14,6	13,0	11,5	10,8	10,1	8,8
5	2	1143,48	147,04	Более 125	18,6	17,8	17,1	16,4	16,1	15,8	15,1
6	2	1139,82	173,61	» »	18,3	17,5	16,6	15,9	15,5	15,1	14,4
7	2	1112,02	268,52	97,0	17,4	16,0	14,8	13,6	13,0	12,5	11,4
8	2	1085,89	373,97	60,25	16,3	14,4	12,7	11,1	10,4	9,7	8,3
9	3	1012,56	147,04	Более 125	18,5	17,5	16,7	16,0	15,6	15,3	14,6
10	3	1009,80	173,61	» »	18,1	17,1	16,1	15,2	14,8	14,4	13,6
11	3	999,95	268,52	82,0	17,1	15,4	14,0	12,7	12,1	11,4	10,3
12	3	988,99	373,97	50,75	15,9	13,7	11,7	10,0	9,2	8,4	6,9
Угловое помещение											
1	1	1316,00	272,96	Более 125	17,9	16,8	15,9	14,9	14,5	14,1	13,2
2	1	1304,51	299,54	114,75	18,4	16,4	15,4	14,4	13,9	13,4	12,5
3	1	1263,48	394,44	77,5	16,7	15,1	13,7	12,3	11,7	11,1	9,9
4	1	1217,90	499,90	52,0	15,6	13,5	11,8	10,1	9,4	8,6	7,2
5	2	1146,54	272,96	117,75	17,8	16,5	15,5	14,5	14,0	13,5	12,5
6	2	1139,95	299,54	102,0	17,5	16,1	15,0	13,9	13,3	12,8	11,8
7	2	1116,43	394,44	69,75	16,5	14,7	13,2	11,7	11,1	10,4	9,1
8	2	1051,74	499,90	46,5	15,4	13,1	11,2	9,4	8,6	7,8	6,2
9	3	1014,28	272,96	98,25	17,4	16,0	14,7	13,6	13,0	12,4	11,4
10	3	1011,52	299,54	84,5	17,1	15,6	14,2	12,9	12,3	11,7	10,5
11	3	1001,66	394,44	42,5	16,1	14,3	12,2	10,6	9,8	9,0	7,5
12	3	990,71	499,90	38,5	15,0	12,3	10,1	8,1	7,1	6,2	4,5
Угловое помещение с ячеисто-бетонными перегородками											
13	1	974,21	272,96	117,25	17,4	16,3	15,3	14,3	13,8	13,4	12,5
14	1	955,96	499,9	42,75	14,6	12,4	10,6	8,9	8,1	7,3	5,8
15	3	672,49	272,96	57,5	16,7	15,1	13,7	12,4	11,8	11,2	10,1
16	3	648,93	499,9	28,25	13,4	10,6	8,2	6,1	5,1	4,2	2,4

помещения без инфильтрации. Следует иметь в виду, что показатель теплоусвоения поверхностей помещения применен к непериодическому процессу охлаждения помещения условно.

Из таблицы видно, что по мере увеличения теплотерь темп снижения результирующей температуры возрастает. Из сравнения темпов снижения температуры в рядовых и угловых помещениях с одинаковыми номерами помещений и специально подобранными перегородками так, чтобы показатели теплоусвоения этих помещений были почти равными, следует, что теплозащита и величина теплотерь помещения оказывают значительное влияние на темп остывания помещения. О влиянии увеличения теплотерь помещения можно судить по снижению промежутка времени после отключения отопления до появления льда на окнах (снижение температуры на поверхности окна до 0 °С). Для каждого варианта стены при одинаковой сквозной и примерно одинаковой внутренней теплоустойчивости увеличение теплотерь в 1,85 раза (в угловом помещении) приводит к сокращению указанного интервала времени в 1,96 раза.

Влияние теплотерь на темп остывания помещений можно проследить, сравнивая темп падения температуры для вариантов помещения с одинаковыми начальными теплотерями (1, 5, 9), (2, 6, 10), (3, 7, 11), (4, 8, 12). Для тех же вариантов индикатором влияния сквозной теплоустойчивости является промежуток времени после отключения отопления до выпадения льда на поверхности окна. Видно, что с уменьшением сквозной теплоустойчивости (от помещения с номером, записанным в скобках на первом месте, к помещению, номер которого на третьем месте) возрастает темп остывания помещения и сокращается отрезок времени до появления льда на поверхности окна.

Влияние инфильтрации с оговоренным расходом можно оценить по рисунку.



Снижение результирующей температуры углового помещения с окнами площадью 25 % от фасада
 I — без инфильтрации, II — с инфильтрацией

Видно, что инфильтрация, увеличивающая теплопотери помещения, способствует большему остыванию помещения в начальный период, так как начальные теплопотери помещения с инфильтрацией выше. В дальнейшем темп остывания помещения с инфильтрацией незначительно интенсивнее. Объясняется это тем, что на сокращение теплопотерь при остывании помещения с инфильтрацией сквозная теплоустойчивость влияет лишь на часть, относящуюся к теплопередаче через наружные стены, а на теплопотери через окна и за счет инфильтрации этот фактор не влияет. В помещении без инфильтрации доля теплопотерь, сдерживаемых сквозной теплоустойчивостью наружных стен, меньше. Важно, что процесс сравнивается при практически одинаковой внутренней теплоустойчивости. Влияние сквозной теплоустойчивости наружных стен заключается в том, что она не позволяет скачкообразно понизиться температуре на внутренней поверхности стены, плавно понижая теплопотери. Чем меньше сквозная теплоустойчивость, тем быстрее теплопотери падают, и тем быстрее температура помещения снижается.

Для более наглядной иллюстрации проявления влияния внутренней теплоустойчивости на процесс остывания помещения были сделаны дополнительные расчеты нестационарного теплового режима четырех угловых помещений (варианты 13, 14, 15, 16). Помещения имеют ту же геометрическую конфигурацию и теплопотери, совпадающие с теплопотерями помещений вариантов 1, 4, 9, 12. Показатели теплоусвоения помещений вариантов 13, 14, 15, 16 снижены по сравнению с помещениями 1, 4, 9, 12 за счет применения более легкой отделки потолка, пола и двух перегородок. Результаты этого расчета, частично приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что при снижении внутренней теплоустойчивости темп остывания помещения возрастает. Сроки выпадения льда на окне сокращаются. Интересно, что более интенсивное уменьшение температуры в помещениях со сниженной внутренней теплоустойчивостью.

Из таблицы также следует, что ни в одном угловом помещении не выдерживается условие, выдвинутое в стандарте СТО НОСТРОЙ 2.15.70–2012. Условие снижения результирующей температуры жилого помещения через 54 ч после отключения отопления не ниже 16 °С соблюдается только в рядовом помещении при окнах площадью 18 % от фасада с наружными стенами на железобетонном и кирпичном основании (с двумя кирпичными перегородками и одной из материала основного слоя наружной стены). Что касается вариантов с инфильтрацией, то ни в одном из них условие не выполняется.

Вывод. Наибольшее влияние на темп остывания помещения оказывает величина теплопотерь, зависящая от сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций помещения, их площади и их сквозной теплоустойчивости, а также необходимость подогрева инфильтрационного наружного воздуха. Большое значение для темпа остывания помещения имеет внутренняя теплоустойчивость помещения.

Так как светопрозрачные ограждения (окна, витражи) имеют меньшее сопротивление теплопередаче и сквозную теплоустойчивость, чем

непрозрачные ограждающие конструкции, и являются источником инфильтрации, площадь окон и витражей играет первостепенную роль в темпе остывания помещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шкловер, А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях [Текст] / А.М. Шкловер. — М.; Л. : Госэнергоиздат, 1961. — 160 с.
2. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : учеб. для вузов [Текст] / В.Н. Богословский. — 3-е изд. — СПб. : АВОК Северо-Запад, 2006. — 400 с.
3. Самарин, О.Д. Построение идентификационной модели процессов управления микроклиматом помещения [Текст] / О.Д. Самарин, Ю.Д. Федорченко // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 12. — С. 80–83.
4. Малявина, Е.Г. Влияние теплового режима наружных ограждающих конструкций на нагрузку системы отопления при прерывистой подаче теплоты [Текст] / Е.Г. Малявина, Р.Р. Асатов // Academia (РААСН). — 2010. — № 3. — С. 324–327.
5. Малявина, Е.Г. Сопряженный расчет нестационарного теплового режима водяной системы отопления и здания [Текст] / Е.Г. Малявина, Д.Ю. Петров // Жилищ. стр-во. — 2012. — № 6. — С. 66–69.

*МАЛЯВИНА Елена Георгиевна, канд. техн. наук, проф.; E-mail: email@list.ru
Московский государственный строительный университет
ЦЫГАНКОВ Алексей Витальевич, студ.; E-mail: ilexts@gmail.com
Московский государственный строительный университет*

Получено 26.12.14

Malyavina Elena Georgievna, candidate of technical sciences, professor; E-mail: email@list.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia
Tsygankov Alexey Vitalievich, student; E-mail: ilexts@gmail.com, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS ON THE ROOM COOLING DOWN RATE AFTER HEATING IS SWITCHED OFF

Analysis of the room non-stationary heating mode after switching off of the building heating enabled calculation of the temperature drop in a residential premise in Moscow. The analysis was made in finite differences according to the non-explicit scheme. The analysis examined the radiant heat transfer of each surface turned into the room with each other, the surface-air convective heat transfer, as well as the radiant and convective heat input from the interior heat sources (including the getting cold heating system). It is shown, that the cooling down rate is the most of all influenced by the value of heat losses through the building enclosing structures, as well as infiltration of the outdoor air. The analysis showed, that big areas of the room glazing are a factor of the premise heat loss increase, and respectively, a quick cooling down of the building after heating is switched off.

Key words: heat losses, getting cold rate, room temperature, common getting cold of the heating system and the building, through thermal stability, interior thermal stability.

REFERENCES

1. Shklover, A.M. Heat transfer under periodical heat effects [Text] / A.M. Shklover. — M.; L. : Gosenergoizdat, 1961. — 160 p.

2. Bogoslovskiy, V.N. Construction thermal physics (the thermal physical principles of heating, ventilation and air conditioning) : Manual for Higher Schools [Text] / V.N. Bogoslovskiy. — 3rd ed. — SPb. : AVOK Severo-Zapad, 2006. — 400 p.
 3. Samarin, O.D. On design of identification model of control processes of room microclimate [Text] / O.D. Samarin, Yu.D. Fedorchenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 12. — P. 80–83.
 4. Malyavina, E.G. Influence of the exterior enclosing structure heat mode to the heating system loads in case of interrupted heat supply [Text] / E.G. Malyavina, R.R. Asatov // Academia (RAASN). — 2010. — N 3. — P. 324–327.
 5. Malyavina, E.G. The analysis of non-stationary heat mode of the water heating system conjugate to the building [Text] / E.G. Malyavina, D.Yu. Petrov // Zhilishchnoe stroitelstvo. — 2012. — N 6. — P. 66–69.
-

УДК 628.16:621.311.22

Г.В. САКАШ

ОСОБЕННОСТИ ОЧИСТКИ ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩ-ОХЛАДИТЕЛЕЙ ТЭС ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Рассмотрены вопросы, связанные с технологией очистки воды водохранилищ-охладителей с высоким содержанием природных органических веществ. Предложена двухступенчатая технологическая схема очистки воды водохранилищ от органических веществ. На первой стадии очистки рекомендовано осветление воды отстаиванием и фильтрованием с предварительным коагулированием органических веществ минеральным коагулянтом $FeSO_4$. На второй стадии для очистки воды используется сорбционная технология с фильтрованием через слой анионита. В качестве сорбента рекомендован отечественный макропористый анионит АВ-29П, который эффективен при очистке воды от органических соединений, легко регенерируется и значительно дешевле импортных аналогов.

Ключевые слова: очистка воды, водохранилище-охладитель, тепловая электростанция, торф, органические вещества, коагулянт, отстаивание, осадок, фильтрование, сорбция, анионит, сорбционная емкость.

Серьезной проблемой при создании в будущем ряда ТЭС Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК) является необходимость очистки воды водохранилищ-охладителей с высоким содержанием в воде природных органических веществ. Прогнозный уровень концентрации органических веществ в этих водах настолько высок, что в мировой практике энергостроительства отсутствует опыт их очистки и применения для питания котлов. Данное обстоятельство ставит под вопрос возможность использования традиционных схем водоподготовки.

Ряд водохранилищ-охладителей ТЭС КАТЭК расположен и будет располагаться на торфяниках, что, как показывает практика, ухудшает качество воды. Эксплуатация водохранилищ с заторфованным дном приводит к образованию плавающих островов из торфа («сплавин»), резкому ухудшению санитарных показателей водоема. После затопления торфяников в воду поступает большое количество органических веществ, представленных гумусовыми соединениями в основном в виде гуминовых и фульвокислот. Вследствие всплывания торфа обнажаются поверхности гидрохимического и биологического обмена, увеличивается проницаемость торфяной массы — обменная способность торфа возрастет в 3–4 раза. При этом качество воды в водохранилище будет подвержено значительным изменениям, особенно в первые пять лет его эксплуатации. Меняться со временем будет и концентрация органических веществ в воде и их качественные характеристики, в частности, физико-химические. Эти изменения напрямую связаны с одновременным контактом воды водохранилища с затопленными торфяниками. При заполнении водохранилища в течение первых 1–2 лет вода будет контактировать в основном с верховыми торфяниками. При этом будут образовываться сплавины.

К 5–6 году эксплуатации вода водохранилища будет соприкасаться в основном с переходными и низовыми торфяниками. Качественные характеристики верховых, переходных и низовых торфяников отличаются между собой значительно.

Результаты исследований свидетельствуют, что к 5–6 году формирования водохранилища перманганатная окисляемость воды может составить 60–100 мг O_2 /л (бихроматная окисляемость 96–160 мг O_2 /л). Этот прогноз был экспериментально подтвержден искусственно созданными крупномасштабными моделями воды водохранилища-охладителя Березовской ГРЭС-1 с использованием реальных образцов торфа из ложа будущего водохранилища и моделированием режимов его эксплуатации. Соотношение объемов торф : вода — 1 : 6 ставит под угрозу нормальную эксплуатацию схемы химводоочистки для питания котлов и, как следствие, возможно отложение загрязнений на проточной части генераторов.

Рекомендуемые проектными организациями инженерные решения рассчитаны на надежную эксплуатацию оборудования при перманганатной окисляемости исходной воды не более 20 мг O_2 /л. Более высокая окисляемость воды может повлечь за собой резкое увеличение эксплуатационных издержек на ступени обессоливания воды за счет частой замены дорогостоящих ионообменных материалов, обусловленной внедрением органических веществ в матрицу ионитов, блокированием их обменных групп и последующим снижением обменной емкости. Для решения вопроса о возможности очистки воды от органических веществ до необходимых кондиций и определения требуемых режимов очистки были проведены исследования процесса очистки с использованием коагуляции, осветления (отстаивание и фильтрация) и сорбции на ионитах.

Эксперименты были поставлены на трех крупномасштабных моделях воды. Модели воды водохранилища Березовской ГРЭС-1 были приготовлены с использованием верховых (модели № 1 и 2) и переходных торфяников (модель № 3). Вода моделей № 1 и 2 характеризовалась высоким содержанием взвешенных веществ (до 300 мг/л). Перманганатная и бихроматная окисляемости составляли соответственно 29,3 и 63,1 мг O_2 /л, рН 7,7. Концентрация железа и сульфатов равнялась соответственно 0,15 и 8,9 мг/л. Вода модели № 3 содержала взвешенных веществ до 6 мг/л. Перманганатная и бихроматная окисляемости соответственно 21,4 и 71,4 мг O_2 /л, рН 7,5. Концентрация железа и сульфатов соответственно 0,14 и 9,0 мг/л.

В ходе опытов было изучено влияние природы и дозы коагулянтов, рН и температуры воды на процесс очистки от природных органических веществ. Содержание органических веществ в воде оценивалось величиной бихроматной окисляемости.

С целью выбора наиболее эффективного коагулянта были проведены сравнительные исследования по коагуляции воды модели № 1 различными реагентами — растворами $Al_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$, $FeCl_3$, дозой от 25 до 200 мг/л сточной воды в пересчете на ионы Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} соответственно, с подщелачиванием раствором NaOH до требуемой величины рН и добавлением полиакриламида (ПАА) дозой 1 мг/л сточной воды.

Таблица 1. Окисляемость воды при обработке ее коагулянтами, мг O_2 /л

Коагулянт	Доза коагулянта, мг/л					
	25	50	75	100	150	200
$Al_2(SO_4)_3$	12,71	6,32	4,11	3,04	3,23	5,42
$FeSO_4$	5,96	3,99	2,93	3,87	5,09	7,50
$FeCl_3$	13,33	6,84	4,42	3,00	4,08	7,12

Результаты реагентной обработки модели воды № 1 минеральными коагулянтами с последующим отстаиванием и фильтрованием приведены в табл. 1.

Результаты исследований свидетельствуют, что наибольшей глубины очистки (остаточная окисляемость до 3 мг O_2 /л) можно добиться при обработке воды сульфатом железа (доза 75 мг/л). Аналогичная эффективность достигается при коагуляции сульфатом алюминия и хлоридом железа дозой до 100 мг/л. Дальнейшее увеличение доз коагулянтов эффективность очистки не повышает. Удельный расход $Al_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$ и $FeCl_3$ для снижения бихроматной окисляемости воды на 1 мг O_2 /л составляет соответственно 5,00; 3,75 и 5,00 мг/мг O_2 .

Модель воды № 3 была обработана $FeSO_4$. Результаты опытов показали, что максимальный эффект очистки достигается при более высокой дозе коагулянта (125 мг/л) по сравнению с очисткой моделей воды № 1 и 2.

Анализ результатов опытов показал, что на процесс оказывает влияние физико-химическое состояние органических загрязнений. Если органические вещества представлены в основном в виде взвесей (модель № 1), что будет наблюдаться в первые два года с начала заполнения и эксплуатации водохранилища, то реагентный метод позволяет снизить бихроматную окисляемость на 85 %. Если органические вещества присутствуют в основном в коллоидном и растворенном виде (модель № 3), что ожидается к 5–6 году формирования водохранилища, то бихроматная окисляемость снижается на 60 %. Так, при обработке воды модели № 1 $FeSO_4$ (доза 75 мг/л) бихроматная окисляемость после отстаивания обработанной воды составила 3 мг O_2 /л, а для модели воды № 3 этот показатель был равен 30 мг O_2 /л.

Результаты исследований дают основание рекомендовать для очистки воды от органических веществ в качестве коагулянта $FeSO_4$ дозой в диапазоне 75–125 мг/л (в зависимости от срока эксплуатации водохранилища) [1].

Для оптимизации процесса очистки был поставлен полный трехфакторный эксперимент по ротatable-плану Бокса–Хантера. Оптимизируемыми параметрами являлись доза коагулянта, pH среды и температура воды.

На основе опытных данных были получены уравнения регрессии, являющиеся математической моделью процесса. С помощью этой модели были определены графические зависимости окисляемости очищенной воды, остаточного содержания Fe(II) от дозы коагулянта и для различных температур построены регулировочные диаграммы в координатах «доза коагулянта — pH». Было выявлено, что с повышением температуры

степень очистки возрастает, что связано с увеличением скорости гидролиза FeSO_4 . При повышении концентрации коагулянта сверх определенной величины процесс коагуляции замедляется. Эта зависимость, как и зависимость эффективности очистки воды от дозы коагулянта при различных рН, имеет параболический характер.

Ухудшение качества очищенной воды по ХПК при увеличении дозы коагулянта вызвано уменьшением скорости отстаивания гидроксида железа, вследствие чего показатель ХПК возрастает. Для достижения одинаковой степени очистки доза коагулянта минимальна при рН 9. С увеличением дозы FeSO_4 содержание остаточного Fe(II) уменьшается до определенного предела, а затем растет за счет гидроксида, находящегося в растворе в коллоидном состоянии.

Исследования по влиянию температуры воды на процесс очистки показали, что минимальное содержание Fe(II) наблюдается в интервале температур от 25 до 30 °С. Повышение температуры приводит к увеличению энергии теплового движения молекул воды, замедляющему процесс осаждения хлопьев. При одинаковой дозе коагулянта остаточное содержание Fe(II) при рН 9 минимально. Характер изменения ХПК и остаточного содержания Fe(II) от дозы коагулянта, рН и температуры воды приведен на рис. 1.

Оптимальные параметры реагентной обработки воды зависят от температуры. При нагреве воды до 30 °С для снижения окисляемости воды до 8–9 мг O_2 /л требуется доза реагентов от 50 до 75 мг/л и рН 8–9.

