

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 2 (626)
Февраль 2011 г.

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

Главный редактор В.Г. Себешев

Редакционная коллегия: А.А. Афанасьев, В.Л. Баладинский, Т.И. Баранова, В.А. Воробьев, П.А. Дмитриев, В.А. Игнатъев, В.И. Костин (зам. гл. редактора), Г.Б. Лебедев (зам. гл. редактора), Е.М. Лобанов, Л.С. Ляхович, В.И. Морозов, Ю.П. Панибратов, Ю.А. Попов, Ю.П. Правдивец, В.Г. Себешев, И.Б. Соколов, Ю.А. Феофанов, Е.М. Чернышов

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.
Тел./факс 266-28-59.
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 15.03.11. Формат 70×108¹/16.
Усл. печ. л. 11,03+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 162.

ООО «Партнеры Сибири»,
630005, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16.

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2011

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Коротких А.В., Крылов И.И., Черкасов В.Г.
Особенности работы двух- и трехболтовых фрикционных сдвигоустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей 3

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Крысько В.А., Жигалов М.В., Крылова Е.Ю.
Исследование нелинейной динамики балок Бернулли – Эйлера под действием локальной нагрузки 15

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М. О влиянии знака поверхностного заряда заполнителя на разжижающую способность суперпластификаторов 22

Федоров В.М., Питерский А.М. Тонкодисперсные промышленные отходы в гидротехническом бетоне 27

Мирюк О.А. Влияние вещественного состава на свойства сульфомагнезиальных композиций 31

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Чикирева Е.Ю. Расчетное обоснование техноло-

гии зимнего бетонирования одиночных колонн и плит перекрытий монолитных каркасов зданий с прогревным и беспроевным выдерживанием бетона	37
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Маклаков Д.В., Александров А.Ю., Посохин В.Н. К расчету течения над протяженным теплоисточником, снабженным двусторонним щелевым нижним отсосом	50
Самарин О.Д. Об аналитическом определении температурной эффективности пластинчатых перекрестноточных теплоутилизаторов	56
Машенков А.Н., Филимонов А.В. Практические аспекты надежности системы оперативного дистанционного контроля тепловых сетей	60
СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ	
Волкова Е.А., Ляпин А.А., Селезнев М.Г., Углова Е.В. О решении обратных задач строительной механики на основе данных натурного эксперимента	65
Скоробогатченко Д.А. Методика прогнозирования эксплуатационного состояния автомобильных дорог на основе представления нечетких множеств нейронными сетями	72
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Чубаров П.В., Гладышев Г.В., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А. Пневматический молоток с дроссельным воздухораспределением	78
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ	
Кукина И.В. «Искусство выживания»: некоторые аспекты концепции «идеального города» в XXI в. в зарубежных странах	84
Резун Д.Я., Каменецкий И.П. Фортификационные сооружения Кузнецка и его административной территории в XVII–XVIII вв.	91
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Кикоть А.А., Мурзин Е.В. Определение прогибов изгибаемых элементов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей	99
Столповский Г.А., Жаданов В.И., Гарипов В.С. Применение методов планирования эксперимента при поиске оптимальных параметров винтового стержня, влияющих на усилие его выдергивания из массива древесины	109
Хархардин А.Н. Модели потенциалов и сил парного взаимодействия микро- и наночастиц в дисперсных системах	117

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.072.2.014

А.В. КОРОТКИХ, И.И. КРЫЛОВ, В.Г. ЧЕРКАСОВ

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ДВУХ- И ТРЕХБОЛТОВЫХ ФРИКЦИОННЫХ СДВИГОУСТОЙЧИВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Приводятся результаты экспериментального и численного исследований двух- и трехболтовых фрикционных сдвигустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей на предварительно напряженных болтах с целью изучения напряженно-деформированного состояния и выявления особенностей их работы.

Ключевые слова: оцинкованные тонкостенные профили, болтовые сдвигустойчивые соединения.

В настоящей статье приводятся результаты исследований особенностей работы двух- и трехболтовых сдвигустойчивых соединений (ФСС) тонкостенных оцинкованных профилей (ТОП). Статья является продолжением публикации результатов исследований, начатых в [1].

Задачи исследования:

1. Экспериментальное определение фактического усилия натяжения оцинкованных болтов при конкретных значениях момента закручивания болта динамометрическим ключом.

2. Экспериментальное и численное изучение особенностей НДС элементов двух- и трехболтовых ФСС ТОП и перехода их в предельное состояние.

Первая задача обусловлена тем, что существующие эмпирические зависимости для усилий натяжения болтов по моменту закручивания ($M_{кр}$) были получены для неоцинкованных элементов (болты, шайбы, соединяемые элементы). Экспериментально устанавливались фактические усилия натяжения оцинкованных болтов М10 и М8 класса прочности 8.8 при конкретных значениях $M_{кр}$. В настоящем исследовании не ставилось задачи по определению коэффициента закручивания ($k = M_{кр} / d \cdot N$) для используемых оцинкованных болтов, так как согласно [2] его определение осуществляется для каждой конкретной партии метизов.

Для решения экспериментальной задачи 1 были изготовлены специальные устройства — захваты (рис. 1). Захваты устанавливались и фиксировались в разрывной машине Р-5 за фасонные выпуски. Расположение опор в разрывной машине выполнено строго друг против друга, для совпадения отверстий под болты. В процессе испытания производилась последовательная установка в указанное отверстие оцинкованных болтокомплектов (болт, гайка, шайбы) М10 и М8 (ГОСТ 7798–80) с использованием дополнительных распределительных (утолщенных) шайб ($t = 10$ мм). Количество испытанных болтокомплектов в каждой серии приведено в табл. 1. Для каждого испытания под головкой и гайкой у части болто-