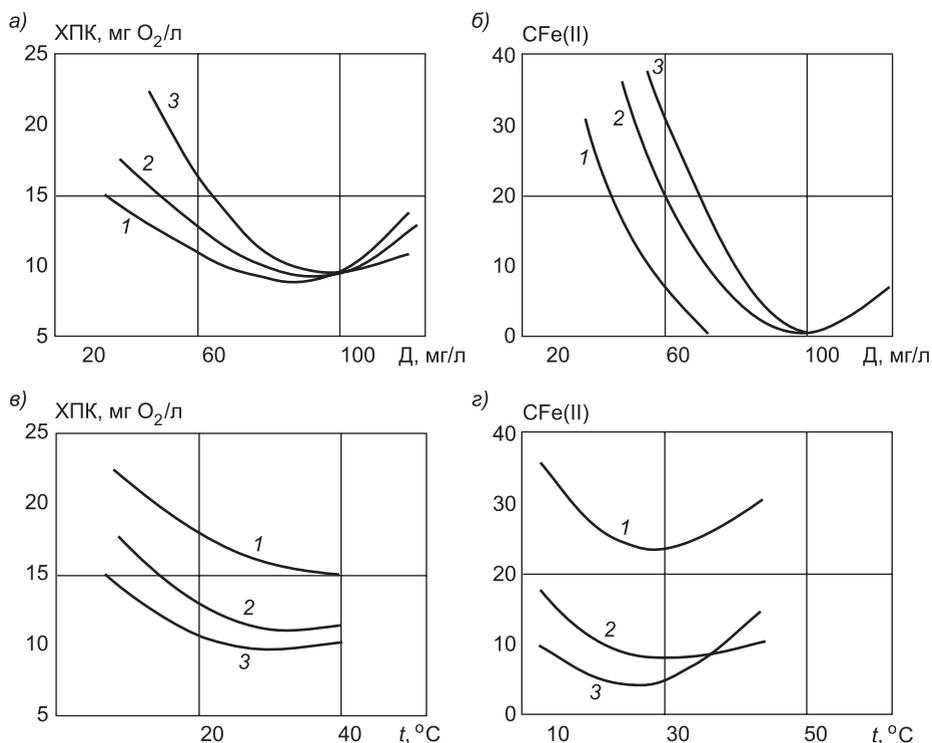


Рис. 1. Изменение ХПК (а, в) и остаточного содержания Fe(II) (б, г) от дозы коагулянта (а, б) при рН 9 (1), 10 (2), 11 (3) и от температуры обработки (в, г) при дозе коагулянта 50 (1), 75 (2) и 100 мг/л (3)

Остаточное содержание Fe(II) не превышает 0,1 мг/л. При 20 °С для очистки воды до ХПК 8 мг O₂/л нужно увеличить дозу реагента до 120 мг/л. Однако воду с окисляемостью 9–9,5 мг O₂/дм³ можно получить при дозах от 50 до 75 мг/л и рН 8–9. Остаточное содержание Fe(II) составляет 2–4 мг/л. При обработке воды с температурой 10 °С высокой эффективности очистки получить не удастся. Снижение ХПК до 9 мг O₂/л требует дозы коагулянта 100–120 мг/л и рН 10–11, что, видимо, связано с уменьшением скорости гидролиза FeSO₄. Регулировочные диаграммы процесса реагентной обработки воды с выделением области оптимальных параметров процесса приведены на рис. 2.

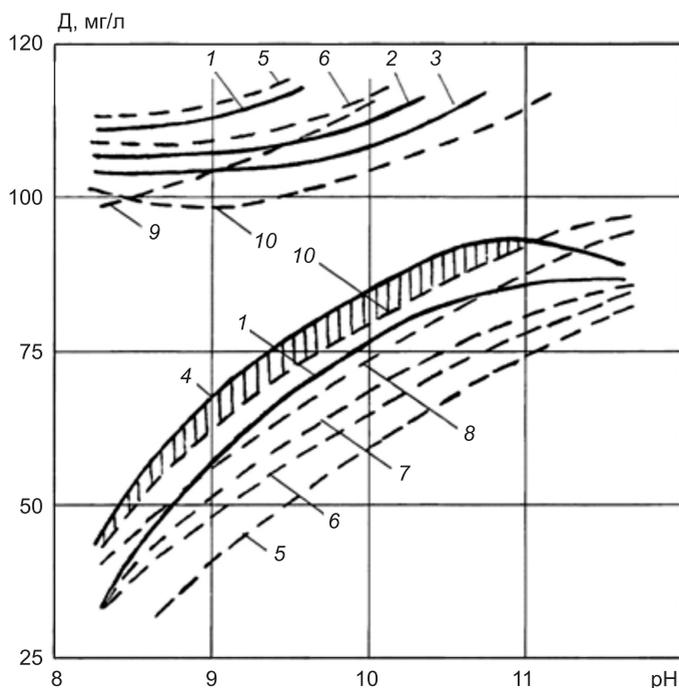


Рис. 2. Регулировочные диаграммы процесса реагентной обработки при бихроматной окисляемости 10 (1), 4 (2), 2 (3), 9 (4) мг O₂/л и остаточном содержании Fe(II) 10 (5), 6 (6), 4 (7), 2 (8), 0,4 (9) и 0,1 мг/л (10)

Заштрихованная область — оптимальные параметры обработки воды

На основании полученных данных реагентную обработку воды водохранилища рекомендуется проводить при рН 9–9,5; температуре воды 30 °С, дозах Fe(II) 75 мг/л и ПАА 1 мг/л.

Параллельно с обработкой раствором FeSO₄ эту же воду обработали раствором Al₂(SO₄)₃ дозой 100 мг/л. Окисляемость очищенной воды в этом случае составила 5,9 мг O₂/л, что несколько ниже, чем при использовании FeSO₄ при той же дозе.

Применение только коагулянтов не позволяет осуществить глубокую очистку воды от коллоидных и растворенных органических веществ. Очищенная реагентным методом вода имела довольно высокое содержание Fe(II) и органических веществ, поэтому проверена возможность ее дальнейшей очистки фильтрованием через антрацитовую загрузку тол-

щиной 1,2 м и размером зерен 0,9–1,2 мм по традиционной для химводоочистки схеме.

Фильтрация проводилась со скоростью 8 м/ч. После фильтрования содержание Fe(II) уменьшилось в 6 раз, а содержание органических веществ практически не изменилось. Это свидетельствует о том, что вместе с мелкими хлопьями, не осевшими в процессе отстаивания, на фильтре задерживается и Fe(II). Практически не изменившееся количество органических веществ в воде после керамического фильтра говорит о том, что в составе мелких хлопьев органических соединений содержится мало и для более глубокой очистки необходимы другие методы.

На втором этапе для глубокой очистки воды от органических веществ, не задержанных на стадии коагулирования, отстаивания и фильтрования, исследовалась эффективность сорбции на ионообменных материалах.

В качестве исходной воды использовалась модель воды водохранилища-охладителя Березовской ГРЭС-1, настоянная на переходных торфяниках (модель № 3) и прошедшая коагулирование, отстаивание и фильтрование в режиме, отработанном на первом этапе экспериментов. Исходная вода отличалась низким содержанием взвешенных веществ (5–7 мг/л), высокой цветностью и концентрацией природных органических веществ, находящихся в коллоидном и растворенном виде. Очистку воды проводили по следующей схеме: добавление реагента (коагулирование) → отстаивание → фильтрование → сорбция на ионитах (табл. 2).

Таблица 2. Сорбционные емкости анионитов и условия проведения опытов

Марка анионита	Сорбционная емкость, мг/г	Условия проведения опытов
АВ-29П	8,1	Фильтрация через слой анионита высотой 0,8 м с постоянной скоростью, равной 5 м/ч. Вода перед подачей на аниониты прошла коагулирование раствором FeSO ₄ при дозе 125 мг/л, отстаивание, фильтрование через антрацитовый фильтр с высотой загрузки 1,2 м и скоростью 8 м/ч. Бихроматная окисляемость воды перед анионитами составляла 7,0–9,1 мг O ₂ /л
ИА-1	7,2	
АВ-22	0,26	
АВ-216 ГС	0,17	

В качестве коагулянта применялся раствор FeSO₄ при дозе 125 мг/л. Температура воды в опытах +30 °С, рН 9,5 и доза ПАА, добавляемого в очищаемую воду в качестве флокулянта после введения раствора FeSO₄, составляла 1 мг/л. Фильтрация осуществлялась через антрацитовую загрузку с размерами зерен, толщиной и в режиме, рекомендованными при приготовлении воды для питания котлов на ТЭС.

Объектом исследований являлись как традиционные (АВ-22, АВ-216 ГС), так и макропористые аниониты: АВ-29П, ИА-1. Предельно допустимая окисляемость воды после анионитов ограничивалась величиной 1,0–1,5 мг O₂/л. Была исследована эффективность сорбции органических веществ в зависимости от исходной концентрации загрязнений. По полученным изотермам сорбции были подсчитаны сорбционные емкости анионитов.

Как свидетельствуют данные табл. 2, сорбционная емкость снижается в ряду АВ-29П, ИА-1, АВ-22, АВ-216 ГС. Наибольшей сорбционной

емкостью по органическим загрязнениям обладает макропористый анионит марки АВ-29П.

Для регенерации анионитов использовался раствор, содержащий 5 % NaOH и 10 % NaCl. Окисляемость воды после прохождения анионитов была в пределах 1,0–1,5 мг O₂/л. Сорбционная емкость анионита АВ-29П после пяти циклов сорбция-регенерация снизилась по сравнению с другими сорбентами в наименьшей степени и составляла 55 % от первоначальной. Этот макропористый анионит выпускается отечественной промышленностью, дешевле зарубежных аналогов и может быть рекомендован для эффективной глубокой очистки воды от органических веществ.

Таким образом, применение воды водохранилищ-охладителей для питания котлов ТЭС КАТЭК возможно осуществить с использованием предложенных технологий очистки. При этом удаление основной части органических примесей целесообразно на стадии коагулирования исходной воды. Доочистку воды от оставшихся после коагулирования органических веществ следует проводить последовательно на механических и сорбционных фильтрах с макропористым анионитом АВ-29П.

Анализ результатов исследований позволил отметить решающее влияние пористой структуры сорбентов на эффективность сорбции гумусовых соединений. Можно предположить, что одновременно реализуется несколько процессов: физическая адсорбция ядер гуминовых и фульвокислот на полимерной матрице ионита за счет вандер-ваальсовых сил; физическая адсорбция в пустотах, образующихся при набухании полимерной матрицы (набухание обусловлено проникновением органических молекул больших размеров). Кроме того, учитывая, что гуминовые и фульвокислоты — слабые электролиты, а функциональные группы анионитов имеют заряд, возможно химическое взаимодействие между карбоксильными группами органических кислот и ионогенными группами анионитов. В связи с тем, что гуминовые и фульвокислоты являются полифункциональными электролитами и имеют большие размеры, они блокируют функциональные группы анионитов, что приводит к «отравлению» сорбентов. Это подтверждается резким снижением сорбционной емкости низкопористых анионитов после первых циклов «сорбция-регенерация».

Исследования позволили разработать технологическую схему очистки воды водохранилищ-охладителей ТЭС КАТЭК от органических веществ [2], приведенную на рис. 3.

В результате опытов по очистке воды было подтверждено, что принципиальная возможность использования традиционной схемы очистки воды имеется, но при этом появляются повышенные издержки по эксплуатации водоочистного оборудования. Режимы очистки воды (дозы реагентов, рН, температуры воды, щелочности и т.п.) и эксплуатации водоочистного оборудования позволили в дальнейшем выполнить технико-экономическое сравнение вариантов по замене источника водоснабжения станции (для питания котлов) с воды водохранилища на поверхностные воды р. Береш.

Для устройства водозабора были проведены дноуглубительные работы в районе водоприемника и построен водовод (две нитки длиной несколько километров от водозабора до Березовской ГРЭС). Практическая

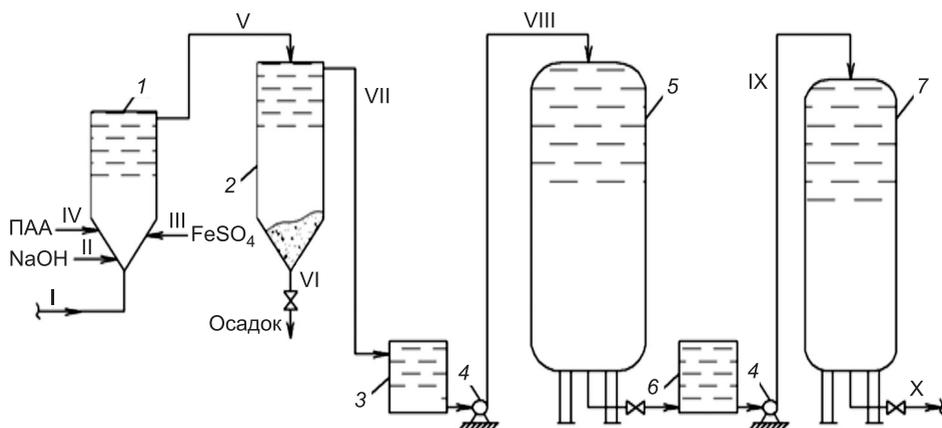


Рис. 3. Схема очистки воды водохранилищ-охладителей ТЭС КАТЭК от органических веществ (расход воды 270 м³/ч)

1 — смеситель; 2 — отстойник или осветлитель со взвешенным осадком; 3 — емкость частично осветленной воды; 4 — насосы; 5 — осветлительный фильтр; 6 — емкость осветленной воды; 7 — сорбционный фильтр

подача: I — исходной воды из водохранилища; II — щелочи для коррекции pH; III — коагулянта; IV — флокулянта ПАА; V — воды на отстаивание или на осветлитель со взвешенным осадком; VII — воды в аккумулирующую емкость; VIII — воды на осветлительный фильтр; IX — воды на сорбционный ионитовый фильтр; X — воды на ступень обессоливания; VI — выпуск осадка

эксплуатация схемы с использованием водозабора из поверхностных вод р. Береш в течение ряда последних лет показала свою эффективность. В настоящее время водоснабжение станции для питания котлов осуществляется по этой схеме в надежном режиме, а издержки на перепроектирование и замену источника воды для питания котлов станции многократно окупилась.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сакаш, Г.В. Экологические и технологические проблемы водного хозяйства предприятий теплоэнергетики и пути их решения (на примере Красноярского края): автореф. дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / Г.В. Сакаш. — Барнаул, 2009. — 37 с.
2. Сакаш, Г.В. Водное хозяйство угольных тепловых электрических станций [Текст] / Г.В. Сакаш. — Saarbrucken, Germany: LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 302 с.

САКАШ Геннадий Викторович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sakash51@mail.ru
Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета,
г. Красноярск

Получено после доработки 25.12.14

Sakash Gennadiy Victorovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sakash51@mail.ru, Engineering Building Institute of the Siberian Federation University, Krasnoyarsk, Russia

PARTICULAR QUALITIES OF CLEANING CHP WATERS RESERVOIR-REFRIGERANT FROM ORGANIC SUBSTANCES

Address issuers related to the technology of cleaning waters reservoir- refrigerant thermal power plant with high organic substances. Suggestion two-stage technological scheme cleaning waters reservoir from organic substances. On first stage for cleaning waters address

sediment and filtering with preliminary coagulate organic substances with utilization FeSO_4 . On second stage for cleaning water address absorption technology from filtering through layer fatherland macropore anionite AV-29P. This anionite is effectiveness in the time of cleaning waters from organic substances, lightly regeneratied and greatly more cheapness imported analogue.

Key words: cleaning water, reservoir-refrigerant, thermal power station, peat, organic substance, coagulante, sedimental, sediment, filtering, sorption, anionite, sorpent capacity.

REFERENCES

1. S a k a s h, G.V. Ecological and technological problems water economy of thermal power stations and ways theirs decisions (on example of Krasnoyarsk region): Author Abstract of dis. ... doctor of technical sciences, professor [Text] / G.V. Sakash. — Barnaul, 2009. — 37 p.
2. S a k a s h, G.V. Water economy of coal thermal power stations [Text] / G.V. Sakash. — Saarbrucken, Germany: LAMBERT Academic Pablising, 2011. — 302 p.

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 728.011.27:620.92

П.П. СЕМИКИН, Т.П. БАЦУНОВА

ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕМНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Рассматриваются основные архитектурные приемы интенсификации выработки энергии из возобновляемых источников в высотных зданиях. Классифицировано инженерное оборудование, работающее на энергии ветра и солнца. Приведены примеры проектов, иллюстрирующих применение ветро- и гелиоустановок.

Ключевые слова: высотные здания, архитектура, объемно-пространственные решения, возобновляемые источники энергии.

1. Актуальность применения возобновляемой энергетики. По данным многих ученых и исследователей (Б.С. Истомина, Н.А. Гаряева и др.): «В конце XX века стали заметны признаки глобального экологического кризиса и техногенной эволюции городов... для восстановления экологического равновесия предлагается только один способ: сократить площадь антропогенно измененных и застроенных земель, вернуть значительную часть (около трети) “освоенных” и загрязненных территорий в естественное состояние. Такой “возврат” невозможен при наблюдающемся росте урбанизированных территорий и возрастании численности человечества» [1].

Одним из решений данной проблемы является развивающееся направление проектирования и строительства высотных зданий с применением возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Подобные объекты служат одной из перспективных форм застройки городских территорий, что обусловлено их энергетической самостоятельностью и экологически чистыми источниками энергии, которые в них используются.

Существуют понятия альтернативная и возобновляемая энергетика. Первая объединяет источники энергии, которые составляют альтернативу традиционным (газ, уголь, нефть). Их спектр весьма широк, от «классических» солнца и ветра, до «необычных»: энергии молнии, торнадо и гигантских воздушных змеев [2]. Вторая имеет более четкие рамки и состав. Под возобновляемыми источниками понимают: энергию солнца, ветра, биомассы, приливную, гео- и гидротермальную, которые официально определены в федеральном законе от 26.03.2003 N 35-ФЗ (с изменениями на 21 июля 2014 г.) «Об электроэнергетике» [3]. В данной

статье мы будем рассматривать энергию ветра и солнца. Применение данных источников оказывает влияние на объемно-планировочное и архитектурно-художественное решения высотных зданий.

2. Применение ветроэнергогенераторов в высотных зданиях. До конца XX в. возобновляемая энергия вырабатывалась в основном с помощью электростанций: Балаклавская ветроэнергостанция, Саяно-Шушенская гидроэлектростанция, Паужетская геотермальная энергостанция и др. Активное внедрение ВИЭ в структуру высотных зданий в качестве части объемно-пространственного решения началось с возведения Всемирного торгового центра в Бахрейне («Bahrain World Trade Center») в 2008 г. Это были крупные ветроэнергетические установки. Важный параметр — расположение оси вращения относительно поверхности земли. Большое число ветровых потоков — горизонтально направленные, поэтому вертикальная развитость здания подходит для применения ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения. В большинстве случаев — это несколько устройств, установленных в верхней части объекта, где скорость ветра максимальна. Существуют здания с точечным размещением установок, со сквозными отверстиями, с консольным размещением инженерного оборудования, работающего на энергии ветра (рис. 1).

Ограниченная вариативность решений наблюдается при использовании ветрогенераторов с вертикальной осью вращения. Они монтируются на завершении (на крыше) высотного здания либо на кровле сти-

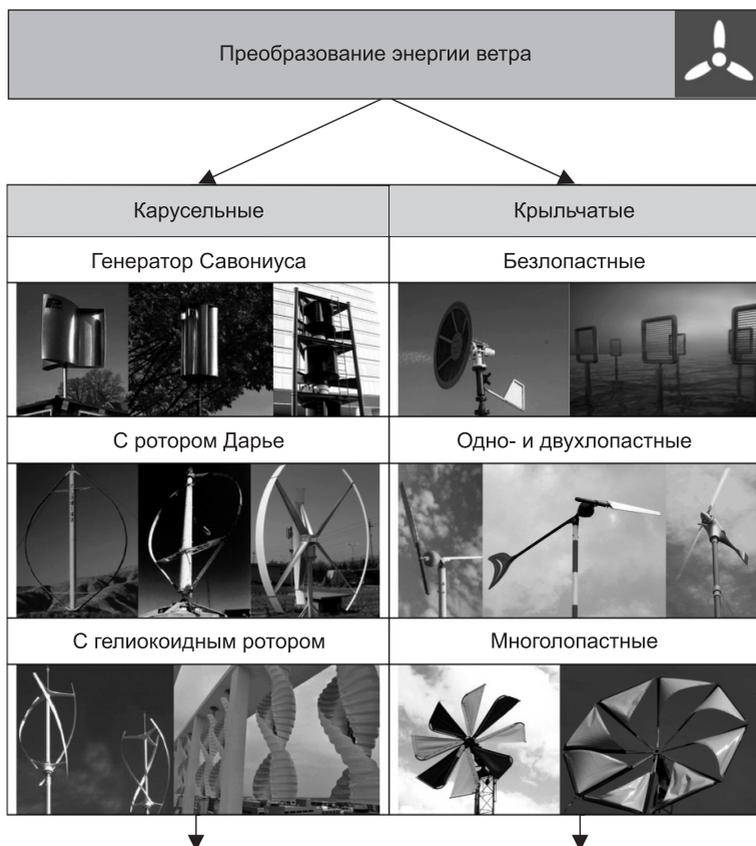




Рис. 1. Типы ветрогенераторов и примеры проектов высотных зданий, в которых они применены

лобатной части, либо внутри основного объема сооружения. В последнем случае это энергогенератор, который находится в сквозном отверстии в объекте или же установлен между двумя его корпусами. «Современные ветроустановки с горизонтальной осью и высоким коэффициентом скорости имеют КПД 46–48 %, приближаясь по этому показателю к традиционным тепловым станциям» [4]. «Лопастей английской турбины имеют размах 60 метров и она производит примерно 3 МВт энергии (72 МВт · ч)» [5]. При среднем энергопотреблении высотного здания в 50 000 МВт · ч аналоги из нескольких подобных турбин смогут обеспечить около 10 % от общего энергопотребления объекта. Стоимость подобной системы примерно 120–150 млн руб. Срок окупаемости 10–15 лет.

3. Применение гелиоэнергогенераторов в высотных зданиях.

Следующий рассматриваемый ВИЭ — солнце. Основной классификационный критерий — тип получаемой энергии и, как следствие, типы гелиоустройств.

Первый вариант — перевод солнечной энергии в электрическую с помощью нагрева кремниевого состава, напыленного на пластину (самый распространенный).

Второй вариант — перевод солнечной энергии в тепловую посредством нагрева теплоносителя в трубках (рис. 2).

Недавно появилось новое поколение гелиопанелей — «Интегрируемые строительные фотоэлектрические модули». Их основная особенность — возможность монтажа на любую поверхность здания: кровля, наклонная плоскость, вертикальная стена или остекление. Особый интерес представляют прозрачные панели, которые способны пропускать дневной свет и при этом преобразовывать солнечную энергию (рис. 3).

Современные гелиоустановки обладают КПД равным 20–25 %, существуют опытные образцы с показателем в 35–40 %. Если брать стандартную панель, вырабатывающую 80 кВт · ч/день, то потребуется площадь порядка 7000–8000 шт. или около 10000 м² для обеспече-

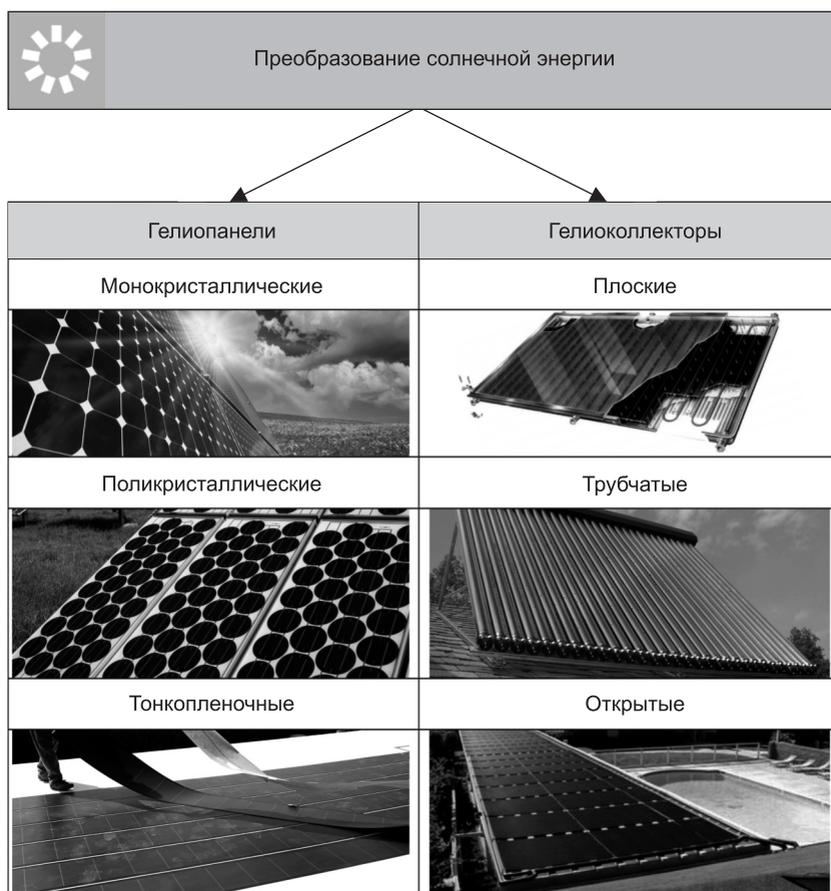


Рис. 2. Типы гелиоустройств

Начало рис. 3

Плоская пластина



ния 56 МВт · ч энергии. С помощью энергии солнца можно обеспечить «среднее» высотное здание чистой энергией на 8–10 % от общего необходимого количества. Стоимость массива панелей около 50–70 млн руб. Примерный срок окупаемости 10–15 лет. Существуют данные, согласно которым при увеличении КПД устройства сократится срок его окупаемости.

Применение ВИЭ для модернизации существующих высотных зданий возможно в ограниченных масштабах. Как правило, это внедрение фотоэлектрических панелей для облицовки части фасада объекта («The CIS Tower», Великобритания), возможно создание гелиополя на прилегающей территории (Masdar City, ОАЭ). Ветрогенераторы могут быть установлены на крыше объекта («Azougi Brothers», Израиль), если там нет инженерного оборудования, обеспечивающего кондиционирование и вентиляцию помещений, или же на кровле стилобатной части. Подобные ре-

Солнечная черепица



шения менее эффективны в сравнении с учетом ВИЭ во всех проектных решениях с самого начала.

Таким образом, применяемые технологии и инженерное оборудование оказывают влияние на планировочно-пространственные структуры высотных зданий. Определенные формы, особенности компоновки пространств и объемов объекта способны увеличить энергетический эффект от применения ВИЭ.

Основными приемами формирования архитектуры при использовании ВИЭ является варьирование местоположения энергоустановок в структуре высотного здания, применение различных типов и размеров устройств — форм и видов ветрогенераторов, возможности имитации рисунков и текстур с помощью гелиопанелей.

Около 20 лет назад Паоло Солери сформулировал концепцию арколгии, которая стала совмещением архитектуры и экологии, при доминирующей роли первой. В настоящее время существует необходимость введения категории «архитектурная энергетика» и рассмотрения этих двух

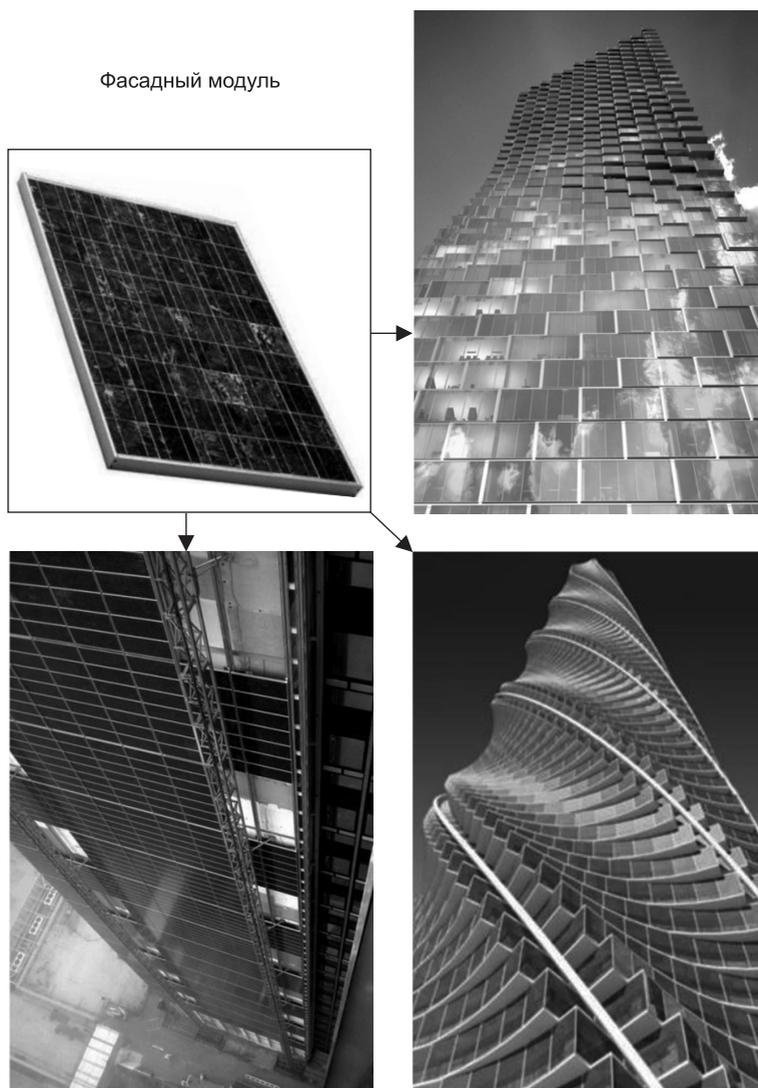


Рис. 3. Виды интегрируемых строительных фотоэлектрических модулей и примеры высотных зданий с применением данной технологии

понятий в единстве. Такой подход позволит в дальнейшем создавать здания, в которые с начального этапа проектирования будут интегрированы возобновляемые источники энергии как часть объемно-пространственного решения объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тетиор, А.Н. Устойчивое развитие города — Sustainable development of city: [В 2 ч.] [Текст] / А.Н. Тетиор. — М. : Ком. по телекоммуникациям и средствам массовой информ. Правительства Москвы, 1999. — 173 с.
2. Ахмедов, Р.Б. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии [Текст] / Р.Б. Ахмедов, А.Д. Передерий. — М. : О-во «Знание» РСФСР, 1988. — 44 с.
3. Об электроэнергетике: федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ [Текст] // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2003. — № 13. — Ст. 1177.

4. Альтернативная энергия: ветроэнергетика [Текст] // Научно-производственная компания Scienmet Group. — М., 2014. — URL: <http://www.scienmet.ru/ru/occupation/vetroenergetika> (Дата обращения: 01.02.2015).
5. Ветрогенератор [Текст] // Аккумуляторы, батарейки и другие источники питания. 2009. URL: <http://www.powerinfo.ru/wind-generator.php> (Дата обращения: 30.01.2015).

*СЕМИКИН Павел Павлович, вед. науч. сотр.; E-mail: litodano@gmail.com
Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий (ЦНИИЭП жилища), г. Москва
БАЦУНОВА Татьяна Павловна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: litodano@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 19.12.14

Semikin Pavel Pavlovich, head scientist; E-mail: litodano@gmail.com, Central Research and Design Institute for Residential and Public Buildings, Moscow, Russia
Batsunova Tatiana Pavlovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

FEATURES OF VOLUMETRIC-SPATIAL SOLUTIONS OF HIGH-RISE BUILDINGS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Considered the main architectural methods of intensification of production of energy from renewable sources in the high-rise buildings. Classified technical equipment running on wind and solar energy. In article are examples of projects that illustrate the use of wind and solar power plants.

Key words: high-rise buildings, architecture, volumetric-spatial solutions, renewable energy sources.

REFERENCES

1. Tetior, A.N. Sustainable urban development — Sustainable development of city: [In 2 p.] [Text] / A.N. Tetior — М. : Committee on Telecommunications and Mass Media of the Government of Moscow, 1999. — 173 p.
2. Akhmedov, R.B. Alternative and renewable energy sources [Text] / R.B. Akhmedov, A.D. Perederiy. — М. : Company «Knowledge» of the RSFSR, 1988. — 44 p.
3. On electric power industry: federal law from 26.03.2003 N 35-FL [Text] // Collected legislation of the Russian Federation. — 2003. — N 13. — St. 1177.
4. Alternative energy: Wind power [Text] // Scientific production company scienmet group. — М., 2014. — URL: <http://www.scienmet.ru/ru/occupation/vetroenergetika> (01 February 2015).
5. Wind turbine [Text] // Batteries and other power sources. 2009. URL: <http://www.powerinfo.ru/wind-generator.php> (30 January 2015).

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 532.592

В.И. БУКРЕЕВ, В.В. ДЕГТЯРЕВ, А.В. ЧЕБОТНИКОВ

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКЕ КОНТЕЙНЕРА, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОГО ЖИДКОСТЬЮ*

Приведены результаты экспериментальной проверки линейной теории поверхностных гравитационных волн в прямоугольном контейнере, частично заполненном водой и колеблющемся в продольном направлении по гармоническому закону. Показано, что теория правильно предсказывает существование в этой задаче множества резонансных режимов генерации волн, возникающих при частотах колебаний контейнера, совпадающих с нечетными собственными частотами колебания жидкости. В эксперименте волны в резонансных режимах могут обрушиться с образованием кумулятивных струй, уносящих много энергии. Установлено, что при частотах колебаний контейнера, совпадающих с четными собственными частотами колебаний жидкости, амплитуда колебаний на торцевых стенках контейнера очень мала.

Ключевые слова: вынужденные колебания, собственная частота, кумулятивная струя, резонанс, частично заполненный жидкостью контейнер.

Научное направление, посвященное анализу колебаний жидкости со свободной поверхностью в движущемся сосуде и движения тела с полостями, частично заполненными жидкостью, находит применение при решении крупных прикладных проблем. К числу таких проблем относятся безопасная транспортировка жидких грузов, предотвращение плескания жидкого топлива в баках ракетных двигателей и плескание криогенной жидкости при транспортировке сжиженных газов. Одну из задач этого научного направления решил Н.Е. Жуковский [1]. Значительный вклад в развитие теории колебаний жидкости со свободной поверхностью в движущемся сосуде внес Н.Н. Моисеев [2].

Теоретическое решение рассматриваемой здесь задачи на основе модели идеальной жидкости получил Л.Н. Сретенский [3]. В рамках линейной теории устойчивости он показал, что в случае гармонических колебаний прямоугольного контейнера, частично заполненного идеальной несжимаемой жидкостью, имеется безграничное упорядоченное счетное множество резонансных режимов генерации гравитационных волн.

Экспериментальное исследование устойчивости волн в колеблющемся контейнере, частично заполненном жидкостью, выполнено в [4], но только до частоты колебаний контейнера, равной частоте третьей соб-

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований президиума РАН (проект № 18.6).

ственной моды колебаний жидкости. В настоящей статье приведены результаты экспериментальной проверки теории [3] при частотах колебаний контейнера вплоть до частоты шестнадцатой собственной моды колебаний жидкости. В [3] анализируются как кинематические, так и динамические характеристики течения. Здесь рассматриваются только кинематические характеристики.

Опыты выполнялись в прямоугольном горизонтальном контейнере длиной 2 м, шириной 0,08 м и высотой 0,2 м. Схема эксперимента показана на рис. 1. Контейнер заполнялся водой до глубины h , а затем совершал

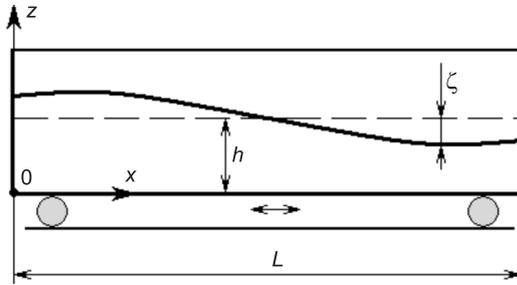


Рис. 1. Схема эксперимента

горизонтальные продольные колебания по гармоническому закону с амплитудой a и круговой частотой Ω . Система привода контейнера в движение включала электродвигатель постоянного тока и кривошипно-шатунный механизм. Большое отношение длины шатуна (0,97 м) к длине кривошипа при ее максимальном значении

(0,017 м) обеспечивало синусоидальный характер колебаний контейнера с погрешностью не более 1,7 %.

Образующиеся при колебаниях контейнера гравитационные волны на поверхности воды измерялись одновременно десятью волномерами, закрепленными на контейнере. Волномеры располагались в продольной плоскости симметрии контейнера. Закон движения контейнера измерялся реохордным преобразователем перемещения в электрический сигнал. Сигналы волномеров и реохорда регистрировались компьютером.

Движение жидкости в теории [3] считается потенциальным. Потенциал скоростей φ в системе координат, движущейся вместе с сосудом, задается в виде

$$\varphi(x, z) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n}{L} z\right) \cos\left(\frac{\pi n}{L} x\right),$$

где

$$A_0 = Lc_0, \quad A_n = 0 \quad (n = 2, 4, 6, \dots),$$

$$A_n = \frac{4Lc_0\xi}{\pi^2} \frac{1}{n^2(n \operatorname{sh}(rn) - \xi \operatorname{ch}(rn))} \quad (n = 1, 3, 5, \dots).$$

В этих формулах x и z — продольная и вертикальная координаты; L — длина контейнера;

c_0 — скорость движения подвижной системы координат;

n — номер собственной моды колебаний жидкости;

$$\xi = \frac{L\Omega^2}{\pi g}, \quad r = \frac{\pi h}{L};$$

штрих у знака суммы означает, что суммирование выполняется только по нечетным значениям n .

Вертикальные отклонения свободной поверхности от положения равновесия описываются формулой:

$$\zeta(x, t) = h - \frac{\Omega c_0}{g} \left\{ \left(\frac{1}{2} L - x \right) + \frac{4L\xi}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{\pi n}{L} x\right)}{n^2(\operatorname{th}(rn) - \xi)} \right\} \sin \Omega t.$$

Потенциал и отклонения свободной поверхности стремятся к бесконечности, когда n принимает нечетные значения, удовлетворяющие условию:

$$n \operatorname{sh}(rn) - \xi \operatorname{ch}(rn) = 0,$$

или

$$\frac{L\Omega^2}{n\pi g} = \operatorname{th}(rn). \quad (1)$$

Если равенство (1) имеет место при четных значениях n , то коэффициент A_n с соответствующим номером остается произвольным, и формула для потенциала скорости пополняется одним слагаемым с неопределенным коэффициентом [3].

Собственные частоты колебаний жидкости в контейнере ω_n определяются в линейной теории формулой

$$\omega_n^2 = gk_n \tanh(k_n h), \quad k_n = \frac{n\pi}{L}. \quad (2)$$

Когда длина контейнера L намного больше глубины жидкости h , можно использовать следующую формулу, полученную на основе длинноволнового приближения:

$$\omega'_n = k_n \sqrt{gh}. \quad (2a)$$

Если частота колебаний контейнера Ω совпадает с какой-либо собственной частотой колебаний жидкости ω_n при нечетных значениях n (т.е. в резонансных режимах), скорость жидкости и амплитуда волны стремятся в теории к бесконечности. Реально, дисперсия волн и нелинейные эффекты приводят к отклонению от линейной теории, и волна обрушивается при некотором конечном значении амплитуды.

Один из нелинейных эффектов заключается в том, что при определенных условиях вместо стоячих образуются бегущие волны, многократно отражающиеся от торцевых стенок контейнера. В резонансном режиме имеет место наложение встречных бегущих волн, и в определенной фазе колебаний контейнера может образоваться кумулятивная струя.

Некоторые результаты измерения высоты волн в зависимости от частоты колебаний контейнера приведены на рис. 2 при значении параметра $x^0 = x/L = 1$. На этом рисунке безразмерные экстремальные отклонения свободной поверхности от положения равновесия $\zeta_{ext}^0 = \zeta_{ext} / h$ представлены в зависимости от безразмерной частоты колебаний контейнера $\Omega^0 = 2\Omega L / \pi \sqrt{gh}$. Сплошные экспериментальные точки соответ-

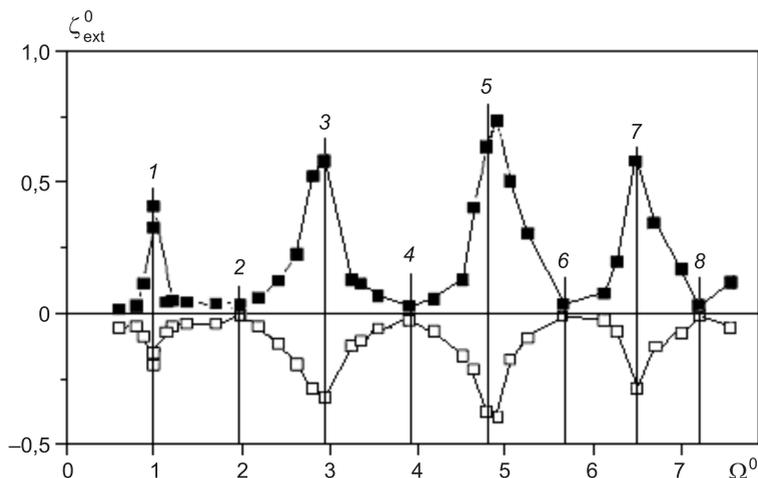


Рис. 2. Зависимость амплитуды волн от частоты колебаний контейнера $h = 0,065$ м, $L = 2$ м, $x^0 = 1$

ствуют отклонениям свободной поверхности вверх, прозрачные точки — вниз от положения равновесия. Положения собственных частот, вычисленных по точному дисперсионному соотношению (2), отмечены вертикальными линиями. Наклонные цифры соответствуют номерам собственных мод.