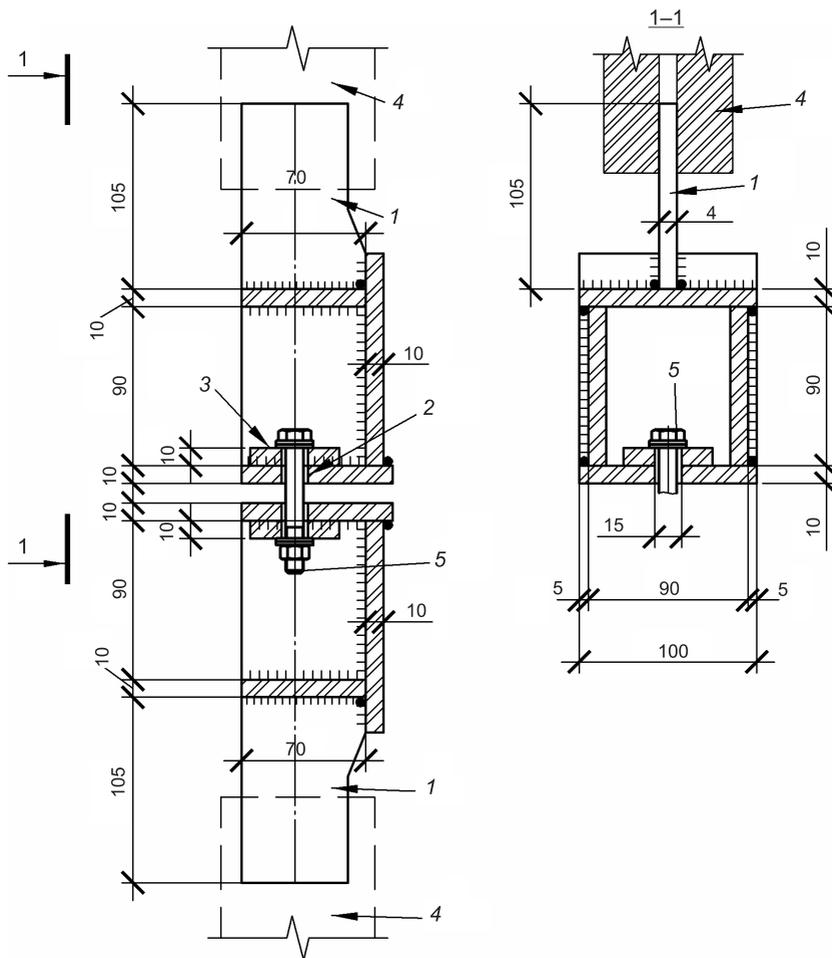


Рис. 1. Схема захватов для испытания болтов на предварительное напряжение
 1 — фасонные выпуски для фиксации в разрывной машине; 2 — отверстие для установки болтов; 3 — шайба из обычного металла; 4 — зажимные губы; 5 — испытываемый болт

Таблица 1
Усилия натяжения болтов в зависимости от крутящего момента

Болты	$M_{кр}$, кгс · м	Кол-во образцов	$v_{нат}$	Усилие натяжения $N_{нат}$, кгс
М8	3,6	5	Быстро	1500 — 1640
		5	Медленно	1525 — 1550
М10	3,6	5	Быстро	1275 — 1415
		5	Медленно	1125 — 1200
	5,3	5	Быстро	1700 — 1815
		5	Медленно	1550 — 1550
М10*	7	5	Быстро	Нет данных
		5	Медленно	1725 — 1800
М10*		5	Медленно	1275 — 1625

Примечание. $v_{нат}$ — скорость натяжения; медленно — закручивание со скоростью 3 об/мин; быстро — закручивание со скоростью 10 об/мин; М10* — серия испытаний без замены шайб.

комплектов устанавливалось по одной оцинкованной шайбе с целью имитации соединения оцинкованных профилей (контактной пары цинк — цинк). В одной серии (5 шт.) испытаний болтокомплектов М10 шайбы применялись повторно. Натяжение болтов осуществлялось при помощи протарированного динамометрического ключа (FORCE 6474470) на три значения крутящего момента: $M_{кр.1} = 3,6$ кгс · м; $M_{кр.2} = 5,3$ кгс · м; $M_{кр.3} = 7$ кгс · м. Для болтов М8 расчетный проектный крутящий момент $M_{кр.1} = 3,6$ кгс · м определен с использованием рекомендаций¹ и указаний норм². Для болтов М10 — максимальный расчетный проектный крутящий момент составил $M_{кр.3} = 7$ кгс · м, минимальный — $M_{кр.1} = 3,6$ кгс · м, что соответствовало значению осевого усилия натяжения² $0,35R_{bh}$, $M_{кр.2} = 5,3$ кгс · м — промежуточное значение между $M_{кр.1}$ и $M_{кр.3}$. Вращение ключа осуществлялось с соблюдением требований [3]. Регистрация усилия натяжения ($N_{нат}$) болтов при заданном крутящем моменте происходила по шкале протарированной разрывной машины Р-5.

Результаты испытания приведены в табл. 1. В процессе испытания отмечались случаи отклонения значений натяжения болтов при изменении скорости вращения динамометрического ключа. При быстром закручивании (скорость вращения около 10 об/мин) усилие натяжения оказывается выше по сравнению с медленным (скорость вращения 3 об/мин и менее) на 5–10 % (см. табл. 1). Так же отмечалось, что на усилие натяжения оказывает существенное влияние состояние поверхностей шайб в месте контакта с головкой болта и гайкой. При повторном использовании шайб, особенно в случае повреждения ее верхнего цинкового слоя в процессе предыдущего использования, происходит увеличение сопротивления кручению в зоне контакта и как следствие уменьшение осевого усилия натяжения болта на 10–25 %. Хотя в задачи данного исследования не входило детальное изучение влияния на коэффициент закручивания состояния поверхности шайб и скорости вращения ключа, настоящий эксперимент свидетельствует о необходимости установить требования по исключению повторного использования шайб и не допускать использования шайб с поврежденной поверхностью.

Для экспериментального решения задачи 2 были подготовлены двух- и трехболтовые ФСС ТОП с болтами, расположенными вдоль усилия, приложенного к соединяемым элементам. Образцы собирались из полосовой оцинкованной стали шириной $B_1 = 40$ мм, $B_2 = 50$ мм, $B_3 = 60$ мм и толщиной $t = 1,5$ (наиболее часто применяемая в строительстве) на предварительно напряженных высокопрочных болтах М10 и М8 (рис. 2). Ширина образцов принималась с учетом требований норм² (по расстановке болтов в соединении) и возможностей разрывной машины. Предварительное напряжение болтов соединений производилось при помощи динамометрического ключа на моменты $M_{кр.1} = 3,6$ кгс · м; $M_{кр.2} = 5,3$ кгс · м; $M_{кр.3} = 7$ кгс · м (табл. 2, 3). Всего было подготовлено по 3 образца для каждой серии испытаний. Для изучения напряженного состояния экспериментальное трехболтовое соединение с болтами М10 было снабжено тензорезисторами фольгового типа с базой 1 мм. Тензорезисторы были наклеены количеством 3 шт. у каждого болта (рис. 2, а) и подключены к тензометрической системе. В качестве силовой установки использована разрывная машина Р-5. Регистрация взаимных сдвигов деталей

¹ Чесноков А.С., Княжев А.Ф. Сдвигоустойчивые соединения на высокопрочных болтах. М.: Стройиздат, 1974.

² СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. М.: Стройиздат, 1990.

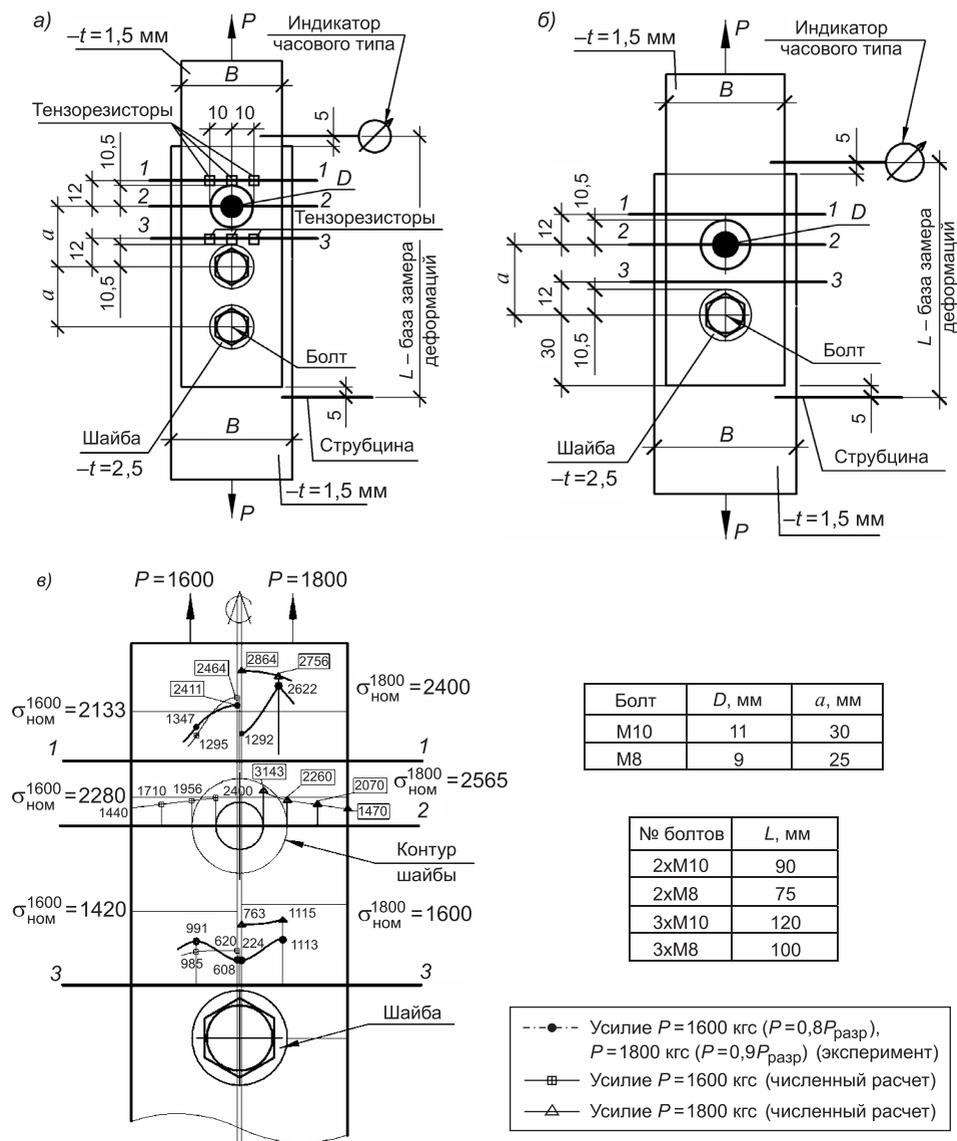


Рис. 2. Схема экспериментальных образцов и НДС трехболтовых соединений с болтами вдоль усилия

а — образец трехболтового соединения с болтами вдоль усилия; б — образец двухболтового соединения с болтами вдоль усилия; в — распределение нормальных напряжений (σ_x) в трехболтовом соединении по расчету и эксперименту (кгс/см²)

соединения в процессе нагружения производилась при помощи индикаторов часового типа (точность 0,1 мм), закрепленных на образцах при помощи струбочин. Для всех образцов были определены значения расчетных проектных нагрузок (по $R_y = 2275$ кгс/см² и $R_u = 3055$ кгс/см² для стали) по указаниям норм² и значения расчетных нагрузок по фактическим характеристикам (по $\sigma_t = 2330$ кгс/см² и $\sigma_b = 3130$ кгс/см²) по критериям прочности соединений и сдвигу (см. табл. 2, 3).

Расчетные нагрузки по критерию взаимного сдвига элементов соединения определялись по расчетному значению ранее установленного коэффициента трения $\mu = 0,55$ [1]. При этом расчетная проектная нагрузка сдвига определялась по [п.11.13*–11.14, 4] (с учетом всех коэффициентов надежности и условия работы соединений), а расчетная нагрузка сдвига

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные нагрузки на 2-болтовые соединения на болтах М8 и М10 при $V = 50$ мм