Экспериментальные данные показывают, что при частотах колебаний контейнера, равных нечетным собственным частотам колебаний воды, волномеры регистрируют наибольшие отклонения свободной поверхности как вверх, так и вниз от положения равновесия. Это хорошо согласуется с условием существования резонансных режимов в линейной теории [3].

Фотоснимок кумулятивной струи в резонансном режиме приведен на рис. 3. Струя образовалась при наложении гладких встречных бегущих волн. Это происходило при прохождении встречными волнами каждого теоретического значения координаты x , соответствующей положению пучности стоячей волны. На рис. 3 показана только одна из кумулятивных струй в точке координаты $x = L / 3$. Влияние конечной глубины

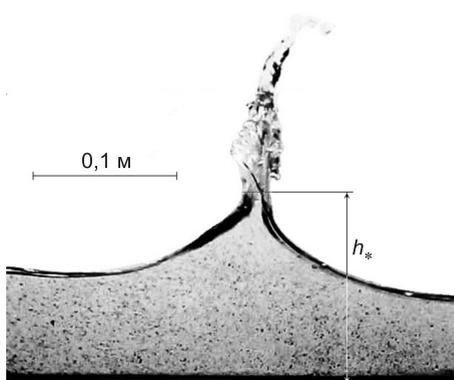


Рис. 3. Вертикальная кумулятивная струя при $h = 0,065$ м, $L = 2$ м, $a = 0,017$ м, $n = 3$

контейнера проявилось в том, что обрушение волн происходило только при отклонении свободной поверхности вверх от положения равновесия.

Если частота колебаний контейнера совпадала с частотой какой-либо четной собственной моды колебаний жидкости, амплитуда волн была минимальной и намного меньше, чем в резонансном режиме (см. рис. 2).

На рис. 4 приведены, в безразмерной форме, примеры зависимо-

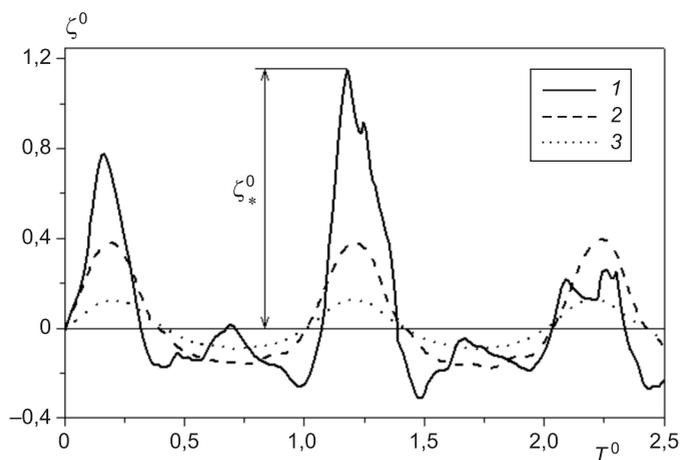


Рис. 4. Пример записи отклонений свободной поверхности при разных режимах колебания контейнера

$h = 0,065$ м, $L = 2$ м; 1 — $T_n = T_5 = 1,034$ с, $a = 0,017$ м, $x = 3L/5$;
 2 — $T_n = T_5 = 1,034$ с, $a = 0,003$ м, $x = 3L/5$; 3 — $T_n = T_4 = 1,274$ с,
 $a = 0,017$ м, $x = 5L/8$

стей отклонения свободной поверхности $\zeta^0 = \zeta / h$ от времени $t^0 = t / T_n$. Время нормировано на период колебаний контейнера. Для кривых 1 и 2 на рис. 4 период $T_5 = 1,034$ с, а для кривой 3 — $T_4 = 1,274$ с. Датчик волномера располагался в теоретической пучности стоячих волн (кривая 1 и 2) и в теоретическом узле стоячих волн (кривая 3).

Следует отметить, что волномер регистрирует колебания свободной поверхности с некоторой погрешностью, если вода аэрирована. В режимах, при которых волны обрушиваются, но кумулятивные струи не образуются, соответствующая погрешность невелика. В случае образования кумулятивных струй, в которых содержание воды мало, а воздуха велико, волномер регистрирует подъем воды, практически, только до глубины h_* , показанной на рис. 3. В безразмерном виде величина $\zeta_*^0 = (h_* - h) / h$ приведена на рис. 4.

Данные на рис. 4 показывают, что в резонансном режиме высота подъема основной массы воды может превышать начальную глубину в 1,19 раза, а высота заплеска кумулятивной струи над начальным уровнем свободной поверхности может превышать три начальные глубины (см. рис. 3).

На рис. 5 представлены результаты измерения экстремальных отклонений свободной поверхности ζ_{ext}^0 от положения равновесия в зависимости от амплитуды колебания контейнера $a^0 = a / h$ при двух значениях Ω , соответствующих третьей и пятой модам. Экспериментальные точки 1, 3, 5 и 6 на этом рисунке соответствуют гладким, точки 2 и 4 — обрушивающимся волнам.

Данные, приведенные на рис. 5, показывают, что в резонансных режимах волны сохраняют гладкость только при малых значениях амплитуды a^0 и частоты колебания контейнера. Например, при $n = 5$ обрушение волн стало проявляться при $a^0 = 0,069$. Если имело место $n = 3$, то про-

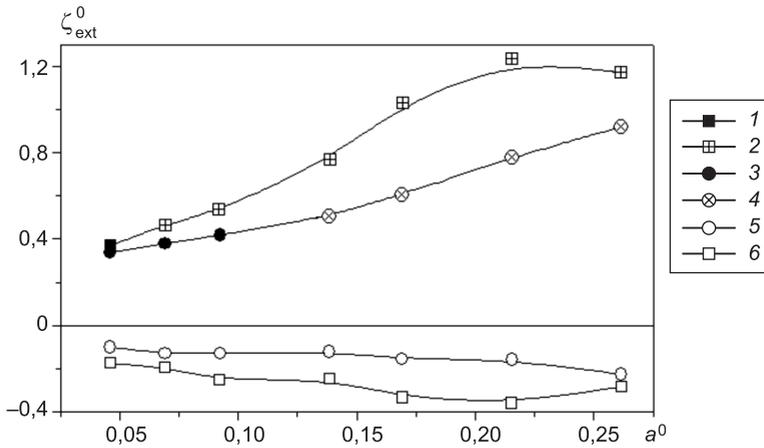


Рис. 5. Зависимость экстремальных отклонений свободной поверхности от амплитуды колебаний контейнера

1–4 — отклонение вверх от положения равновесия; 5, 6 — отклонение вниз от положения равновесия; 1, 2, 6 — $n = 5$; 3, 4, 5 — $n = 3$

цесс обрушения начался при более высоком значении, а именно при $a^0 = 0,138$. С ростом a^0 отклонения свободной поверхности как вверх, так и вниз от положения равновесия стремятся к постоянным значениям. В случае $n = 5$ эта тенденция наблюдалась с $a^0 > 0,23$.

Таким образом, опыты подтвердили теорию [3], которая предсказывает существование в рассматриваемой задаче безграничного упорядоченного счетного множества резонансных режимов генерации волн. В теории вязкость жидкости не учитывается, и в резонансных режимах амплитуда волн возрастает до бесконечности. В эксперименте нелинейные эффекты, вязкость жидкости и дисперсия ограничивают рост волн, и они могут обрушиться с образованием кумулятивных струй, уносящих много энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жуковский, Н.Е. Полн. собр. соч. [Текст] / Н.Е. Жуковский. — М.; Л.: Гл. ред. авиац. лит., 1936. — Т. 3. — 486 с.
2. Моисеев, Н.Н. Движение твердого тела, имеющего полость, частично заполненную идеальной каплевой жидкостью [Текст] / Н.Н. Моисеев // Докл. АН СССР. — 1952. — Т. 85, № 4. — С. 719–722.
3. Сретенский, Л.Н. Колебания жидкости в подвижном сосуде [Текст] / Л.Н. Сретенский // Изв. АН СССР, ОТН. — 1951. — № 10. — С. 1483–1494.
4. Bredmose, H. Experimental investigation and numerical modeling of steep forced water waves [Текст] / H. Bredmose, M. Brocchini, D.H. Peregrine, L. Thais // J. Fluid Mech. — 2003. — Vol. 490. — P. 214–249.

БУКРЕЕВ Виктор Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск
 ДЕГТЯРЕВ Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru
 Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЧЕБОТНИКОВ Алексей Владимирович, канд. техн. наук; E-mail: avchebotnikov@gmail.com

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Получено 18.12.14

Bukreev Viktor Ivanovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru; Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Degtyarev Vladimir Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: gts@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Chebotnikov Alexey Vladimirovich, candidate of technical sciences; E-mail: avchebotnikov@gmail.com; Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

GRAVITY SURFACE WAVES AT THE LONGITUDINAL PITCHING OF A CONTAINER PARTIALLY FILLED WITH LIQUID

The results are given of experimental verification of the linear theory of surface gravity waves in a rectangular container partially filled with water and oscillating harmonically in the longitudinal direction. It is shown that the theory correctly predicts existence in this problem of a multitude of the resonant modes of generation of the waves arising when frequencies oscillation of the container coincide with odd own frequencies of oscillation of liquid. In the experiment, the waves in resonant modes may collapse with the formation of cumulative jets, carrying away a lot of energy. It is established that at frequencies of the container fluctuations coinciding with even own frequencies of liquid oscillations, amplitude of oscillations on the butt end walls of the container is very small.

Key words: forced oscillations, natural frequency, cumulative jet, resonance, container partially filled with liquid.

REFERENCES

1. Joukowski, N.E. Collected paper [Text] / N.E. Joukowski. — M.; L. : United Scientific Technical Publishing House, 1936. — Vol. 3. — 486 p.
2. Moiseyev, N.N. The motion of a rigid body with cavities partially filled with an ideal liquid [Text] / N.N. Moiseyev // Dokl. AN SSSR. — 1952. — Vol. 85, N 4. — P. 719–722.
3. Sretyenskiy, L.N. The oscillations of liquid in a moving container [Text] / L.N. Sretyenskiy // Izv. AN SSSR. Otd. Tekh. Nauk. — 1951. — N 10. — P. 1483–1494.
4. Bredmose, H. Experimental investigation and numerical modeling of steep forced water waves [Text] / H. Bredmose, M. Brocchini, D.H. Peregrine, L. Thais // J. Fluid Mech. — 2003. — Vol. 490. — P. 214–249.

УДК 691–404:538

О.Э. КОШЕЛЕВА, Н.Е. БОРИСОВСКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Рассмотрено получение магнитной жидкости, приведены данные анализа ее свойств. Описан метод измерения размеров коллоидных частиц. Указаны варианты применения магнитной жидкости.

Ключевые слова: магнитная жидкость, получение, свойства, размер частиц.

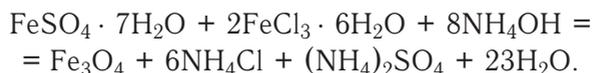
Магнитные жидкости в последнее время широко используют в разных сферах. Ионы железа придают системе магнитные свойства, что позволяет удерживать магнитные жидкости в заданном месте, манипулировать ими с помощью магнитного поля. Способность такой жидкости менять состояние (жидкое \leftrightarrow твердое) под воздействием магнитного поля позволяет применять их в качестве герметичных уплотнителей, смазки, сорбентов, в том числе для очистки воды, при производстве строительных композитных материалов, гидравлической техники, в акустических системах, при охлаждении силовых электрических кабелей, решении медико-биологических проблем и т. д. Амортизаторы, уплотнители и разнообразные технические устройства с магнитной жидкостью имеют ряд преимуществ в сравнении с традиционными конструкциями: полную герметичность, минимальный износ за счет трения, отсутствие смазки, простоту обслуживания и др. [1, 2].

В железе и некоторых других материалах при температуре ниже точки Кюри существует дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов атомов (ионов) даже в отсутствии внешнего магнитного поля. Такие вещества называют ферромагнетиками. Они обладают самопроизвольной намагниченностью, притягиваются к магнитам. Особое место среди них занимают магнитные жидкости, представляющие собой коллоидные системы, состоящие из находящихся во взвешенном состоянии наноразмерных частиц ферромагнитного материала. В качестве дисперсионной среды выступают жидкие органические растворители или вода. Магнитной фазой часто являются частицы магнетита Fe_3O_4 или ферриты (MFe_2O_4 , где М — переходные или непереходные металлы). Агрегативную устойчивость обеспечивают расположенные на частицах в виде мономолекулярного слоя поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Для получения магнитной жидкости применяют разные методы, основанные на диспергировании или химической конденсации [3]. Конденсационные методы более эффективны, предусматривают соединение отдельных молекул или ионов растворенного вещества в агрегаты коллоидных размеров. Они проще в аппаратном оформлении, позволяют получать высококачественный продукт при низкой температуре (25–40 °С).

© Кошелева О.Э., Борисовская Н.Е., 2015

В настоящей работе использовали магнитную жидкость, синтезированную химической конденсацией высокодисперсного магнетита. Метод основан на следующей реакции солей железа(II) и (III) в щелочной среде:



Осажденные частицы магнетита переводили в коллоидную систему воздействием ПАВ — олеиновой кислоты. Слой олеиновой кислоты, адсорбированной на поверхности частиц, препятствует коагуляции и осаждению частиц. Размер образующихся частиц ограничивается скоростью введения олеиновой кислоты и интенсивным перемешиванием системы. Крупные коллоидные частицы магнитной жидкости плохо стабилизируются и затрудняют получение продукта с высокой концентрацией магнитной фазы.

Феррожидкости имеют уникальные свойства, связанные со способностью коллоидной системы сохранять физические свойства, присущие диспергированному веществу в монолитном состоянии. В практике часто используют свойство удерживать магнитную жидкость в определенной точке пространства магнитным полем и магнитожидкостную левитацию — выталкивание немагнитных тел. Одним из направлений применения магнитной жидкости в промышленности является изготовление сорбентов. Эффективность очистки и других применений продукта обусловлена намагниченностью, вязкостью, размером частиц дисперсной фазы и другими свойствами ферромагнитной жидкости.

Поскольку фазовый состав частиц и их размер играют определяющую роль в свойствах ферромагнитной жидкости, методом рентгеновской дифрактометрии проведены исследования по идентификации дисперсной фазы, количественному анализу фазового состава и определению размера частиц. Порошковые дифрактограммы регистрировали на автоматическом дифрактометре фирмы Philips PW 1830/1820/1710 с «Automatic Divergence Slits» (переменной апертуры детектора, зависящей от дифракционного угла); с использованием медного монохромного излучения $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, 40 кВ, 30 мА).

На рис. 1 приведена порошковая дифрактограмма для твердого образца, выделенного из магнитной жидкости. Несмотря на высокий уровень помех, возможна идентификация фазы магнетита Fe_3O_4 .

Установлено, что во всех опытах размер частиц примерно одинаков и составляет

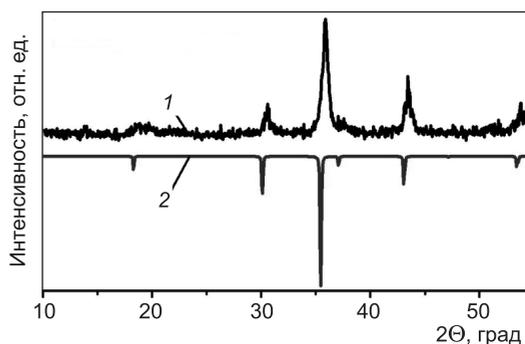


Рис. 1. Порошковая дифрактограмма
1 — исследуемый образец магнитной жидкости; 2 — литературные данные для фазы Fe_3O_4 феррофлюида

12–18 нм, что соответствует литературным данным. Для определения средних размеров кристаллитов проводили расчет размеров L_c областей когерентного рассеяния по формуле Шеррера:

$$L_c = K\lambda / (\cos\theta \cdot \beta),$$

где K — фактор формы (типичные значения около 0,9);

λ — длина волны излучения;

β — уширение (ширина на полувысоте) рентгеновской линии;

θ — угол отражения.

Для повышения эффективности исследований проводился активный эксперимент, использовали план полного факторного эксперимента ПФЭ 2^3 . Было проведено восемь опытов, где выходными параметрами являлись функции: время осаждения частиц, масса магнетита и размер частиц. В качестве наиболее значимых факторов были выбраны концентрации солей железа(II) и (III) и стабилизатора — олеиновой кислоты.

В оптимальном варианте синтеза феррофлюида установлен диаметр частицы около 12 нм. При необходимости можно регулировать размер частиц дисперсной фазы методом ультразвукового воздействия.

Аналитическими методами определяли количественное соотношение ионов Fe(II) и Fe(III) (рекомендуемое в литературе соотношение ионов 1:2). Содержание ионов Fe(II) устанавливали титрованием пробы коллоидного раствора с помощью 0,1н раствора $KMnO_4$ после соответствующей подготовки. Для определения количества ионов Fe(III) применяли 0,1н раствор $Na_2S_2O_3$. В ходе анализа установлено соотношение ионов Fe(II): Fe(III), равное 1:3. В моделях процесса получения ферромагнитной жидкости более значимым фактором в адекватном уравнении оказалась концентрация солей железа(III).

Специфической характеристикой магнитной жидкости является наличие магнитных свойств. При намагничивании в магнитном поле формируются характерные регулярные складки, форма и направление которых определяются действием постоянного магнита (рис. 2); этот процесс самопроизвольный. Ферромагнитные жидкости имеют высокую магнитную восприимчивость, поэтому складки на поверхности образуются даже при действии слабополюсного магнита.

Магнитные свойства можно использовать в создании радиопоглощающих материалов и покрытий, которые находят применение в оборудовании помещений, экранировании радиоприемных устройств, защите биологических объектов от электромагнитного излучения и т.д.

Изучение магнитных свойств полученного феррофлюида проводили физическими методами. Излучатель электромагнитных волн располагали под разными углами к объекту — пластине из цинка, покрытой слоем изучаемого материала, при этом регистрировалось напряжение тока. Было установлено, что сигнал с длиной волны 491 нм, регистрируемый после отражения от пластины, имел меньшее значение в сравнении с пластиной без покрытия (рис. 3).

Следовательно, феррофлюид обладает поглощающей способностью благодаря наличию магнитных свойств.

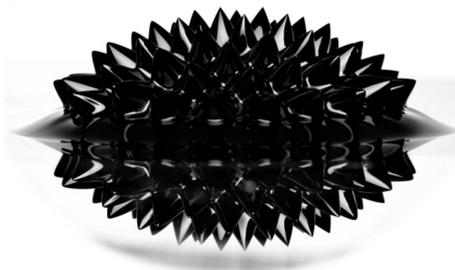


Рис. 2. Характерный рельеф магнитной жидкости

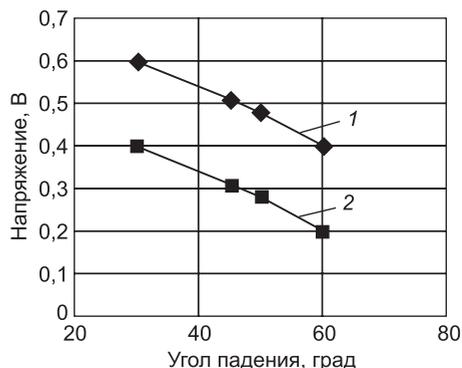


Рис. 3. График зависимости напряжения тока от угла падения

1 — пластина без покрытия; 2 — пластина с феррофлюидом

Ферромагнитная жидкость сохраняет все свойства при длительном хранении в течение нескольких лет и легко переводится в жидкое состояние при разбавлении водой. Обладая одновременно свойствами магнитного материала и жидкости-носителя (хорошей текучестью), магнитная жидкость позволяет решать разнообразные научные и практические задачи.

Следующим этапом исследований является изучение сорбирующей способности феррофлюида в составе магнитоуправляемого сорбента и определение механизма сорбции. Воздействие магнитного поля на воду меняет поведение примесей и протекающих в ней процессов. Использование таких сорбентов эффективно, например, при сборе нефти с поверхности водоемов контактным способом или очистке сточных вод. Можно вводить сорбенты в очищаемую среду в виде дисперсной фазы, повышая скорость сорбции [4].

В результате исследований:

- изучена возможность получения магнитной жидкости методом конденсации по низкотемпературной технологии;
- определены наноразмеры коллоидных частиц, составляющие 12–18 нм;
- уточнен количественный состав магнитной жидкости;
- рассчитаны математические модели синтеза феррофлюида, позволяющие прогнозировать свойства и состав продукта, установлено влияние выбранных факторов и оптимальный вариант;
- подтверждено наличие магнитных свойств феррофлюида, полученного по указанной технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губин, С.П. Магнитные наночастицы: методы получения, строение, свойства [Текст] / С.П. Губин и др. // Успехи химии. — 2005. — № 6. — С. 539–574.
2. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости: Справ. пособие [Текст] / В.Е. Фертман. — Минск : Вышэйш. шк., 1988. — 184 с.
3. Алексашин, И.В. Оптимизация условий синтеза магнитной жидкости [Текст] / И.В. Алексашин, Е.Д. Першина, К.А. Каздобин // Учен. зап. Таврич. нац. ун-та. — 2010. — № 3. — С. 227–235.