Ширина образцов	Наименование критерия	Расчетное сечение	Расчетная проектная нагрузка в зависимости от усилия натяжения, кгс		Расчетная нагрузка по фактическим характеристикам в зависимости от усилия натяжения, кгс	
			$M_{кр} = 7 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ($N_{нат} = 1755 \text{ кгс}$)	$M_{кр} = 5,3 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ($N_{нат} = 1740 \text{ кгс}$)	$M_{кр} = 7 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ($N_{нат} = 1755 \text{ кгс}$)	$M_{кр} = 5,3 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ($N_{нат} = 1740 \text{ кгс}$)
М10	Взаимный сдвиг (срыв) элементов соединения	Брутто	$\frac{1379}{1,32}$	$\frac{1045}{1,48}$	$\frac{1931}{0,95}$	$\frac{1463}{1,06}$
			Нетто	$\frac{1706}{1,07^{(1)}}$	$\frac{1706}{0,91^{(1)}}$	$\frac{1748}{1,09^{(1)}}$
	Достижение текучести в сечении элементов соединения	Брутто	2094	2291	2363	2145
			Нетто	$\frac{2291}{0,80}$	$\frac{0,68}{2812}$	$\frac{0,77}{2899}$
	Разрушение*	Брутто	$\frac{2812}{0,69}$	$\frac{0,71}{1900}$	$\frac{0,67}{1825}$	$\frac{0,69}{1900}$
			Нетто	1825	1550	1825
М8	Взаимный сдвиг при эксперименте (min значение)	Брутто	2000	2000	1950	2000
			Нетто	$\frac{1950}{1,198}$	$\frac{1,21}{1706}$	$\frac{0,85^{(1)}}{1706}$
	Взаимный сдвиг (срыв) элементов соединения	Брутто	2201	2291	2255	2363
			Нетто	$\frac{2201}{0,75}$	$\frac{2956}{0,58}$	—
	Достижение текучести в сечении элементов соединения	Брутто	—	—	—	—
			Нетто	—	—	—
Разрушение*	Брутто	1450	1725	1450	1450	
		Нетто	—	—	—	—

Примечание. В числителе — значения нагрузок, в знаменателе — коэффициент $k_c = P_{эксп} / P_{расч}$; *разрушение — достижение $\sigma_B (R_D)$ в сечении элемента; $^{(1)}$ — коэффициент $k_c = P_{(сдв)} / P_{(тек)}$.

Таблица 3
Расчетные и экспериментальные нагрузки на болтах М10 и М8 при $V = 50$ мм

Ширина образцов	Наименование критерия	Расчетное сечение	Расчетная проектная нагрузка в зависимости, кгс		Расчетная нагрузка по фактическим характеристикам, кгс	
			$M_{кр} = 3,6 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ($N_{нат} = 1330 \text{ кгс}$)	$M_{кр} = 7 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ($N_{нат} = 1755 \text{ кгс}$)	$M_{кр} = 3,6 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ($N_{нат} = 1330 \text{ кгс}$)	$M_{кр} = 7 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ($N_{нат} = 1755 \text{ кгс}$)
М10	Взаимный сдвиг (срыв) элементов соединения		—	$\frac{2068}{0,85}$	—	$\frac{2896}{0,60}$
	Достижение текучести в сечении элементов соединения	Брутто	—	$\frac{1706}{1,03^{(1)}}$	—	$\frac{1748}{1,00^{(1)}}$
		Нетто	1885		1931	
	Разрушение*	Брутто	—	$\frac{2291}{0,90}$	—	$\frac{2363}{0,87}$
		Нетто	—	$\frac{2532}{0,81}$	—	$\frac{2610}{0,79}$
	Взаимный сдвиг при эксперименте (min значение)			1750		
	Разрушение при эксперименте	Нетто		2060		
М8	Взаимный сдвиг (срыв) элементов соединения		$\frac{1797}{1,06}$	—	$\frac{2516}{0,76}$	—
	Достижение текучести в сечении элементов соединения	Брутто	$\frac{1706}{1,11^{(1)}}$	—	$\frac{1748}{1,09^{(1)}}$	—
		Нетто	1982		2030	
	Разрушение*	Брутто	$\frac{2291}{0,92}$	—	$\frac{2363}{0,89}$	—
		Нетто	$\frac{2661}{0,79}$	—	$\frac{2744}{0,77}$	—
	Взаимный сдвиг при эксперименте (min значение)			1900		
	Разрушение при эксперименте	Нетто		2100		

П р и м е ч а н и е. В числителе — значения нагрузок, в знаменателе — коэффициент $k_c = P_{эксп}/P_{расч}$; * разрушение — достижение $\sigma_v (R_{п})$ в сечении элемента; (1) — коэффициент $k_c = P_{(сдв)} / P_{эксп}$.

по фактическим характеристикам определялась как $P_{сдв} = n \cdot \mu \cdot N_{нат}$, где n — количество болтов в соединении, μ — коэффициент трения, $N_{нат}$ — продольное усилие натяжения болта, принятое по результатам исследования, описанного ранее (без применения коэффициентов, предписанных нормами).

Испытания производились на растягивающие усилия до полного исчерпания несущей способности соединения (разрушения). Нагрузка к образцам прикладывалась с переменным шагом: шаг 100 кг до нагрузки 900 кгс, далее шаг 50 кгс. На каждом шаге приложения нагрузки производилась регистрация суммарных деформаций и сдвигов соединений по установленным индикаторам часового типа. По результатам испытаний строились графики работы соединений, на которых производилось выделение стадий работы и определялась несущая способность по критерию сдвига и несущая способность по критерию прочности (рис. 3).

Анализируя результаты экспериментального исследования двух- и трехболтовых соединений, установлено, что их работа характеризуется следующими стадиями (см. рис. 3).

I стадия — стадия упругой (линейной) работы. Характеризуется малыми деформациями и отсутствием сдвигов в соединении. Деформации

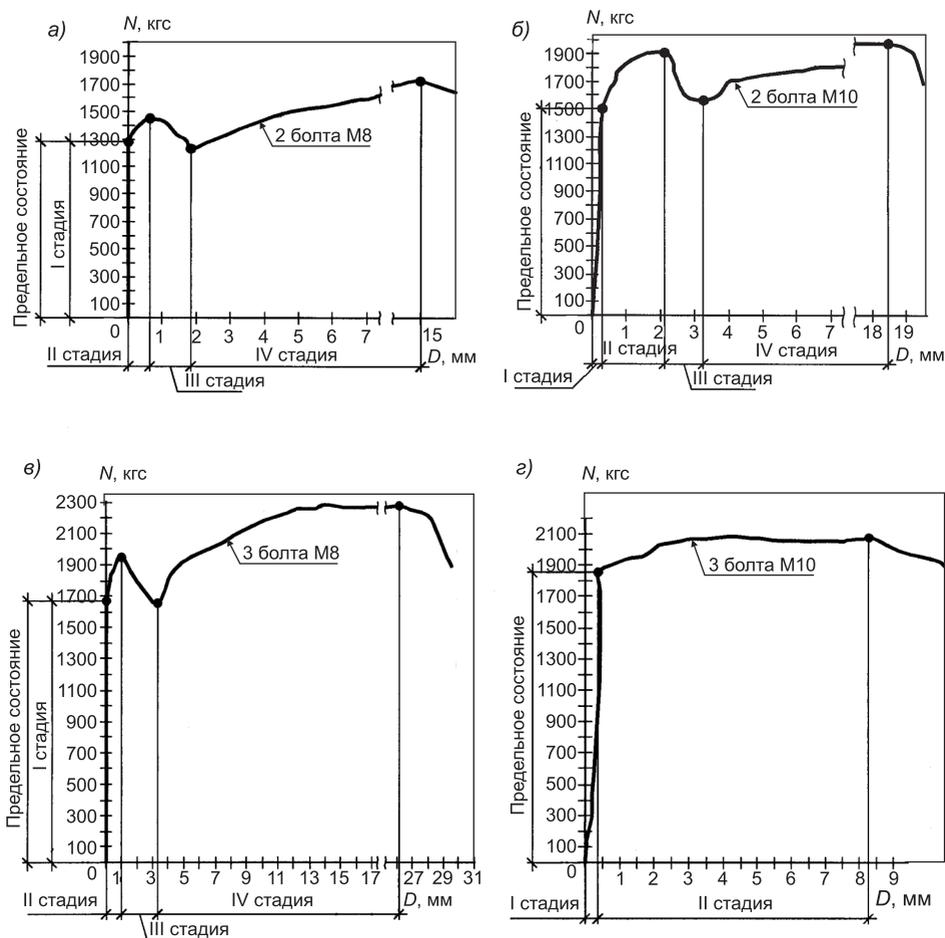


Рис. 3. Диаграммы работы 2- и 3-болтовых соединений

а — 2-болтовое соединение на болтам М8; б — 2-болтовое соединение на болтам М10; в — 3-болтовое соединение на болтам М8; г — 3-болтовое соединение на болтам М10

составляют примерно $(9/10000...40/10000) \cdot L$ или $(0...0,3 \text{ мм})$, где L — база замера деформаций (см. рис. 2).

II стадия — стадия неупругой (нелинейной) работы. Начало этой стадии характеризуется возникновением у границы шайбы первого болтоконтакта зоны локальных пластических деформаций. Под влиянием пластических деформаций происходит ослабление натяжения первого болтоконтакта и его срыв. Далее начинает происходить последовательное перераспределение усилий с предыдущего ряда болтоконтактов на последующие и последовательный срыв болтоконтактов под действием образующихся локальных пластических деформаций. Эта стадия заканчивается в первом локальном максимуме графика работы (см. рис. 3). Протяженность этой стадии составляет $(7/1000...30/1000) \cdot L$ или $(0,8...1,8 \text{ мм})$.

III стадия — стадия общего сдвига. Характеризуется уменьшением сопротивления прикладываемой нагрузке в результате общего смещения относительно друг друга соединяемых элементов. Стадия заканчивается в локальном минимуме, когда один из болтов начинает работать на срез, кромки отверстия на смятие. Протяженность этой стадии составляет $(5/100 \cdot L)$ или $(1,1...2,2 \text{ мм})$.

IV стадия — совместная работа болтоконтактов на трение и срез (смятие). Характеризуется возобновлением роста сопротивления нагрузке за счет смены характера работы соединения — последовательным включением в работу на срез (смятие) всех (или части) болтов соединения. Работа сопровождается овализацией отверстий и значительными пластическими деформациями зон контакта элементов соединения о резьбу болтов до полного разрушения одного из соединяемых элементов по первому ослабленному сечению. Протяженность этой стадии зависит от диаметра болта и примерно на порядок больше суммарных деформаций предыдущих стадий (для болта М10 протяженность стадии больше, чем для М8). Суммарные деформации составляют примерно $(13...22,8 \text{ мм})$.

Таким образом, описана четырехстадийная схема работы соединений ТОП на высокопрочных болтах.

По диаграмме рис. 3, в можно наблюдать некоторые отклонения от описанной выше схемы в работе 3-болтовых соединений на болтах М10. Для указанного типа соединений в конце стадии II происходит характерный срыв только по первому болтоконтакту со стороны усилия (от сечения 2-2 в направлении сечения 1-1). Дальнейшего последовательного срыва по оставшимся болтоконтактам не происходит, они продолжают сопротивляться сдвигающим усилиям за счет сил трения. Соединение начинает разрушаться по ослабленному сечению без протекания (реализации) III и IV стадий работы. Работа соединения сопровождается значительными деформациями $(7/100 \cdot L)$ или $(8,5 \text{ мм})$. Причина изменения схемы работы соединения — превышение значения несущей способности соединения по критерию сдвига ($N_{\text{сдв}}$) над несущей способностью по критерию достижения текучести ($N_{\text{тек}}$) в сечении брутто. Таким образом, описана двухстадийная схема работы соединений ТОП на высокопрочных болтах.

Учитывая, что действующие нормы предусматривают расчет соединений на высокопрочных болтах только в упругой стадии работы, предлагается за предельное состояние соединения принимать момент преодоления сил трения (стадия I) и не принимать во внимание работу соединения на последующих стадиях.

Особенности работы отдельных видов соединений

Соединения на болтах М10.

1. Фактический взаимный сдвиг элементов 2-болтовых соединений происходил при нагрузках, отличающихся от расчетных по фактическим характеристикам, на величину 5–6 % в большую или меньшую сторону (см. табл. 2). Это можно объяснить разбросом усилий предварительного натяжения болтов соединения.

2. Фактический взаимный сдвиг элементов 3-болтовых соединений происходил при нагрузках до 15 % меньше расчетных проектных по критерию сдвига и до 40 % меньше расчетных по критерию сдвига по фактическим характеристикам. Сдвиг (срыв) происходил по первому болтоконтакту из-за достижения текучести (σ_t) в сечении брутто соединяемых элементов.

3. В 3-болтовом соединении разрушение происходит по критерию прочности без достижения сдвига (срыва) элементов соединения по всем болтоконтактам.