4. Мечковский, С.А. Высокодисперсные магнитоизвлекаемые сорбенты [Текст] / С.А. Мечковский и др. // Вестн. БГУ. — 1998. — № 3. — С. 13–16.

КОШЕЛЕВА Ольга Эдуардовна, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

БОРИСОВСКАЯ Надежда Евгеньевна, студ.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 25.12.14

Kosheleva Olga Eduardovna, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Borisovskaya Nadezhda Evgenievna, student, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

THE ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF MAGNETIC LIQUID

In the article is examined obtaining magnetic liquid, the data of the analysis of its properties are cited. The method of measuring the sizes of colloidal particles is described. The versions of the application of a magnetic liquid are indicated.

Key words: magnetic liquid, obtaining, property, particle size.

REFERENCES

1. Gubin, S.P. Magnetic nanos-particle: the methods of obtaining, structure, property [Text] / S.P. Gubin et al. // The successes of chemistry. — 2005. — N 6. — P. 539–574.
2. Fertman, V.E. Magnetic liquids: Reference benefit [Text] / V.E. Fertman. — Minsk : Vysheyshaya school, 1988. — 184 p.
3. Aleksashin, I.V. Optimization of synthesis conditions of magnetic liquid [Text] / I.V. Aleksashin, E.D. Pershina, K.A. Kazdobin // The scientific notes of the tavrcheskogo national university. — 2010. — N 3. — P. 227–235.
4. Mechkovskiy, S.A. Highly dispersed magnetoextracted sorbents [Text] / S.A. Mechkovskiy et al. // Herald BGU. — 1998. — N 3. — P. 13–16.

УДК 621.891

А.Г. ЛЕНИВЦЕВ, И.В. ДУДАНОВ, И.В. ЛАПТЕВА

ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧАХ МАШИН С УЧЕТОМ ВОЗДУХООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Рассмотрен процесс накопления механических примесей в трансмиссионном масле силовой передачи при различных режимах эксплуатации и изменении герметичности в процессе работы. Получена зависимость интенсивности накопления механических примесей в масле от площади эквивалентного отверстия, характеризующего герметичность силовой передачи.

Ключевые слова: трансмиссия, износ, смазка, механические примеси, воздухообмен, уровень фильтрации, фильтр.

Эффективными методами снижения абразивного изнашивания деталей трансмиссий строительных машин являются установка фильтров с достаточным уровнем очистки масла в смазочной системе и повышение герметичности силовой передачи. Снижение воздухообмена с окружающей средой можно достигнуть установкой компенсатора герметичности, представляющего собой дополнительную полость V_k с эластичной диафрагмой, которая сообщается с внутренним свободным объемом V_0 через воздухопровод с внутренним сечением S (рис. 1) [1, 2].

Основными параметрами компенсатора герметичности являются объем V_k и площадь внутреннего сечения воздуховода S , зависящие от конструктивных особенностей силовой передачи, типа сальников и уплотнений.

На рис. 2 представлен процесс накопления механических примесей γ_m в трансмиссионном масле при трех режимах смазывания, при длительной бесшумной его работе в тракторных силовых передачах, полученный по результатам экспериментальных исследований на кафедре «Тракторы и автомобили» Самарской государственной сельскохозяйственной академии.

Процессы накопления механических примесей в силовых передачах (кривая 1 и 3) характеризуются экспоненциальной зависимостью от времени работы при разных уровнях стабильности по времени и содержанию механических примесей.

Характер накопления механических примесей в силовой передаче, оборудованной компенсатором герметичности (кривая 2), объясняется

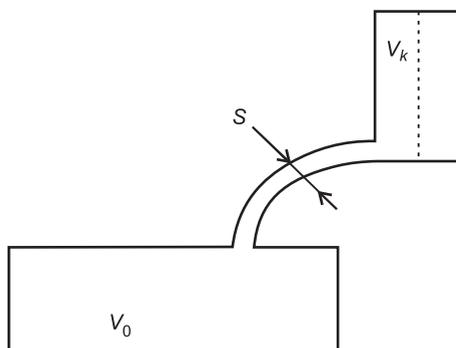


Рис. 1. Схема действия компенсатора герметичности

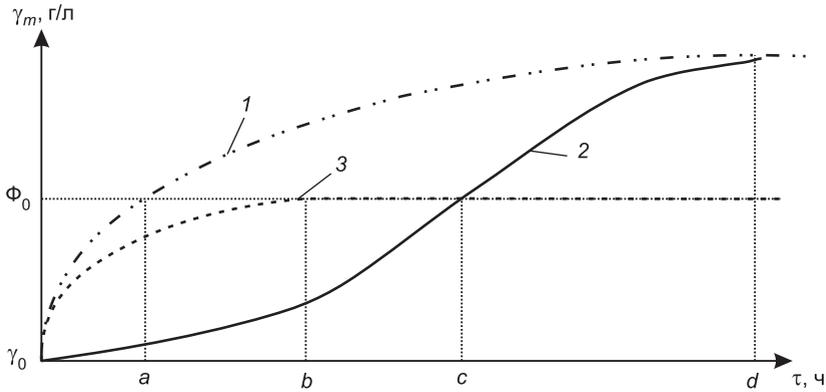


Рис. 2. Процесс накопления механических примесей

1 — силовая передача без фильтра в смазочной системе; 2 — силовая передача без фильтрования масла, оборудованная компенсатором герметичности; 3 — силовая передача с фильтром

Φ_0 — допустимое количество механических примесей при фильтровании масла, обеспечивающее регламентированную скорость изнашивания деталей; γ_0 — начальное содержание механических примесей в масле; a, b, c — допустимый срок службы масла до замены при различных режимах смазывания; d — срок службы до потери эффективности компенсатора герметичности при полном износе сальников и уплотнений

снижением воздухообмена с окружающей средой в начальный период эксплуатации и последующим уменьшением эффективности компенсатора герметичности, вследствие износа сальников и уплотнений [3].

Накопление механических примесей в силовой передаче:

$$\gamma_m = F(f_s, \tau), \quad (1)$$

где f_s — площадь эквивалентного отверстия, характеризующая уровень герметичности силовой передачи;

τ — время работы силовой передачи.

Для анализа процесса накопления механических примесей в силовой передаче, оборудованной компенсатором герметичности, целесообразно рассмотреть массовый баланс механических примесей с учетом следующих условий и допущений:

— воздухообмен силовой передачи пропорционален площади эквивалентного отверстия, характеризующей уровень герметичности;

— механические примеси равномерно распределены в объеме воздуха, поступающего в корпус силовой передачи, и в объеме масла в смазочной системе;

— утечки масла пропорциональны площади эквивалентного отверстия, распределение механических примесей в утечках соответствует их содержанию в смазочной системе;

— исходное содержание механических примесей в масле составляет γ_0 .

Уравнение массового баланса механических примесей можно представить в виде

$$M_n = M_m + M_y, \quad (2)$$

где M_n — механические примеси, поступающие в силовую передачу при воздухообмене;

M_m — механические примеси, попадающие в масло с учетом их частичного прилипания на поверхности силовой передачи;

M_y — механические примеси, удаленные из силовой передачи с утечками масла.

С учетом динамики процесса накопления механических примесей в трансмиссионном масле [2] составляющие массового баланса характеризуются выражениями:

$$M_{\Pi} = \Delta V \gamma d f_{\text{э}} ; \quad (3)$$

$$M_m = \delta V_m d \gamma'_m ; \quad (4)$$

$$M_y = k V_y \gamma'_m d f_{\text{э}} , \quad (5)$$

где ΔV — поступление воздуха на единицу площади эквивалентного отверстия;

γ — запыленность окружающей среды;

δ — доля механических примесей, попадающих в масло;

V_m — объем масла в смазочной системе;

k — коэффициент утечек масла;

V_y — утечки масла на единицу площади эквивалентного отверстия;

γ'_m — концентрация механических примесей в масле при изменении герметичности.

Подставляя выражения (3)–(5) в уравнение (2), имеем:

$$\Delta V \gamma d f_{\text{э}} = \delta V_m d \gamma'_m + k V_y \gamma'_m d f_{\text{э}} . \quad (6)$$

Решение данного уравнения относительно γ'_m позволяет получить зависимость содержания механических примесей в трансмиссионном масле при изменении площади эквивалентного отверстия $f_{\text{э}}$, как показателя уровня герметичности силовой передачи:

$$\gamma'_m = \frac{\Delta V \gamma}{k V_y} \left(1 - e^{-\frac{k V_y}{\delta V_m} f_{\text{э}}} \right) . \quad (7)$$

С учетом начального содержания механических примесей в свежем масле γ_0 их суммарное содержание по мере увеличения площади эквивалентного отверстия характеризуется выражением:

$$\gamma_m = \gamma_0 + \gamma'_m \quad (8)$$

или

$$\gamma_m = \gamma_0 + \frac{\Delta V \gamma}{k V_y} \left(1 - e^{-\frac{k V_y}{\delta V_m} f_{\text{э}}} \right) . \quad (9)$$

В начале эксплуатации силовой передачи ($\tau = 0$) ее герметичность определяется площадью эквивалентного отверстия $f_0 = f_{\text{э}}$,

вероятность снижения герметичности силовой передачи в процессе эксплуатации:

$$\dot{f}_\tau = \dot{f}_{\tau-1}(1 + P) = \dot{f}_0(1 + P)^\tau, \quad (10)$$

где P — снижения герметичности в единицу времени.

Из выражения степенной функции (10)

$$\dot{f}_\tau = \dot{f}_0 e^{\tau \ln(1+P)} = \dot{f}_0 e^{c\tau}; \quad (11)$$

$$c = \ln(1 + P). \quad (12)$$

С учетом (9) и (12) изменение содержания механических примесей в трансмиссионном масле определяется выражением:

$$\gamma_m = \gamma_0 + \frac{\Delta V \gamma}{k V_y} \left(1 - e^{-\frac{k V_y}{\delta V_m} \dot{f}_0 e^{c\tau}} \right). \quad (13)$$

При анализе накопления механических примесей в масле важным показателем является интенсивность данного процесса, характеризующая временной фактор его стабилизации:

$$\gamma_\tau = \frac{d\gamma_m}{d\tau}, \quad (14)$$

где γ_τ — интенсивность изменения содержания механических примесей в масле в единицу времени.

Из уравнения (13)

$$\gamma_\tau = \frac{\Delta V \gamma}{\delta V_m} e^{-\frac{k V_y}{\delta V_m} \dot{f}_0 e^{c\tau}}. \quad (15)$$

Таким образом, выражения (13) и (15) позволяют исследовать процесс накопления механических примесей в трансмиссионном масле силовой передачи, оборудованной компенсатором герметичности. Данные выражения показывают влияние уровня герметичности и ее изменение в процессе эксплуатации на абразивную агрессивность режима смазывания ввиду загрязнения масла механическими примесями с учетом геометрических параметров силовой передачи и различных режимах смазывания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ч и ч и н а д з е, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. — М. : Машиностроение, 2003. — 576 с.
2. Л е н и в ц е в, А.Г. Снижение интенсивности абразивного изнашивания тракторной силовой передачи применением компенсатора герметичности: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / А.Г. Ленивцев. — Самара, 1999. — 132 с.
3. В о л о д ь к о, О.С. Методологические основы исследований надежности и работоспособности технических систем [Текст] / О.С. Володько, А.Г. Ленивцев // Изв. Самар. гос. с.-х. акад. Вып. 3. — Самара, 2013. — С. 40–44.

*ЛЕНИВЦЕВ Александр Геннадьевич, канд. техн. наук, доц.
Самарский государственный архитектурно-строительный университет
ДУДАНОВ Иван Владимирович, канд. техн. наук, доц.
Самарский государственный архитектурно-строительный университет
ЛАПТЕВА Ирина Владимировна, асс.; E-mail: gizer28086@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 24.10.14

Lenivtsev Aleksandr Gennadievich, candidate of technical sciences, assistant professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Dudanov Ivan Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Lapteva Irina Vladimirovna, assistant; E-mail: gizer28086@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PROCESS OF ACCUMULATION OF MECHANICAL IMPURITY IN POWER TRANSMISSIONS OF CARS TAKING INTO ACCOUNT AIR EXCHANGE WITH ENVIRONMENT

Process of accumulation of mechanical impurity in transmission oil of a power transmission at various modes of operation and change of tightness in the course of work is considered. Dependence of intensity of accumulation of mechanical impurity in oil on the area of the equivalent opening characterizing tightness of a power transmission is received.

Key words: transmission, wear, greasing, mechanical impurity, air exchange, filtration level, filter.

REFERENCES

1. Chichinadze, A.V. Friction, wear and greasing (tribology and tribotekhnik) [Text] / A.V. Chichinadze, E.M. Berliner, E.D. Brown [etc.]; under a general edition of A.V. Chichinadze. — M. : Mashinostroenie, 2003. — 576 p.
2. Lenivtsev, A.G. Decrease in intensity of abrasive wear of a tractor power transmission use of the compensator of tightness: avtoref. yew. ... cand. tech. sci. [Text] / A.G. Lenivtsev. — Samara, 1999. — 132 p.
3. Volodko, O.S. Methodological bases of researches of reliability and operability of technical systems [Text] / O.S. Volodko, A.G. Lenivtsev // News of the Samara State Agricultural Academy. Rel. 3. — Samara, 2013. — P. 40–44.

УДК 624.071.3.016

Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ, А.В. АЖЕРМАЧЕВ

СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ*

На основе нелинейной модели деформирования и учета разносопротивляемости растяжению-сжатию материалов стержней фермы разработан новый подход к расчету и синтезу гибридных ферменных конструкций. Расчеты показывают, что при правильном комбинировании материалов в ферменных конструкциях и учете реальных особенностей их деформирования при заданном уровне нагружения можно получить проекты с существенным улучшением качественных характеристик по весу (до 85 %) конструкционных материалов.

Ключевые слова: фермы, неоднородность свойств, нелинейные деформации.

Традиционно ферменные конструкции изготавливают из однотипных материалов с одинаковым сопротивлением растяжению и сжатию. Проблема (задача) оптимального проектирования ферм из таких материалов сводится к подбору сечений стержней для заданного допустимого уровня напряжений и часто дает недостаточно ощутимый выигрыш в весе. Более эффективный путь снижения веса и стоимости ферм

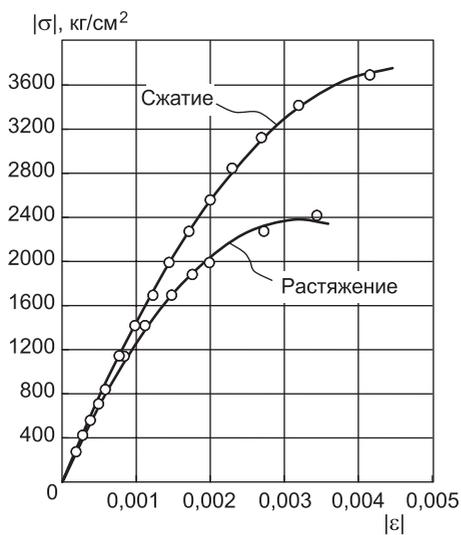


Рис. 1. Диаграммы растяжения и сжатия чугуна серого

может быть реализован за счет использования в них разнородных материалов с учетом особенностей их деформирования при растяжении и сжатии — синтез композитных ферм. На практике для большинства материалов принято считать их сопротивление при растяжении и сжатии одинаковым, однако для ряда материалов испытания показывают разительное отличие их поведения [1–3], которым пренебрегать уже невозможно. Например, на рис. 1 приведены диаграммы растяжения и сжатия чугуна серого [1], полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных методом «наименьших квадратов». Зависимость между напряжением и деформацией квадратичная. Поведение чугуна при растяжении (1) и при сжатии (2) описывают два выражения:

$$\sigma^+(\epsilon) = E_1^+ \epsilon - E_2^+ \epsilon^2; \quad (1)$$

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-01-00102.

$$\sigma^-(\varepsilon) = E_1^- \varepsilon + E_2^- \varepsilon^2. \quad (2)$$

Поскольку экспериментальные характеристики материалов в литературных источниках приведены в технических единицах, которые использовались в 1950–1960 гг., авторы считают целесообразным в настоящей работе сохранить размерности величин первоисточников.

При обработке данных об испытаниях образцов чугуна серого [1] получены следующие значения коэффициентов E_i^\pm :

при растяжении $\varepsilon \geq 0$,

$$E_1^+ = 1,493 \cdot 10^6 \text{ кгс / см}^2; \quad E_2^+ = -2,348 \cdot 10^8 \text{ кгс / см}^2;$$

в случае сжатия $\varepsilon \leq 0$,

$$E_1^- = 1,619 \cdot 10^6 \text{ кгс / см}^2; \quad E_2^- = 1,748 \cdot 10^8 \text{ кгс / см}^2.$$

Аналогичные зависимости имеют место для деревьев разных пород. Например, как показано в [4], коэффициенты в формулах (1) и (2) имеют значения, кгс/см²:

для сосны

$$E_1^+ = 1,53 \cdot 10^5, \quad E_2^+ = -44,6 \cdot 10^5, \quad E_1^- = 1,32 \cdot 10^5, \quad E_2^- = 98,3 \cdot 10^5;$$

для ясеня

$$E_1^+ = 1,55 \cdot 10^5, \quad E_2^+ = -20,2 \cdot 10^5, \quad E_1^- = 1,37 \cdot 10^5, \quad E_2^- = 82,4 \cdot 10^5.$$

Эти соотношения достаточны для расчета ферменных конструкций, однако в ряде случаев для упрощения формул и алгоритма удобнее заменить диаграммы материалов билинейными диаграммами, которые вычисляются из исходных диаграмм с помощью метода наименьших квадратов. Аппроксимации для чугуна изображены на рис. 2. Аналогичная обработка была выполнена для сосны и ясеня [4]. Необходимые для дальнейших расчетов характеристики материалов приведены в табл. 1.

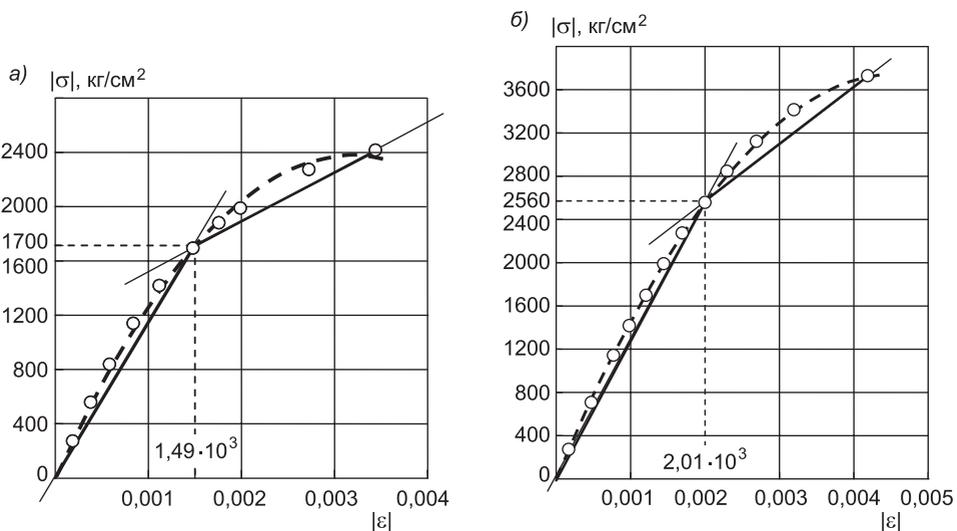


Рис. 2. Кусочно-линейная аппроксимация двумя прямыми диаграммы растяжения (а) и сжатия (б) чугуна серого

Таблица 1. Характеристики материалов для ферм

Материал	Условный предел текучести, кгс/см ²	Модуль упругости, кгс/см ²	Предельные упругие деформации	Плотность, т/м ³
Сосна	267/875	1,067 · 10 ⁵ /1,245 · 10 ⁵	2,5 · 10 ⁻³ /7,03 · 10 ⁻³	0,5
Ясень	350/1252	1,104 · 10 ⁵ /1,391 · 10 ⁵	3,17 · 10 ⁻³ /9,0 · 10 ⁻³	0,69
Чугун серый	2560/1700	1,274 · 10 ⁶ /1,141 · 10 ⁶	2,01 · 10 ⁻³ /1,49 · 10 ⁻³	7,1
Сталь ВстЗпсб-1	2450	2,1 · 10 ⁶	1,2 · 10 ⁻³	7,85

Примечание. В числителе — данные сжатия, в знаменателе — растяжения.