Соединения на болтах М8.

1. Фактический взаимный сдвиг элементов 2-болтовых соединений происходил при усилиях на 15 % меньше расчетных по критерию сдвига по фактическим характеристикам и на 17 % меньше расчетных по критерию достижения текучести в сечении брутто по фактическим характеристикам (см. табл. 2).

2. Фактический взаимный сдвиг элементов 3-болтовых соединений происходил при усилиях на 15–45 % меньше расчетных по фактическим характеристикам, но усилия срыва с точностью 1–8 % совпадают со значениями расчетных усилий по критерию достижения текучести в сечении брутто по фактическим характеристикам.

Для оценки напряженного состояния по результатам эксперимента строились графики распределения экспериментальных нормальных напряжений (σ_x) 3-болтового соединения с болтами М10 по сечениям 1-1 и 3-3 (см. рис. 2, в). Усилия сдвига для данного соединения по результатам испытания $P_{сдв} = 1850$ кгс, усилия разрушения $P_{разр} = 2050$ кгс. Анализируя эти данные, можно сделать вывод, что распределение напряжений в 2-болтовых ФСС ТОП с болтами вдоль усилия происходит неравномерно. На границе шайб у первого и второго болтоконтакта со стороны усилия (сечение 1-1) наблюдается концентрация нормальных напряжений, для упругой стадии работы $k_{1-1} = 1,1$, что качественно соответствует схеме напряженного состояния фрикционных соединений из толстолистового проката¹ с $t \geq 3$ мм. Уровень нормальных напряжений на границе шайб у второго болтоконтакта меньше, чем у первого в 1,3–4 раза. При достижении нагрузки на соединение величины $0,9P_{разр}$ ($P = 1800$ кгс) пики нормальных напряжений смещаются в зоны напротив боковых границ отверстия первого болтоконтакта.

В соответствии с исследованиями¹ это явление происходит в результате ослабления предварительного натяжения болта, вызванного развитием пластических деформаций под его головкой.

Для численного исследования был применен программный комплекс cosmosworks, реализующий МКЭ. Ранее в [1] уже была обоснована корректность использования такого метода исследования на примере одноболтового соединения.

В численных расчетах наряду с соединениями, где болты установлены вдоль усилия, была рассмотрена схема с болтами поперек усилия

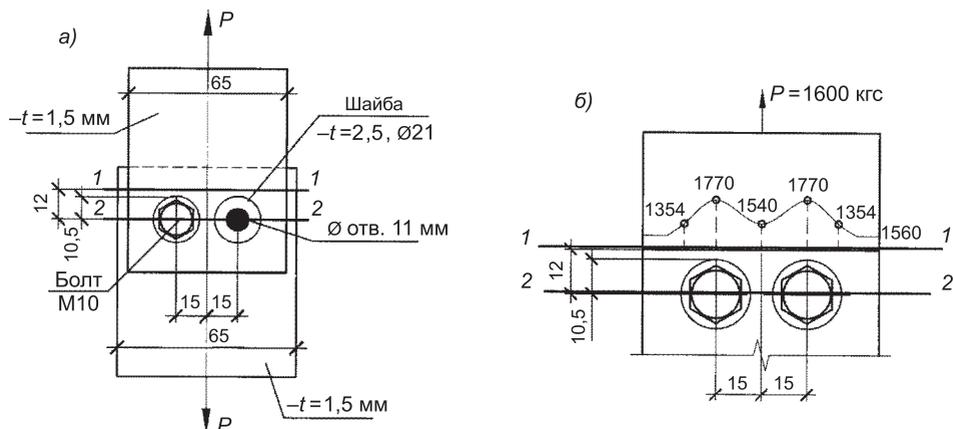


Рис. 4. Схема соединения и НДС по результатам расчета

а — модель двухболтового соединения с болтами поперек усилия; б — распределение напряжений в соединении по расчету

(рис. 4). Принятые ниже значения диаметров болтов, коэффициента трения, усилия натяжения болтов, а также других величин обоснованы в [1]. Расчетные модели создавались на основе объемных оболочечных элементов. Величина сетки разбиения объемных элементов принималась 2,5 и 4,5 мм на основании рекомендаций [4, с. 55]. Сопряжение элементов соединения в расчетной программе по всей контактной зоне принималось «узел к поверхности», коэффициент трения назначался $\mu = 0,55$ в соответствии с [1]. Зона соединения, обжимаемая предварительно напряженными болтами, моделировалась при помощи функции программы cosmosworks [1]. Необходимо отметить, что в отличие от расчетных моделей, использованных в [1], в настоящих расчетных схемах были введены шайбы. Уточнение расчетной модели связано с тем, что введение шайб дает более достоверные результаты напряжений на границе шайб (по сечениям 1-1...3-3). Усилие предварительного натяжения болтов принималось равным полученным в физическом эксперименте, описанном выше $N_{\text{нат}} = 1755$ кгс. В расчете принимались такие же механические характеристики стали (σ_t и σ_b), как в эксперименте. Расчет соединения производился в линейной постановке, так как нелинейный анализ с учетом действия сил трения в программном комплексе не реализован. Нагрузка на соединения задавалась $P = 1600$ кгс и $P = 1800$ кгс (принято из экспериментальных данных). Оценка НДС производилась по сечениям 1-1...3-3 (см. рис. 2, в, рис. 4, б).

Анализируя результаты расчета, можно сделать следующие выводы.

Соединение с болтами вдоль усилия.

1. Распределение и концентрация расчетных нормальных напряжений по сечениям 1-1, 3-3 в упругой стадии работы происходят весьма близко к экспериментальным (расхождение в пределах 5 %) (см. рис. 2, в).

Соединение с болтами поперек усилия.

1. На границе шайб каждого болтоконтакта со стороны усилия (сечение 1-1) происходит концентрация напряжений $k = 1,13$ (см. рис. 4, б).

2. Напряженное состояние у границы шайб первого болтоконтакта соответствует напряженному состоянию соединения с болтами вдоль усилия.