Расчетные характеристики материалов (табл. 1) — условный предел текучести и модуль упругости сосны, ясеня и чугуна — определялись кусочно-линейной аппроксимацией двумя прямыми (см. рис. 2).

Обозначим:

$$x_i = \frac{\bar{x}_i}{x_0}; \quad y_i = \frac{\bar{y}_i}{x_0}; \quad U_i = \frac{\bar{U}_i}{x_0}; \quad V_i = \frac{\bar{V}_i}{x_0}; \quad l_{km} = \frac{\bar{l}_{km}}{x_0}; \quad A_{km} = \frac{\bar{A}_{km}}{A_0};$$

$$\rho_{km} = \frac{\bar{\rho}_{km}}{\bar{\rho}_0}; \quad c_{km} = \frac{\bar{c}_{km}}{\bar{c}_0},$$

где \bar{x}_i, \bar{y}_i — координаты i -го узла фермы;

\bar{U}_i, \bar{V}_i — компоненты перемещения i -го узла фермы вдоль осей x и y соответственно;

$l_{km}, A_{km}, \rho_{km}, c_{km}$ — соответственно длина, площадь, плотность материала и удельная стоимость материала km -стержня фермы; x_0 — безразмеривающий параметр;

$\bar{A}_0, \bar{\rho}_0, \bar{c}_0$ — соответственно площадь стержней, плотность материала и удельная стоимость материала эталонной фермы.

Вес и стоимость фермы равны:

$$B_0 = \bar{\rho}_0 \bar{A}_0 \sum \bar{l}_{km}; \quad B = \sum \bar{l}_{km} \bar{A}_{km} \bar{\rho}_{km}; \quad C_0 = \bar{c}_0 \bar{\rho}_0 \bar{A}_0 \sum \bar{l}_{km};$$

$$C = \sum \bar{c}_{km} \bar{l}_{km} \bar{A}_{km} \bar{\rho}_{km}.$$

Определим безразмерную длину и направляющие косинусы стержней фермы:

$$l_{km} = \sqrt{(x_m - x_k)^2 + (y_m - y_k)^2};$$

$$\beta_{km} = \frac{x_m - x_k}{l_{km}}; \quad \gamma_{km} = \frac{y_m - y_k}{l_{km}}.$$

Усилия в стержнях фермы устанавливаются методом вырезания узлов.

Деформация стержней фермы [5, 6]:

$$\varepsilon_{km} = \frac{(U_m - U_k)(x_m - x_k) + (V_m - V_k)(y_m - y_k)}{l_{km}^2}. \quad (3)$$

Найдем расчетные значения пределов прочности для материалов, используя условие $\frac{\sigma_{km}^{\pm} \varepsilon_{km}^{\pm}}{\gamma_{km}} = \text{const}$, полученное в [7] в качестве критерия оптимальности для неоднородных конструкций. Будем считать, что каждый стержень находится в упругом состоянии, т.е.:

$$\sigma_{km} = E_{km} \varepsilon_{km}, \quad \sigma_{km}^{\pm} \geq \sigma_{0km}^{\pm}.$$

Тогда критерий оптимальности сведется к виду

$$\frac{(\sigma_{km}^{\pm})^2}{E_{km} \gamma_{km}} = \text{const} = D_0; \quad \frac{(\sigma_{km}^{\pm})^2}{E_{km} \gamma_{km}} = \frac{(\sigma_{0m}^{\pm})^2}{E_m \gamma_m}.$$

Откуда имеем

$$\sigma_{km}^{\pm} = \sigma_{0m}^{\pm} \sqrt{\frac{E_{km} \gamma_{km}}{E_m \gamma_m}}, \quad \text{где } \sigma_{0m}^{\pm} = \min(\sigma_{0km}^{\pm}). \quad (4)$$

Используя выражение (4), выразим расчетные характеристики материалов сосны, ясеня, чугуна и стали соответственно:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \sigma_{0m} \sqrt{\frac{E_c \gamma_c}{E_m \gamma_m}}, & \sigma_{я} &= \sigma_{0m} \sqrt{\frac{E_{я} \gamma_{я}}{E_m \gamma_m}}, \\ \sigma_{ч} &= \sigma_{0m} \sqrt{\frac{E_{ч} \gamma_{ч}}{E_m \gamma_m}}, & \sigma_{ст} &= \sigma_{0m} \sqrt{\frac{E_{ст} \gamma_{ст}}{E_m \gamma_m}}. \end{aligned}$$

Разделим материалы, указанные в табл. 1, на две группы: первая — сосна и ясень, вторая — сталь и чугун. Найдем расчетные значения пределов прочности для первой группы материалов:

$$\sigma_{0m}^- = \min(\sigma_{0km}^-) = \sigma_{0c}^- = 267 \text{ кгс/см}^2; \quad E_m = E_{0c}^- = 1,067 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\sigma_{0m}^+ = \min(\sigma_{0km}^+) = \sigma_{0c}^+ = 875 \text{ кгс/см}^2; \quad E_m = E_{0c}^+ = 1,245 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\gamma_m = \gamma_{0c} = 500 \text{ кг/м}^3.$$

Определим расчетные пределы текучести для ясеня:

$$\sigma_{я}^- = \sigma_{0c}^- \sqrt{\frac{E_{я} \gamma_{я}}{E_{0c}^- \gamma_c}}; \quad \sigma_{я}^- = 319 \text{ кгс/см}^2; \quad \sigma_{я}^+ = \sigma_{0c}^+ \sqrt{\frac{E_{я} \gamma_{я}}{E_{0c}^+ \gamma_c}};$$

$$\sigma_{я}^+ = 1086,5 \text{ кгс/см}^2.$$

Аналогично вычислим расчетные значения пределов прочности материалов второй группы. Расчетные значения пределов прочности для первой и второй группы материалов приведены в табл. 2, 3 соответственно.

Таблица 2. Расчетные пределы текучести первой группы материалов, кгс/см²

Материал	Расчетные значения	Сосна		Ясень	
		сжатие	растяжение	сжатие	растяжение
$\sigma_{1,1}$	$\sigma_{0m}^- = \min(\sigma_{0km}^-);$ $\sigma_{0c}^- = 267 \text{ кгс / см}^2$	267	—	319	—
	$\sigma_{0m}^+ = \min(\sigma_{0km}^+);$ $\sigma_{0c}^+ = 875 \text{ кгс / см}^2$	—	875	—	1086,5
$\sigma_{1,2}$	$\sigma_{0m} = \min(\sigma_{0km});$ $\sigma_{0c} = 267 \text{ кгс / см}^2$	267	288,4	319	358,1

Таблица 3. Расчетные пределы текучести второй группы материалов, кгс/см²

Материал	Расчетные значения	Сталь		Чугун серый	
		сжатие	растяжение	сжатие	растяжение
$\sigma_{1,3}$	$\sigma_{0m}^- = \min(\sigma_{0km}^-);$ $\sigma_{0ct}^- = 2450 \text{ кгс / см}^2$	2450	—	1814,8	—
	$\sigma_{0m}^+ = \min(\sigma_{0km}^+);$ $\sigma_{0ч}^+ = 1700 \text{ кгс / см}^2$	—	2425,1	—	1700
$\sigma_{1,4}$	$\sigma_{0m} = \min(\sigma_{0km});$ $\sigma_{0ч} = 1700 \text{ кгс / см}^2$	2425,1	2425,1	1796,3	1700

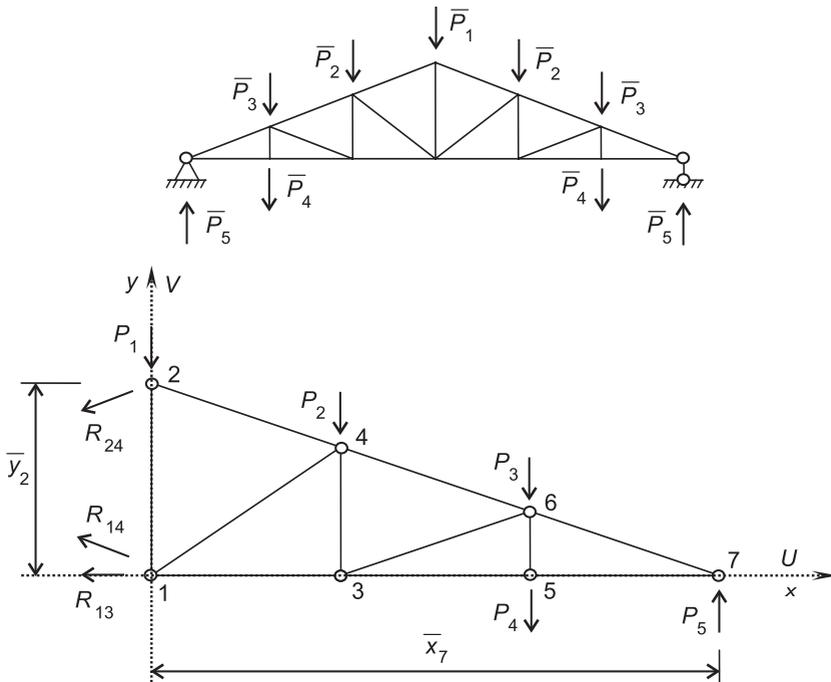


Рис. 3. Расчетная схема. Пример 1

Пример 1. Рассмотрим ферменную конструкцию (рис. 3).
Выражения для определения усилий в стержнях фермы:

$$N_{12} = \frac{N_{24}\gamma_{24} + R_{24}\gamma_{R24} - P_1}{\gamma_{12}};$$

$$N_{13} = \frac{-N_{35}(\beta_{35}\gamma_{34} - \beta_{34}\gamma_{35}) - N_{36}(\beta_{36}\gamma_{34} - \beta_{34}\gamma_{36})}{(\beta_{34}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{34})};$$

$$N_{14} = \frac{N_{34}(\beta_{34}\gamma_{24} - \beta_{24}\gamma_{34}) - N_{46}(\beta_{46}\gamma_{24} - \beta_{24}\gamma_{46}) - P_2\beta_{24}}{(\beta_{24}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{24})};$$

$$N_{24} = -\frac{N_{34}(\beta_{34}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{34})}{(\beta_{24}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{24})} + \frac{N_{46}(\beta_{46}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{46})}{(\beta_{24}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{24})} + \frac{P_2\beta_{14}}{(\beta_{24}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{24})};$$

$$N_{34} = -\frac{N_{35}(\beta_{35}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{35})}{(\beta_{34}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{34})} - \frac{N_{36}(\beta_{36}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{36})}{(\beta_{34}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{34})};$$

$$N_{35} = -\frac{N_{57}(\beta_{57}\gamma_{56} - \beta_{56}\gamma_{57})}{(\beta_{56}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{56})} - \frac{P_4(\beta_{P4}\gamma_{56} - \beta_{56}\gamma_{P4})}{(\beta_{56}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{56})};$$

$$N_{36} = \frac{N_{56}(\beta_{56}\gamma_{46} - \beta_{46}\gamma_{56}) - N_{67}(\beta_{67}\gamma_{46} - \beta_{46}\gamma_{67}) - P_3\beta_{46}}{(\beta_{46}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{46})};$$

$$N_{46} = -\frac{N_{56}(\beta_{56}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{56})}{(\beta_{46}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{46})} + \frac{N_{67}(\beta_{67}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{67})}{(\beta_{46}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{46})} + \frac{P_3\beta_{36}}{(\beta_{46}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{46})};$$

$$N_{56} = \frac{-N_{57}(\beta_{57}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{57}) - P_4(\beta_{P4}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{P4})}{(\beta_{56}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{56})};$$

$$N_{57} = \frac{P_5\beta_{67}}{(\beta_{67}\gamma_{57} - \beta_{57}\gamma_{67})}; \quad N_{67} = -\frac{P_5\beta_{57}}{(\beta_{67}\gamma_{57} - \beta_{57}\gamma_{67})}.$$

Для определения узловых перемещений запишем деформации стержней фермы, используя выражение (3), и получим систему линейных уравнений, число которых равно количеству стержней фермы. По условиям закрепления узлы 1, 2 и 7 ограничены в смещениях: $\bar{U}_1 = 0$; $\bar{U}_2 = 0$; $\bar{V}_7 = 0$.

Решая полученную систему уравнений, узнаем горизонтальные и вертикальные перемещения узлов U_i, V_i .

Исходные данные: длина фермы $l = 9$ м; высота $H = 0,25l$;
узловые нагрузки, т: $P_1 = 8, P_2 = 8, P_3 = 8, P_4 = 10, P_5 = 30, x_0 = l$;

координаты фермы: узел 1 (0; 0), узел 2 (0; H), узел 3 ($1/3l$; 0), узел 4 ($1/3l$; $2/3H$), узел 5 ($2/3l$; 0), узел 6 ($2/3l$; $1/3H$), узел 7 (l ; 0).

За эталонную конструкцию примем стальную ферму, площадь стержней которой одинакова и подобрана по наиболее нагруженному стержню. Вес эталонной фермы равен $V_0 = 1158,2$ кг, площадь стержней $\bar{A}_0 = 50,5$ см².

Фермы разделены на два вида: первый вид — с фиксированной, второй — с изменяемой топологией. В проектируемых фермах с изменяемой топологией перемещался узел 3 в пределах

$$x_3 \in \left(\frac{1}{12}l; \frac{7}{12}l \right), \quad y_3 \in \left(-\frac{1}{30}l; \frac{1}{30}l \right).$$

Для расчетов ферм с фиксированной топологией выбраны следующие комбинации материалов:

- v_1 — все стержни стальные;
- v_2 — все стержни из сосны;
- v_3 — все стержни из ясеня;
- v_4 — растянутые стержни — сталь, сжатые — чугун;
- v_5 — растянутые стержни — сталь, сжатые — сосна;
- v_6 — растянутые стержни — ясень, сжатые — сосна.

Для ферм с изменяемой топологией:

- v_7 — все стержни стальные;
- v_8 — все из сосны;
- v_9 — растянутые стержни — сталь, сжатые — чугун.

Для ферм с фиксированной топологией выполнен расчет на основе значений пределов прочности, полученных с использованием критерия оптимальности (4), приведенных в табл. 2 и 3:

- $v_{1,1}, v_{1,2}$ — растянутые стержни — ясень, сжатые — сосна;
- $v_{1,3}, v_{1,4}$ — растянутые — сталь, сжатые — чугун.

Таблица 4. Усилия в стержнях и длины стержней фермы. Пример 1

Стержень	$v_{1, \dots, v_6}, v_{1,1}, \dots, v_{1,4}$		v_7		v_8		v_9	
	N_{km}, τ	l_{km}	N_{km}, τ	l_{km}	N_{km}, τ	l_{km}	N_{km}, τ	l_{km}
1-2	22,7	0,250	22,67	0,25	22,67	0,25	22,67	0,25
1-3	84,0	0,333	76,39	0,528	77,71	0,514	78,35	0,495
1-4	-25,3	0,373	-16,73	0,373	-18,24	0,373	-18,97	0,373
2-4	-63,2	0,344	-63,22	0,344	-63,22	0,344	-63,22	0,344
3-4	9,0	0,167	6,08	0,274	7,72	0,26	8,04	0,245
3-5	120,0	0,333	122,15	0,142	121,12	0,155	120,66	0,173
3-6	-37,1	0,344	-50,12	0,178	-44,77	0,185	-42,26	0,2
4-6	-86,6	0,344	-83,08	0,344	-85,55	0,344	-86,17	0,344
5-6	10,0	0,083	32,84	0,083	26,44	0,083	22,57	0,083
5-7	120,0	0,333	120	0,333	120	0,333	120	0,333
6-7	-123,7	0,344	-123,69	0,344	-123,7	0,344	-123,7	0,344

Таблица 5. Перемещения узлов фермы. Пример 1

Комбинация	Узел						
	1	2	3	4	5	6	7
1	3	4	5	6	7	8	9
ϑ_0	0	0	$2,641 \cdot 10^{-4}$	$-1,829 \cdot 10^{-4}$	$6,414 \cdot 10^{-4}$	$-1,678 \cdot 10^{-4}$	$1,019 \cdot 10^{-3}$
	$-7,783 \cdot 10^{-3}$	$-7,729 \cdot 10^{-3}$	$-7,630 \cdot 10^{-3}$	$-7,616 \cdot 10^{-3}$	$-6,406 \cdot 10^{-3}$	$-6,398 \cdot 10^{-3}$	0
ϑ_1	0	0	$3,89 \cdot 10^{-4}$	$-4,86 \cdot 10^{-4}$	$7,78 \cdot 10^{-4}$	$-4,86 \cdot 10^{-4}$	$1,167 \cdot 10^{-3}$
	$-9,92 \cdot 10^{-3}$	$-9,63 \cdot 10^{-3}$	$-10,1 \cdot 10^{-3}$	$-9,92 \cdot 10^{-3}$	$-8,36 \cdot 10^{-3}$	$-8,26 \cdot 10^{-3}$	0
ϑ_2	0	0	$2,418 \cdot 10^{-3}$	$-1,233 \cdot 10^{-3}$	$4,835 \cdot 10^{-3}$	$-4,375 \cdot 10^{-4}$	$7,253 \cdot 10^{-3}$
	$-41,37 \cdot 10^{-3}$	$-39,56 \cdot 10^{-3}$	$-42,18 \cdot 10^{-3}$	$-40,97 \cdot 10^{-3}$	$-34,88 \cdot 10^{-3}$	$-34,26 \cdot 10^{-3}$	0
ϑ_3	0	0	$3,040 \cdot 10^{-3}$	$-1,565 \cdot 10^{-3}$	$6,079 \cdot 10^{-3}$	$-5,720 \cdot 10^{-4}$	$9,119 \cdot 10^{-3}$
	$-52,19 \cdot 10^{-3}$	$-49,91 \cdot 10^{-3}$	$-53,21 \cdot 10^{-3}$	$-51,69 \cdot 10^{-3}$	$-44,00 \cdot 10^{-3}$	$-43,24 \cdot 10^{-3}$	0
ϑ_4	0	0	$3,889 \cdot 10^{-4}$	$-8,073 \cdot 10^{-4}$	$7,778 \cdot 10^{-4}$	$-9,500 \cdot 10^{-4}$	$1,167 \cdot 10^{-3}$
	$-13,56 \cdot 10^{-3}$	$-13,27 \cdot 10^{-3}$	$-13,82 \cdot 10^{-3}$	$-13,63 \cdot 10^{-3}$	$-11,43 \cdot 10^{-3}$	$-11,33 \cdot 10^{-3}$	0
ϑ_5	0	0	$3,889 \cdot 10^{-4}$	$-9,791 \cdot 10^{-4}$	$7,778 \cdot 10^{-4}$	$-1,198 \cdot 10^{-3}$	$1,167 \cdot 10^{-3}$
	$-15,50 \cdot 10^{-3}$	$15,21 \cdot 10^{-3}$	$-15,81 \cdot 10^{-3}$	$-15,61 \cdot 10^{-3}$	$-13,07 \cdot 10^{-3}$	$-12,98 \cdot 10^{-3}$	0
ϑ_6	0	0	$3,04 \cdot 10^{-3}$	$-1,310 \cdot 10^{-3}$	$6,079 \cdot 10^{-3}$	$-2,042 \cdot 10^{-4}$	$9,119 \cdot 10^{-3}$
	$-49,30 \cdot 10^{-3}$	$-47,02 \cdot 10^{-3}$	$-50,27 \cdot 10^{-3}$	$-48,75 \cdot 10^{-3}$	$-41,57 \cdot 10^{-3}$	$-40,81 \cdot 10^{-3}$	0
ϑ_7	0	0	$6,510 \cdot 10^{-4}$	$-4,861 \cdot 10^{-4}$	$6,338 \cdot 10^{-4}$	$-4,587 \cdot 10^{-4}$	$1,023 \cdot 10^{-3}$
	$-9,341 \cdot 10^{-3}$	$-9,049 \cdot 10^{-3}$	$-8,654 \cdot 10^{-3}$	$-9,341 \cdot 10^{-3}$	$-7,676 \cdot 10^{-3}$	$-7,578 \cdot 10^{-3}$	0
ϑ_8	0	0	$3,838 \cdot 10^{-3}$	$-1,233 \cdot 10^{-3}$	$4,342 \cdot 10^{-3}$	$-2,513 \cdot 10^{-4}$	$6,760 \cdot 10^{-3}$
	$-3,940 \cdot 10^{-2}$	$-3,758 \cdot 10^{-2}$	$-3,675 \cdot 10^{-2}$	$-3,900 \cdot 10^{-2}$	$-3,216 \cdot 10^{-2}$	$-3,156 \cdot 10^{-2}$	0
ϑ_9	0	0	$6,066 \cdot 10^{-4}$	$-8,073 \cdot 10^{-4}$	$6,389 \cdot 10^{-4}$	$-8,787 \cdot 10^{-4}$	$1,028 \cdot 10^{-3}$
	$-1,300 \cdot 10^{-2}$	$-1,271 \cdot 10^{-2}$	$-1,222 \cdot 10^{-2}$	$-1,307 \cdot 10^{-2}$	$-1,059 \cdot 10^{-2}$	$-1,049 \cdot 10^{-2}$	0

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\vartheta_{1,1}$	V_i	0	0	$2,586 \cdot 10^{-3}$	$-1,254 \cdot 10^{-3}$	$5,172 \cdot 10^{-3}$	$-3,743 \cdot 10^{-4}$	$7,758 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-4,352 \cdot 10^{-2}$	$-4,158 \cdot 10^{-2}$	$-4,437 \cdot 10^{-2}$	$-4,308 \cdot 10^{-2}$	$-3,669 \cdot 10^{-2}$	$-3,605 \cdot 10^{-2}$	0
$\vartheta_{1,2}$	V_i	0	0	$7,910 \cdot 10^{-4}$	$-1,029 \cdot 10^{-3}$	$1,582 \cdot 10^{-3}$	$-1,047 \cdot 10^{-3}$	$2,373 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-2,063 \cdot 10^{-2}$	$-2,004 \cdot 10^{-2}$	$-2,104 \cdot 10^{-2}$	$-2,064 \cdot 10^{-2}$	$-1,739 \cdot 10^{-2}$	$-1,720 \cdot 10^{-2}$	0
$\vartheta_{1,3}$	V_i	0	0	$3,849 \cdot 10^{-4}$	$-5,374 \cdot 10^{-4}$	$7,698 \cdot 10^{-4}$	$-5,624 \cdot 10^{-4}$	$1,155 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-1,045 \cdot 10^{-2}$	$-1,016 \cdot 10^{-2}$	$-1,066 \cdot 10^{-2}$	$-1,047 \cdot 10^{-2}$	$-8,813 \cdot 10^{-3}$	$-8,717 \cdot 10^{-3}$	0
$\vartheta_{1,4}$	V_i	0	0	$3,849 \cdot 10^{-4}$	$-5,315 \cdot 10^{-4}$	$7,698 \cdot 10^{-4}$	$-5,538 \cdot 10^{-4}$	$1,155 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-1,039 \cdot 10^{-2}$	$-1,010 \cdot 10^{-2}$	$-1,059 \cdot 10^{-2}$	$-1,040 \cdot 10^{-2}$	$-8,756 \cdot 10^{-3}$	$-8,660 \cdot 10^{-3}$	0

Таким образом, рассматривается тринадцать вариантов проектируемых ферм.

Безразмерный вес проектируемых конструкций будем искать в виде:

$$\vartheta_j = \frac{B_j}{B_0} = \sum l_{km} A_{km} \rho_{km}, \quad (5)$$

где j — номер варианта проектируемой фермы.

В результате расчетов получены следующие безразмерные веса проектируемых ферм: $\vartheta_1 = 0,58$, $\vartheta_2 = 0,2206$, $\vartheta_3 = 0,2276$, $\vartheta_4 = 0,54$, $\vartheta_5 = 0,458$, $\vartheta_6 = 0,219$, $\vartheta_7 = 0,537$, $\vartheta_8 = 0,2064$, $\vartheta_9 = 0,5074$, $\vartheta_{1,1} = 0,2263$, $\vartheta_{1,2} = 0,3427$, $\vartheta_{1,3} = 0,645$, $\vartheta_{1,4} = 0,6486$ (табл. 4, 5).

В фермах с изменяемой топологией координаты узла 3 находились из условия достижения минимума функции безразмерного веса (5):

$$\frac{d}{dx_3} \vartheta_j(x_3, y_3) = 0;$$

$$\frac{d}{dy_3} \vartheta_j(x_3, y_3) = 0.$$

Координаты узла A_3 для комбинации материалов:

$$\vartheta_7 - x_3 = 0,5269, \quad y_3 = -0,0266 \quad \text{при} \quad \vartheta_7 = 0,537;$$

$$\vartheta_8 - x_3 = 0,5134, \quad y_3 = -0,021 \quad \text{при} \quad \vartheta_8 = 0,206;$$

$$\vartheta_9 - x_3 = 0,4948, \quad y_3 = -0,018 \quad \text{при} \quad \vartheta_9 = 0,507.$$

Пример 2. Рассмотрим ферму, изображенную на рис. 4, эталонная конструкция и варианты комбинаций материалов стержней фермы аналогичны выбранным в примере 1.

Исходные данные: длина фермы $l = 9$ м; высота $H = 0,25l$;

узловые нагрузки, т: $P_1 = 8$, $P_2 = 8$, $P_3 = 8$, $P_4 = 4$, $P_5 = 0,5$, $P_6 = 24$;

координаты: узел 1 (0; 0,1 H), узел 2 (0; H), узел 3 ($1/3l$; 0,1 H), узел 4 ($1/3l$; 0,9 H), узел 5 ($2/3l$; 0,8 H), узел 6 (l ; 0), узел 7 (l ; 0,7 H).

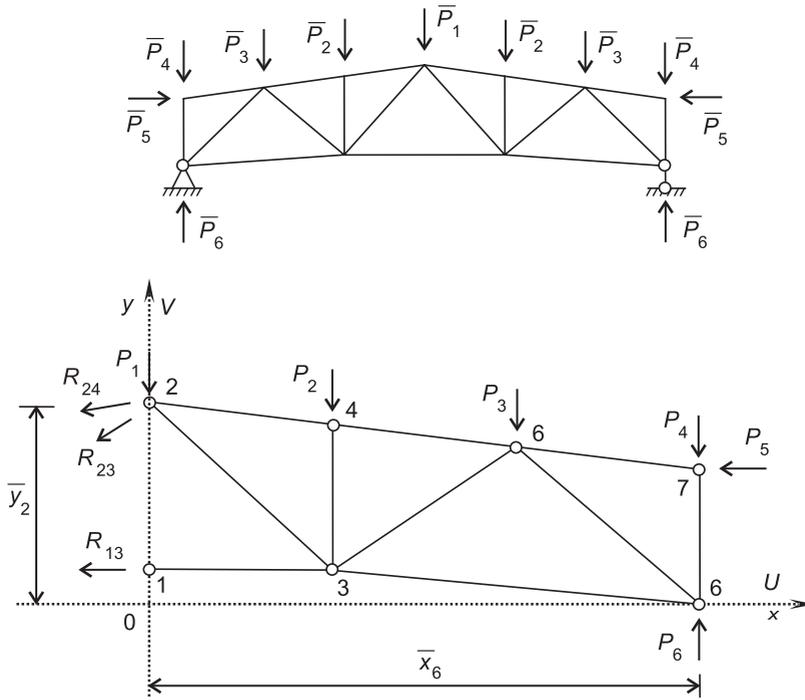


Рис. 4. Расчетная схема. Пример 2

Усилия в стержнях фермы:

$$N_{13} = \frac{-N_{34}(\beta_{34}\gamma_{23} - \beta_{23}\gamma_{34}) - N_{35}(\beta_{35}\gamma_{23} - \beta_{23}\gamma_{35}) - N_{36}(\beta_{36}\gamma_{23} - \beta_{23}\gamma_{36})}{(\beta_{23}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{23})};$$

$$N_{23} = \frac{N_{34}(\beta_{34}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{34}) + N_{35}(\beta_{35}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{35}) + N_{36}(\beta_{36}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{36})}{\beta_{23}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{23}};$$

$$N_{24} = \frac{-N_{45}(\beta_{45}\gamma_{34} - \beta_{34}\gamma_{45}) - P_2\beta_{34}}{\beta_{34}\gamma_{24} - \beta_{24}\gamma_{34}};$$

$$N_{34} = \frac{N_{45}(\beta_{45}\gamma_{24} - \beta_{24}\gamma_{45}) + P_2\beta_{24}}{\beta_{34}\gamma_{24} - \beta_{24}\gamma_{34}};$$

$$N_{35} = \frac{-N_{56}(\beta_{56}\gamma_{45} - \beta_{45}\gamma_{56}) - N_{57}(\beta_{57}\gamma_{45} - \beta_{45}\gamma_{57}) - P_3\beta_{45}}{\beta_{45}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{45}};$$

$$N_{36} = \frac{-N_{67}(\beta_{67}\gamma_{56} - \beta_{56}\gamma_{67}) + P_6\beta_{56}}{\beta_{56}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{56}};$$

$$N_{45} = \frac{N_{56}(\beta_{56}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{56}) + N_{57}(\beta_{57}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{57}) + P_3\beta_{35}}{\beta_{45}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{45}};$$

$$N_{56} = \frac{N_{67}(\beta_{67}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{67}) - P_6\beta_{36}}{\beta_{56}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{56}};$$

$$N_{57} = \frac{P_5 \gamma_{67} - P_4 \beta_{67}}{\beta_{67} \gamma_{57} - \beta_{57} \gamma_{67}};$$

$$N_{67} = \frac{P_4 \beta_{57} - P_5 \gamma_{57}}{\beta_{67} \gamma_{57} - \beta_{57} \gamma_{67}}.$$

За эталонную конструкцию примем стальную ферму, площадь стержней которой одинакова и подобрана по наиболее нагруженному стержню. Вес эталонной фермы $B_0 = 0,551$ т, площадь стержней $A_0 = 21,98$ см².

В результате расчетов получены следующие безразмерные веса проектируемых ферм: $\vartheta_1 = 0,5422$, $\vartheta_2 = 0,1476$, $\vartheta_3 = 0,1513$, $\vartheta_4 = 0,428$, $\vartheta_5 = 0,3652$, $\vartheta_6 = 0,1482$, $\vartheta_7 = 0,3317$, $\vartheta_8 = 0,1464$, $\vartheta_9 = 0,3205$, $\vartheta_{1,1} = 0,2178$, $\vartheta_{1,2} = 0,3212$, $\vartheta_{1,3} = 0,608$, $\vartheta_{1,4} = 0,6116$ (табл. 6, 7).

В данном примере в фермах с изменяемой топологией узел 3 перемещался по горизонтали и вертикали, а узел 1 только по вертикали в пределах

$$x_3 \in \left(\frac{1}{6}l; \frac{2}{3}l \right), \quad y_3 \in \left(-\frac{1}{30}l; \frac{1}{30}l \right), \quad y_1 \in \left(-\frac{1}{30}l; \frac{1}{30}l \right).$$

Координаты узла 1, 3 для комбинации материалов:

$$\vartheta_7 \text{ — } x_3 = 0,2108, \quad y_1 = y_3 = -0,2 \text{ при } \vartheta_7 = 0,3317;$$

$$\vartheta_8 \text{ — } x_3 = 0,3424, \quad y_1 = y_3 = -0,110 \text{ при } \vartheta_8 = 0,1464;$$

$$\vartheta_9 \text{ — } x_3 = 0,6031, \quad y_1 = y_3 = -0,1229 \text{ при } \vartheta_9 = 0,3205.$$

Расчеты показывают, что при правильном комбинировании материалов в ферменных конструкциях и учете реальных особенностей их деформирования при заданном уровне нагружения можно разрабатывать проекты с существенным улучшением качественных характеристик по весу конструкционных материалов. А именно, снижение веса составляет от 42 до 57 % для ферм, стержни которых изготовлены из металла, и

Таблица 6. Усилия в стержнях и длины стержней фермы. Пример 2

Стержень	$\vartheta_1, \dots, \vartheta_6, \vartheta_{1,1}, \dots, \vartheta_{1,4}$		ϑ_7		ϑ_8		ϑ_9	
	$N_{km}, \text{ т}$	l_{km}	$N_{km}, \text{ т}$	l_{km}	$N_{km}, \text{ т}$	l_{km}	$N_{km}, \text{ т}$	l_{km}
1-3	53,17	0,3333	26,58	0,2108	33,23	0,3424	32,08	0,6031
2-3	0,05	0,4022	-2,25	0,4969	-2,19	0,4968	-3,37	0,7091
2-4	-53,86	0,3343	-26,2	0,3343	-32,31	0,3343	-29,8	0,3343
3-4	-8	0,2	-8,15	0,4423	-8,02	0,3351	-10,75	0,4402
3-5	20,01	0,3765	5,98	0,6065	7,59	0,4486	3,54	0,3291
3-6	35,51	0,6671	24,13	0,8141	26,38	0,6667	22,97	0,4155
4-5	-53,86	0,3343	-28,46	0,3343	-32,1	0,3343	-23,19	0,3343
5-6	-41,39	0,3887	-27,28	0,3887	-30,34	0,3887	-25,59	0,3887
5-7	-0,5	0,3343	-0,5	0,3343	-0,5	0,3343	-0,5	0,3343
6-7	-4,04	0,175	-4,04	0,175	-4,04	0,175	-4,04	0,175

Таблица 7. Перемещения узлов фермы. Пример 2

Комбинация	Узел						
	1	2	3	4	5	6	7
θ_0	V_i	0	$3,839 \cdot 10^{-4}$	$-3,511 \cdot 10^{-4}$	$5,761 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$-3,193 \cdot 10^{-4}$
	U_i	$-5,667 \cdot 10^{-3}$	$-6,235 \cdot 10^{-3}$	$-5,667 \cdot 10^{-3}$	$-5,702 \cdot 10^{-3}$	$-3,487 \cdot 10^{-3}$	0
θ_1	V_i	0	$3,889 \cdot 10^{-4}$	$-4,283 \cdot 10^{-4}$	$-4,283 \cdot 10^{-4}$	$1,433 \cdot 10^{-3}$	$-6,783 \cdot 10^{-4}$
	U_i	$-7,066 \cdot 10^{-3}$	$-6,803 \cdot 10^{-3}$	$-7,066 \cdot 10^{-3}$	$-7,299 \cdot 10^{-3}$	$-4,254 \cdot 10^{-3}$	0
θ_2	V_i	0	$3,066 \cdot 10^{-3}$	$-1,864 \cdot 10^{-3}$	$-1,864 \cdot 10^{-3}$	$10,80 \cdot 10^{-3}$	$-1,933 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-4,258 \cdot 10^{-2}$	$-4,051 \cdot 10^{-2}$	$-4,258 \cdot 10^{-2}$	$-4,356 \cdot 10^{-2}$	$-2,524 \cdot 10^{-2}$	0
θ_3	V_i	0	$3,464 \cdot 10^{-3}$	$-2,571 \cdot 10^{-3}$	$-2,571 \cdot 10^{-3}$	$1,236 \cdot 10^{-2}$	$-3,233 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-5,213 \cdot 10^{-2}$	$-4,979 \cdot 10^{-2}$	$-5,213 \cdot 10^{-2}$	$-5,35 \cdot 10^{-2}$	$-3,106 \cdot 10^{-2}$	0
θ_4	V_i	0	$3,889 \cdot 10^{-4}$	$-1,438 \cdot 10^{-3}$	$-1,438 \cdot 10^{-3}$	$1,762 \cdot 10^{-3}$	$-2,959 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-1,584 \cdot 10^{-2}$	$-1,557 \cdot 10^{-2}$	$-1,584 \cdot 10^{-2}$	$-1,665 \cdot 10^{-2}$	$-9,802 \cdot 10^{-3}$	0
θ_5	V_i	0	$3,889 \cdot 10^{-4}$	$-1,729 \cdot 10^{-3}$	$-1,729 \cdot 10^{-3}$	$1,856 \cdot 10^{-3}$	$-3,615 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-1,836 \cdot 10^{-2}$	$-1,809 \cdot 10^{-2}$	$-1,836 \cdot 10^{-2}$	$-1,933 \cdot 10^{-2}$	$-1,14 \cdot 10^{-2}$	0
θ_6	V_i	0	$3,464 \cdot 10^{-3}$	$-1,884 \cdot 10^{-3}$	$-1,884 \cdot 10^{-3}$	$1,213 \cdot 10^{-2}$	$-1,684 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-4,617 \cdot 10^{-2}$	$-4,384 \cdot 10^{-2}$	$-4,617 \cdot 10^{-2}$	$-4,715 \cdot 10^{-2}$	$-2,729 \cdot 10^{-2}$	0
θ_7	V_i	0	$2,459 \cdot 10^{-4}$	$-3,616 \cdot 10^{-4}$	$-3,616 \cdot 10^{-4}$	$1,762 \cdot 10^{-4}$	$-8,213 \cdot 10^{-4}$
	U_i	$-4,142 \cdot 10^{-3}$	$-4,897 \cdot 10^{-3}$	$-4,142 \cdot 10^{-3}$	$-4,504 \cdot 10^{-3}$	$-2,133 \cdot 10^{-3}$	0
θ_8	V_i	0	$2,483 \cdot 10^{-3}$	$-5,957 \cdot 10^{-4}$	$-5,957 \cdot 10^{-4}$	$4,308 \cdot 10^{-3}$	$-8,432 \cdot 10^{-4}$
	U_i	$-1,840 \cdot 10^{-2}$	$-2,246 \cdot 10^{-2}$	$-1,840 \cdot 10^{-2}$	$-1,932 \cdot 10^{-2}$	$-1,031 \cdot 10^{-2}$	0
θ_9	V_i	0	$7,036 \cdot 10^{-4}$	$-5,454 \cdot 10^{-4}$	$-5,454 \cdot 10^{-4}$	$-6,64 \cdot 10^{-6}$	$-1,476 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-3,933 \cdot 10^{-3}$	$-7,799 \cdot 10^{-3}$	$-3,933 \cdot 10^{-3}$	$-6,028 \cdot 10^{-3}$	$-3,204 \cdot 10^{-3}$	0
$\theta_{1,1}$	V_i	0	$2,586 \cdot 10^{-3}$	$-9,999 \cdot 10^{-4}$	$-9,999 \cdot 10^{-4}$	$8,926 \cdot 10^{-3}$	$-3,383 \cdot 10^{-4}$
	U_i	$-3,094 \cdot 10^{-2}$	$-2,920 \cdot 10^{-2}$	$-3,094 \cdot 10^{-2}$	$-3,144 \cdot 10^{-2}$	$-1,814 \cdot 10^{-2}$	0
$\theta_{1,2}$	V_i	0	$7,910 \cdot 10^{-4}$	$-9,091 \cdot 10^{-4}$	$-9,091 \cdot 10^{-4}$	$2,926 \cdot 10^{-3}$	$-1,465 \cdot 10^{-3}$
	U_i	$-1,470 \cdot 10^{-2}$	$-1,417 \cdot 10^{-2}$	$-1,470 \cdot 10^{-2}$	$-1,521 \cdot 10^{-2}$	$-8,862 \cdot 10^{-3}$	0
$\theta_{1,3}$	V_i	0	$3,849 \cdot 10^{-4}$	$-4,764 \cdot 10^{-4}$	$-4,764 \cdot 10^{-4}$	$1,435 \cdot 10^{-3}$	$-7,900 \cdot 10^{-4}$
	U_i	$-7,450 \cdot 10^{-3}$	$-7,190 \cdot 10^{-3}$	$-7,450 \cdot 10^{-3}$	$-7,711 \cdot 10^{-3}$	$-4,499 \cdot 10^{-3}$	0
$\theta_{1,4}$	V_i	0	$3,849 \cdot 10^{-4}$	$-4,709 \cdot 10^{-4}$	$-4,709 \cdot 10^{-4}$	$1,433 \cdot 10^{-3}$	$-7,774 \cdot 10^{-4}$
	U_i	$-7,401 \cdot 10^{-3}$	$-7,142 \cdot 10^{-3}$	$-7,401 \cdot 10^{-3}$	$-7,659 \cdot 10^{-3}$	$-4,469 \cdot 10^{-3}$	0

78–85 % — из дерева, по сравнению с эталонной. Расширяя номенклатуру материалов, можно получать широкий спектр эффективных проектов гибридных ферменных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, В.П. Результаты испытаний трубчатых образцов серого чугуна [Текст] / В.П. Кузнецов, В.А. Стеценко // Технология машиностроения : сб. Тул. политехн. ин-та. — Тула, 1976. — Вып. 20.
2. Белянкин, Ф.П. Деформативность и сопротивляемость древесины как упруговязкопластичного тела [Текст] / Ф.П. Белянкин. — Киев, 1957. — 150 с.
3. Леонтьев, Н.Л. Упругие деформации древесины [Текст] / Н.Л. Леонтьев. — М.; Л. : Гослесбумиздат, 1951. — 120 с.
4. Немировский, Ю.В. Расчет ребристых деревянных конструкций с учетом эффектов разномодульности и нелинейного сопротивления [Текст] / Ю.В. Немировский, Г.И. Гребенюк, А.В. Ажермачев // Роль механики в создании эффективных материалов, конструкций и машин XXI века : Тр. Всерос. науч.-техн. конф., 6–7 дек. 2006 г. — Омск, 2006. — С. 161–164.
5. Немировский, Ю.В. Синтез плоских ферменных конструкций [Текст] / Ю.В. Немировский // Проблемы оптимального проектирования конструкций: сб. докл. IV Всерос. семинара. — Новосибирск: НГАСУ, 2002. — С. 274–281.
6. Немировский, Ю.В. Рациональное и оптимальное проектирование слоистых стержневых систем [Текст] / Ю.В. Немировский, А.В. Мищенко, И.Т. Вохмянин. — Новосибирск : НГАСУ, 2004. — 484 с.
7. Nemirovskiy Ju.V. Optimum design of threelauered inhomogeneous shells and plates [Текст] / Ju.V. Nemirovsky // Proc. 6th Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology. Korus-2002. — Novosibirsk, 2002. — Vol. 2. — P. 15–19.