Анализ и сравнение экспериментальных данных с результатами расчета позволил подтвердить, что несущая способность ФСС ТОП по критерию сдвига зависит от концентрации нормальных напряжений в сечении 1-1, работа таких соединений может происходить по двух- или четырехстадийной схемам. Количество стадий работы соединения зависит от соотношения расчетных значений $N_{сдв}$ к $N_{тек}$:

$N_{сдв}/N_{тек} < 1$ — 4 стадии работы соединения;

$N_{сдв}/N_{тек} \geq 1$ — 2 стадии работы соединения.

Выводы. 1. Напряженное состояние двухболтового ФСС ТОП качественно соответствует напряженному состоянию фрикционных соединений из толстолистового проката¹ ($t \geq 3$ мм).

2. Работа ФСС ТОП соединений может происходить по двух- ($N_{сдв}/N_{тек} \geq 1$) или четырехстадийной ($N_{сдв}/N_{тек} < 1$) схемам.

3. Появление зон пластических деформаций на границе шайбы первого болтоконтакта ($\sigma_{max} = k \cdot \sigma_{ном}$, где $k = 1,1-1,15$) приводит к снижению натяжения болта и, как следствие, раннему преодолению сил трения (срыву).

4. Расчет сдвигоустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей рекомендуется производить с использованием требований действующих норм [п.11.12–п.11.14, 4] с введением коэффициента условия работы $\gamma_c = 0,85$, учитывающего раннее развитие локальных пластических деформаций под головкой первого болтоконтакта со стороны усилия $\sigma_{ном} \leq \gamma_c \cdot R_y$, где R_y — принятое расчетное сопротивление стали.

5. В ходе исследования отмечено, что на усилие натяжения болта оказывают влияние скорость закручивания болта (гайки) и состояние поверхностей шайб в месте контакта с элементами соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коротких, А.В. Особенности работы одноболтовых фрикционных сдвигоустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей [Текст] / А.В. Коротких, А.Н. Кретинин, И.И. Крылов // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 10. — С. 117–122.
2. СТП 006–97. Устройство соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов [Текст]. — М.: Трансстрой, 1998.
3. СТО 0051–2006. Конструкции стальные строительные. Болтовые соединения. Изготовление и монтаж [Текст]. — М., 2006.
4. Вовкушевский, А.В. Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия швов [Текст] / А.В. Вовкушевский, Б.А. Шойхет. — М.: Энергия, 1981. — 136 с.

КОРОТКИХ А.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

КРЫЛОВ И.И., канд. техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЧЕРКАСОВ В.Г., студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 12.01.11

Korotkikh A.V., post-graduate student, Novosibirsk State of Architecture and Civil Engineering University (Sibstrin), Russia

Krylov I.I., candidate of technical sciences, professor, Novosibirsk State of Architecture and Civil Engineering University (Sibstrin), Russia

Cherkasov V.G., student, Novosibirsk State of Architecture and Civil Engineering University (Sibstrin), Russia

FEATURES OF WORK TWO AND A THREE OF BOLTS SLIP CRITICAL CONNECTIONS OF THE THIN-WALLED ZINCED PROFILES

An experimental and numerical researches results, of two and three bolts slip critical connections of the thin-walled zinc coated profiles, for the purpose of studying of the intense-deformed condition and revealing of features work of such connections are resulted.

Key words: the thin-walled zined profiles, slip critical connections.

REFERENCES

1. Korotkikh, A.V. Features of work one bolt frictional not shifted connections of the thin-walled zined profiles [Text] / A.V. Korotkikh, A.N. Kretinin, I.I. Krylov // News of Higher Education Institutions. Construction. — 2009. — N 10. — P. 117–122.
2. STP 006–97. Making a high-strength bolts connections in construction of steel bridges [Text]. — M. : Transstroy, 1998.
3. STO 0051–2006. Steel building construction. Bolts connection. Making and erection [Text]. — M., 2006.
4. Vovkushevsky, A.V. Calculation of massive hydraulic engineering constructions taking into account disclosing of shvov [Text] / A.V. Vovkushevsky, B.A. Shojhet. — M. : Energy, 1981. — 136 c.

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3:534.1

В.А. КРЫСЬКО, М.В. ЖИГАЛОВ, Е.Ю. КРЫЛОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ–ЭЙЛЕРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛОКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ¹

Работа посвящена исследованию сценариев перехода гармонических колебаний в хаотические для нелинейных балок Бернулли–Эйлера под действием неравномерной поперечной знакопеременной нагрузки. Получены квазипериодический сценарий, модифицированный сценарий Фейгенбаума, а также две различные модификации комбинированных сценариев, каждая из которых является новой. Достоверность подтверждается сравнением результатов, полученных по двум методам — методу конечных элементов в форме Бубнова–Галеркина и методу конечных разностей $O(h^2)$.

Ключевые слова: балки, нелинейные колебания, сценарии хаос, диссипативные системы, балки Бернулли–Эйлера.

Постановка задачи. Рассматривается однослойная, упругая, изотропная балка как область пространства R^2 в декартовой системе координат. Декартова прямоугольная система координат XOZ введена следующим образом: ось OX направлена слева направо вдоль срединной линии балки, ось OZ — вниз, перпендикулярно оси OX . Под срединной линией балки понимается фиксированная линия приведения $z = 0$. В указанной системе координат область, занимаемая балкой, определяется в виде $\Omega = \{x \in [0, a]; -h \leq z \leq h\}$. Здесь и в дальнейшем будем использовать обозначения: $2h$ — высота, a — длина балки.

Балка находится под действием поперечной знакопеременной нагрузки $q = q_0(x) \sin(\omega_p t)$, приложенной к некоторой области балки.

Математическая модель нелинейных диссипативных колебаний балки строится на основе гипотезы Бернулли–Эйлера [1] с учетом нелинейной зависимости между деформациями и перемещениями в форме Кармана [2].

Разрешающие уравнения в перемещениях в соответствии с моделью Бернулли–Эйлера после введения безразмерных параметров по формулам

$$\bar{w} = w / (2h), \quad \bar{u} = ua / (2h)^2, \quad \bar{x} = x / a, \quad \lambda = a / (2h), \\ \bar{q} = (qa^4) / (2h)^4 E, \quad \bar{t} = t / \tau, \quad \tau = a / c, \quad c = \sqrt{Eg / \vartheta}, \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon a / c$$

имеют вид [3]:

$$\begin{cases} u'' + L_3(w, w) - \dot{u} = 0; \\ 1/\lambda^2 \{L_2(w, w) + L_1(u, w) - 1/12w^{IV}\} - \ddot{w} - \varepsilon \dot{w} + q = 0. \end{cases} \quad (1)$$

¹ Работа выполнена при поддержке грантов ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2012 гг. НК-70П и гранта РФФИ 10-08-91332.