НЕМИРОВСКИЙ Юрий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

АЖЕРМАЧЕВ Антон Викторович, ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 16.12.14

Nemirovskiy Yuriy Vladimirovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Azhermachev Anton Victorovich, senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

SYNTHESIS OF HYBRID TRUSSES

The new approach to the calculation and synthesis of hybrid truss structures is developed on the basis of the nonlinear model of deformation and according to different resistance properties of tension-compression rods of trusses. The calculations show that with the right combination of materials of rods in the trusses and in accordance with the real characteristics of deformation for a specified level of loading can give projects with a significant improvement in quality characteristics by weight of construction materials (up to 85 %).

Key words: trusses, nonuniformity of properties, nonlinear deformations.

REFERENCES

1. Kuznetsov, V.P. The results of the test tube samples of gray cast iron [Text] / V.P. Kuznetsov, V.A. Stetsenko // Mechanical Engineering: ed. Tula Polytechnic Institute. — Tula, 1976. — Vol. 20.
 2. Belyankin, F.P. Deformability and resistance of wood as an elastic-viscous-plastic solid [Text] / F.P. Belyankin. — Kiev, 1957. — 150 p.
 3. Leontiev, N.L. Elastic deformation of wood [Text] / N.L. Leontiev. — M.; L. : Goslesbumizdat, 1951. — 120 p.
 4. Nemirovskiy, Yu.V. Calculation of ribbed wooden structures in accordance with the multimodulus effects and nonlinear resistance [Text] / Yu.V. Nemirovskiy, G.I. Grebenuk, A.V. Azhermachev // The role of mechanics in the creation of effective materials, structures and machinery of the XXI century: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, December 6–7, 2006. — Omsk, 2006. — P. 161–164.
 5. Nemirovskiy, Yu.V. Synthesis of plane truss structures [Text] / Yu.V. Nemirovskiy // Problems of optimal design of structures: Coll. the IV All-Russian seminar. — Novosibirsk: NSUACE, 2002. — P. 274–281.
 6. Nemirovskiy, Yu.V. Rational and optimal design of layered beam systems [Text] / Yu.V. Nemirovskiy, A.V. Mishchenko, I.T. Vokhmyanin. — Novosibirsk: NSUACE, 2004. — 484 p.
 7. Nemirovskiy, Yu.V. Optimum design of three-layered inhomogeneous shells and plates [Text] / Yu.V. Nemirovskiy // Proc. 6th Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology. Korus-2002. — Novosibirsk, 2002. — Vol. 2. — P. 15–19.
-

ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

УДК 624.042.41

С.Д. САЛЕНКО, Ю.А. ГОСТЕЕВ

К ОЦЕНКЕ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СООРУЖЕНИЯ*

Проведен критический обзор отечественных нормативных положений по оценке ветровых воздействий на сооружения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ветровые воздействия на сооружения, пролетные строения мостов.

Строительство высотных зданий, современных мостов с длинными пролетами требует особого внимания к ветровым нагрузкам и аэроупругим колебаниям конструкции. Негативными примерами из практики мостостроения могут служить колебания пролетного строения в Барнауле в 1993 г. [1], разрушение авангардной части строения на стадии надвигки под Витебском в 2006 г.¹, инцидент с колебаниями пролетного строения моста в Волгограде в 2010 г.²

Новая редакция национального стандарта «Надежность строительных конструкций и оснований»³ отмечает необходимость учета не только ветровых нагрузок, но и аэроупругих эффектов при взаимодействии ветра с гибкими сооружениями. Значительно больше внимания уделено ветровым нагрузкам в актуализированных редакциях СНиП «Нагрузки и воздействия»⁴ и «Мосты и трубы»⁵. Вопрос освещается также в региональных нормах⁶, в рекомендациях [2], в разработанных авторами статьи отраслевых рекомендациях⁷. Из зарубежных нормативных документов по теме упомянем⁸.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-07-00421).

¹ В Республике Беларусь рухнул строящийся мост [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.bridgeart.ru/index.php?topic=238.0> (дата обращения: 20.01.2015).

² Волгоградский мост [Электронный ресурс]. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/%C2%EE%EB%E3%EE%E3%F0%E0%E4%F1%EA%E8%E9_%EC%EE%F1%F2 (дата обращения: 20.01.2015).

³ ГОСТ Р 54257–2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.

⁴ СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия. М.: Госстрой СССР, 1986. 32 с. (актуализированная редакция в виде СП 20.13330.2011).

⁵ СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы. М.: ГП ЦПП, 1996. 214 с. (актуализированная редакция в виде СП 35.13330.2011).

⁶ Проектирование городских мостовых сооружений. МГСН 5.02-99. Приняты и введены в действие постановлением Правительства Москвы от 7 сентября 1999 г. № 848.

⁷ ОДМ 218.2.040–2014. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке аэродинамических характеристик сечений пролетных строений мостов. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). М.: Информавтодор, 2014. URL: <http://217.106.232.135/BiblText%5СП%5С4617.doc>.

⁸ Eurocode 1: Actions on structures. P. 1–4: General actions. Wind actions. EN 1991-1-4:2005 / European Standard. Brussels, 2005.

© Саленко С.Д., Гостеев Ю.А., 2015

Взаимодействию конструкции с ветровым потоком посвящено большое число работ, отметим, в частности, [3]. Аэродинамические характеристики плохообтекаемых тел, к которым относятся многие наземные сооружения, приводятся в изданиях справочного типа [4, 5].

Инженерные методики по оценке ветровых воздействий на сооружения должны опираться на научно обоснованные и в должной мере обобщенные результаты, полученные в результате аэродинамических исследований, либо численных расчетов. Рассмотрим с этой точки зрения положения отечественных стандартов.

К федеральным нормам, регламентирующим расчет сооружений на ветровую нагрузку, относятся СНиП 2.01.07–85 «Нагрузки и воздействия»⁴, СНиП 2.05.03–84 «Мосты и трубы»⁵. Судя по актуализированным редакциям федеральных норм 2011 г., воздействию ветра на мостовые сооружения стало уделяться больше внимания. Однако имеется и ряд неясных положений и неточностей.

1. Перечислим основные из них для СНиП «Нагрузки и воздействия», содержащим переработанные правила расчета строительных конструкций на воздействие ветра (разд. 11), а также на прочие нагрузки (разд. 14):

1. Термины «*аэродинамические неустойчивые колебания*» (разд. 11, с. 17) или «*аэродинамически неустойчивые колебания*» (разд. 14, с. 31), на наш взгляд, являются неудачными, корректнее говорить «*аэроупругие колебания*».

2. В вводной части разд. 11 на с. 17 указывается, что «*резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования*» необходимо учитывать для зданий и сплошностенчатых сооружений, «*у которых $h/d > 10$* » (т.е., *высота* которых превышает «*характерный поперечный размер*» более чем в 10 раз). Соответствующие условия для колебаний типа *флаттера* и *бафтинга* не приведены. Кроме того, несколько неудачным кажется приведенное соотношение h/d . Во-первых, высота h — это тоже характерный поперечный размер, во-вторых, сооружение может быть протяженным в горизонтальном направлении (мосты, порталы), поэтому правильнее было бы использовать « *$l/b > 10$* », где l и b соответственно максимальный и минимальный характерные размеры.

3. В разд. 11, с. 17 и 14, с. 31 *дивергенция* отнесена к колебаниям, в то время как таковой не является (это статическая форма потери устойчивости).

4. В разд. 11, с. 17 при перечислении типов колебаний не упомянут *бафтинг*, а в разд. 14 на с. 31 он упомянут.

5. В подразд. 11.1.7, с. 19 «*Аэродинамический коэффициент... поперечной силы*» правильнее называть «*аэродинамический коэффициент пульсационной составляющей поперечной силы*», его значение целесообразно определять в зависимости от геометрических параметров поперечного сечения.

6. В подразд. 11.1.7, с. 19 в примечании «*необходимо указать размеры сооружения*» правильнее было бы написать «*необходимо указать характерные размеры и площади сооружения*».

7. Используемый для расчета пульсационной составляющей ветровой нагрузки коэффициент динамичности (подразд. 11.1.8, с. 21) опреде-

ляется для значений логарифмического декремента колебаний 0,15 и 0,3 (рис. 11.1), в то время как в этом же издании СНиП на с. 70 (приложение Д.2) рекомендуется принимать для металлических сооружений значение логарифмического декремента 0,05. Опытные данные по балочным мостам и данные Еврокода⁸ дают значения 0,02–0,05. Таким образом, в подразд. 11.1.8 усилия и перемещения занижаются в 3–7 раз.

8. В разд. 11.3, посвященном резонансному вихревому возбуждению, приводится значение числа Струхаля $St = 0,11$ для поперечных сечений с острыми кромками, независимо от формы сечения, относительного удлинения конструкции и других параметров. Такая оценка слишком груба и может привести к ошибке $\pm 50\%$. В выражении для критической скорости ветра отсутствует коэффициент запаса, в Еврокоде такой коэффициент имеется.

9. Данные по числу Струхаля (подразд. 11.3.3, с. 24) приведены только для одиночных поперечных сечений круглой и прямоугольной формы. Для двух и более близко расположенных сечений подобные характеристики отсутствуют.

10. В подразд. 11.3.3, с. 24 в формуле (11.12) отсутствует коэффициент запаса.

11. В приложении Д.1.1.1, с. 52, рис. Д.1 необходимо указать направление ветра.

12. В приложении Д, с. 63, рис. Д.14 и с. 63, рис. Д.17 однотипные печатки. Приведенные кривые соответствуют не разным значениям Δ/d (как на графике), а разным Δ .

13. В приложении Д на с. 64 в подзаголовке «Призматические сооружения» имеется опечатка. Вместо Г.1.13, по-видимому, подразумевается Д.1.13.

14. В приложении Д.1.13 на рис. Д.19 опечатка: в левой части оси абсцисс вместо подписей «1 2 6 7 1 2 ...» должны быть «0,1 0,2 0,6 0,7 1 2...».

15. В приложении Д.1.15, с. 68 на рис. Д.23 опечатка. Верхняя линия на графике якобы соответствует коэффициенту проницаемости ϕ , равному 1,0, а должна соответствовать 0,1.

16. Приложение Д.1.16, с. 68 «Значения коэффициента Δ ... приведены в таблице Д.11». В таблице же на с. 69 даны значения не коэффициента, а абсолютной шероховатости δ в миллиметрах, хотя указывается, что шероховатость относительная. По-видимому, следует писать: «Значения относительной шероховатости $\Delta = d/\delta$ следует определять, используя таблицу Д.11».

17. В приложении Д.2.1 на с. 70 вместо «интенсивность воздействия $F(z)$ » желательнее было бы написать «пульсационная составляющая погонной аэродинамической нагрузки $F(z)$ ». Там же, вместо « $c_{y,cr}$ — аэродинамический коэффициент поперечной силы» правильнее написать « $c_{y,cr}$ — аэродинамический коэффициент пульсационной составляющей поперечной силы».

18. В приложении Д.2.2 на с. 70 тот же коэффициент $c_{y,cr}$ обозначается уже по-другому (c_y), и опять не отмечается, что это коэффициент пульсационной составляющей поперечной силы.

19. В приложении Д.2.2, пункт б на с. 70 непонятно, почему коэффициент c_y зависит от отношения критической и максимальной скоростей. Это имело бы какой-то смысл, если бы в формуле (Д.2.1) фигурировала максимальная скорость, но там стоит критическая.

20. В приложении Д.2.2, пункт б, с. 70 непонятно, почему «при $b/d \leq 0,5$ расчет на резонансное вихревое возбуждение допускается не проводить». Существуют экспериментальные данные, показывающие очень большие амплитуды колебаний при сечениях, имеющих $b/d = 0,166...0,33$.

21. В приложении Д.2.4, с. 70 исходный текст: «Для предотвращения резонансного вихревого возбуждения могут быть использованы различные конструктивные мероприятия: установка вертикальных и спиралевидных ребер, перфорация ограждения и установка соответствующим образом настроенных гасителей колебаний» — рекомендуется отредактировать следующим образом. «Для уменьшения амплитуд аэроупругих колебаний до приемлемых значений может быть оптимизирована форма сооружения и малых конструктивных элементов, применены аэродинамические или механические гасители колебаний либо комбинация этих способов. Оптимизация формы сооружения и параметров аэродинамических гасителей должна проводиться в процессе аэродинамических испытаний модели сооружения в аэродинамической трубе. Параметры механических гасителей должны настраиваться под конкретное сооружение».

II. Сводом правил СП 35.13330.2011 устанавливается обязательность проверки на аэродинамическую устойчивость *висячих и вантовых мостов, а также стальных балочных мостов с пролетами более 100 м* (пункт 5.48, с. 16). Однако в указанных нормах также имеется некоторое количество неясных положений и неточностей. Перечислим основные из них:

1. В разд. 5.48 на с. 16 используется термин «*аэродинамическая устойчивость*», правильнее было бы «*аэроупругая устойчивость*».

2. В разд. 5.48 на с. 16 предложение «*следует проводить соответствующие исследования на моделях*» желательно конкретизировать: «*следует проводить соответствующие исследования в аэродинамических трубах на моделях пролетных строений*».

3. В разд. 6.24 на с. 48 вместо «*логарифмического декремента затухания*» следует писать «*логарифмического декремента колебаний*».

4. Рекомендуемые в разд. 6.24 на с. 48 значения логарифмического декремента колебаний 0,15 и 0,3 сильно завышены: по Еврокоду и современным научным источникам они составляют 0,02–0,05.

5. В разд. 6.24 на с. 48 указывается, что «*воздействие ветра на безрельсовые транспортные средства и трамвай... не учитывается*». Неучет воздействия ветра на транспортные средства может привести к занижению расчетных нагрузок в 2 раза; в Еврокоде, например, такой учет проводится.

6. В разд. 6.24 на с. 49 предложение «*Распределение ветровой нагрузки по длине пролета допускается принимать равномерным*» следует дополнить: «*Распределение ветровой нагрузки по длине пролета*

в проектном положении допускается принимать равномерным, а на стадии монтажа принимать в соответствии с формой местных поперечных сечений».

7. В разд. 6.24 на с. 50 указывается, что для вантовых и висячих, а также стальных балочных мостов с пролетами свыше 100 м проводится проверка *аэродинамической устойчивости* (на *флаттер*) и на *резонанс колебаний в направлении, перпендикулярном ветровому потоку*. Последний термин представляется неудачным, к тому же он отличается от термина, принятого в СП 20.13330.2011, *«резонансное вихревое возбуждение»*. Кроме того, в нормах нет указаний о проверке на *галопирование, бафтинг, дивергенцию*.

8. Значения коэффициента лобового сопротивления для пролетных строений со сплошными балками принимаются универсальными, не зависящими от угла атаки и геометрии конкретного сечения (приложение Н, с. 278, 279), что является довольно грубым приближением [6]. Так, для автодорожных строений независимо от особенностей формы и угла атаки приведено всего три значения коэффициента лобового сопротивления (без коэффициентов подъемной силы и момента).

9. В отличие от железнодорожных мостов (приложение Н, с. 278), при расчете конструкций автодорожных и городских мостов воздействие ветра на находящиеся на них транспортные средства и их влияние на аэродинамические характеристики мостов не учитываются, что занижает расчетную нагрузку на сооружения.

Таким образом, рассмотренные в статье нормативные положения нуждаются в доработке и исправлении указанных неточностей. В соответствующих разделах стандартов необходим более полный анализ аэроупругих явлений, методов оценки и предотвращения опасных аэроупругих колебаний сооружений, с учетом актуального состояния исследований в этой области. Также назрела необходимость разработки нормативной методики расчета основных типов аэроупругих колебаний. Определенные шаги в этом направлении уже делаются [2]⁷.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саленко, С.Д. Аэродинамические испытания в процессе надвигки мостов [Текст] / С.Д. Саленко, А.А. Кураев, А.Д. Обуховский и др. // Трансп. стр-во. — 1996. — № 1–2. — С. 40–41.
2. Попов, Н.А. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки [Текст] / Н.А. Попов. — М. : Госстрой России, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000. — 45 с.
3. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения [Текст] / Э. Симиу, Р. Скэнлан; пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецово; под ред. Б.Е. Маслова. — М. : Стройиздат, 1984. — 360 с.
4. Девнин, С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: справ. [Текст] / С.И. Девнин. — Л. : Судостроение, 1983. — 332 с.
5. Березин, М.А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций [Текст] / М.А. Березин, В.В. Катюшин. — Новосибирск : Олден-Полиграфия, 2003. — 130 с.
6. Гостеев, Ю.А. Влияние формы на аэродинамические характеристики балочных мостов [Текст] / Ю.А. Гостеев, А.Д. Обуховский, С.Д. Саленко // Инж.-строит. журн. — 2014. — № 5 (49). — С. 63–72.

*САЛЕНКО Сергей Дмитриевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: salenkod@yandex.ru
Новосибирский государственный технический университет
ГОСТЕЕВ Юрий Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, доц.; E-mail: gosteev@corp.nstu.ru
Новосибирский государственный технический университет*

Получено после доработки 16.12.14

Salenko Sergey Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: salenkod@yandex.ru, Novosibirsk State Technical University, Russia
Gosteev Yuriy Anatolyevich, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor; E-mail: gosteev@corp.nstu.ru, Novosibirsk State Technical University, Russia

TO THE ASSESSMENT WIND EFFECTS ON STRUCTURES

Domestic regulations to assess the wind effects on structures is reviewed critically.

Key words: wind effects on structures, bridge spans.

REFERENCES

1. Salenko, S.D. Aerodynamic testing during sliding bridges [Text] / S.D. Salenko, A.A. Kuraev, A.D. Obuhovskiy et al. // Transport construction. — 1996. — N 1–2. — P. 40–41.
2. Попов, N.A. Recommendations for defining dynamic calculations of buildings and structures on the effect of the fluctuating component of wind load [Text] / N.A. Popov. — M. : Gosstroy Russia, CNIISK the V.A. Kucherenko, 2000. — 45 p.
3. Simiu, E. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering [Text] / E. Simiu, R.H. Scanlan — A John Wiley & Sons New York / Chichester / Brisbane / Toronto, 1986. — xi, 589 p. : ill.
4. Devnin, S.I. Aerohydrodynamics of bluff structures: Handbook [Text] / S.I. Devnin. — L. : Sudostroeniye, 1983. — 332 p.
5. Berezin, M.A. Atlas of aerodynamic characteristics of building structures [Text] / M.A. Berezin, V.V. Katyushin. — Novosibirsk : Olden-Polygraphiya, 2003. — 130 p.
6. Gosteev, Yu.A. Influence of the shape on aerodynamic characteristics of girder bridges [Text] / Yu.A. Gosteev, A.D. Obuhovskiy, S.D. Salenko // Magazine of Civil Engineering. — 2014. — N 5(49). — P. 63–72.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ УЧЕНЫЙ-ПРАКТИК И ИННОВАТОР (к 80-летию Владимира Ивановича Костина)



25 января 2015 года исполнилось 80 лет доктору технических наук, профессору, заместителю главного редактора журнала «Известия вузов. Строительство» Владимиру Ивановичу Костину.

В.И. Костин известен научной и инженерной общественности как крупный ученый, специалист в области строительной теплотехники, отопления и вентиляции.

Большой опыт практической инженерной и руководящей работы в различных производственных, научных и проектных организациях способствовал тому, что научные и инновационные разработки В.И. Костина нашли применение во многих отраслях промышленности: на тепловых электростанциях, в металлургии, химии и нефтехимии, машиностроении и др.

Основные труды В.И. Костина относятся к внутренней аэродинамике и тепловому режиму зданий, отоплению и вентиляции промышленных объектов. Им разработаны расчетные физические и сложные математические модели многоэтажных промзданий с проемами в перекрытиях, для помещений с повышенной влажностью и мощными источниками теплоты.

Профессор В.И. Костин внес весомый вклад в подготовку инженерных и научных кадров в качестве руководителя дипломных проектов, кандидатских диссертаций, члена диссертационных советов.

Более 35 лет, по настоящее время, он эффективно работает заместителем главного редактора журнала «Известия вузов. Строительство».

Коллектив редакции, коллеги и ученики сердечно поздравляют Владимира Ивановича со славным юбилеем и желают здоровья и творческих успехов в дальнейшей работе

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 подписью 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 Cyr 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;

— 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*;

— *аннотация 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 *.cdg (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 п, 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 2015 г. — из расчета 900 р. за 1 журнальную страницу.

(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 присылать 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. *Корректурa 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.

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

На 1-е полугодие 2015 г.
каталожная цена за 6 месяцев — 3000 р.
цена отдельного номера — 500 р.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 1 (673) 2015

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*