Здесь черточки над безразмерными параметрами опущены, производные по времени t ($0 \leq t \leq \infty$) обозначены точкой, а производные по координате x — штрихом;

$L_1(u, w) = u''w' + u'w''$, $L_2(w) = (3/2)w''(w')^2$, $L_3(w) = w''w'$ — нелинейные операторы; ε — коэффициент диссипации; E — модуль Юнга;

ϑ — удельный вес материала балки;

g — ускорение свободного падения,

q — поперечная нагрузка, имеющая вид: $q = q_0(x) \sin(\omega_p t)$, ω_p — частота внешней нагрузки, $q_0(x)$ — ее амплитуда.

При получении численных результатов использовались следующие параметры: $\lambda = a / (2h) = 50$, $\varepsilon = 1$, $\omega_p = 5,3$.

Система (1) дополняется начальными

$$w(x, t)|_{t=0} = u(x, t)|_{t=0} = 0; \dot{w}(x, t)|_{t=0} = \dot{u}(x, t)|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

и граничными условиями, соответствующими шарнирному закреплению концов балки:

$$w(0, t) = w(1, t) = u(0, t) = u(1, t) = w''_{xx}(0, t) = w''_{xx}(1, t) = 0. \quad (3)$$

Методы решения. Система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (1) с начальными (2) и граничными условиями (3) приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений по времени методом конечных разностей (МКР) с погрешностью $O(h^2)$ и методом конечных элементов (МКЭ) в форме Бубнова–Галеркина. Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений решается методом Рунге–Кутта четвертого порядка точности.

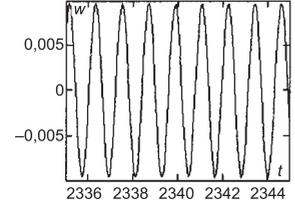
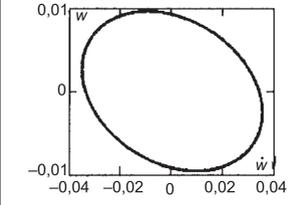
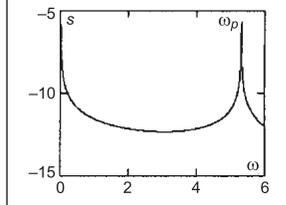
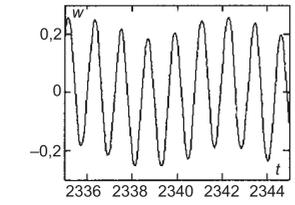
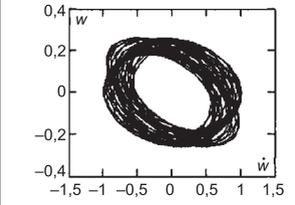
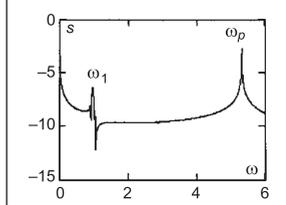
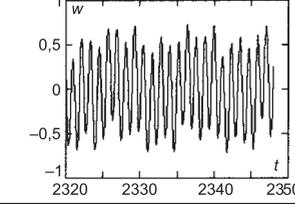
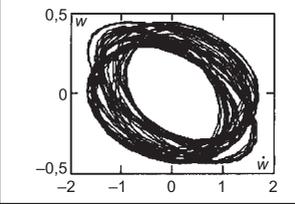
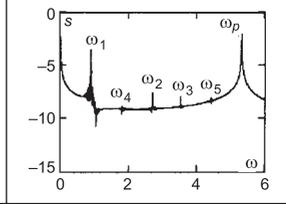
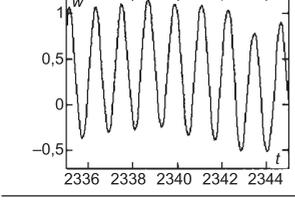
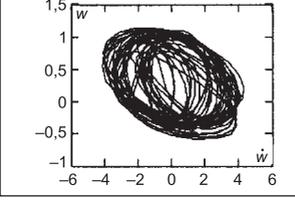
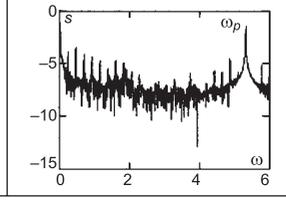
Использование двух принципиально различных методов, МКР и МКЭ, позволило решить важный вопрос о достоверности получаемых результатов в задачах сложных колебаний распределенных систем. Другим аспектом оценки достоверности получаемых результатов был анализ совпадения спектров мощности в зависимости от количества отрезков разбиения n отрезка $x \in [0; 1]$. Для сравнения использовались результаты при $n = 20, 40, 60, 80, 100$. Оптимальным выбрано число разбиений по длине балки $n = 40$. Для данного разбиения шаг метода Рунге–Кутта по времени $\Delta t = 39,0625 \cdot 10^{-4}$ выбирался по принципу Рунге. Далее приведены результаты исследования колебаний балки Бернулли–Эйлера методом конечных разностей.

Для исследования поведения нелинейных балок под действием знакопеременной поперечной нагрузки разработан пакет программ, позволяющий на основе решения дифференциальной задачи (1)–(3) получать сигнал, фазовый портрет, сечение Пуанкаре, спектр мощности Фурье, вейвлет-спектр на основе вейвлета Морле, показатель Ляпунова и автокорреляционные функции для каждого варианта приложения нагрузки.

Анализ результатов и примеры. Ниже под полосой нагрузки будем понимать количество отрезков разбиения, в точках которых приложена нагрузка.

1. Рассматриваются следующие варианты: нагрузка распределена по всей длине балки ($n_q = 40$, здесь и в дальнейшем n_q — ширина полосы приложения нагрузки), затем полоса приложения нагрузки последовательно сокращалась на 4 отрезка, до $n_q = 4$, при этом оставаясь симметричной относительно середины балки. В табл. 1 и в последующих для разных значений амплитуды внешней нагрузки q_0 в первом столбце при-

Таблица 1

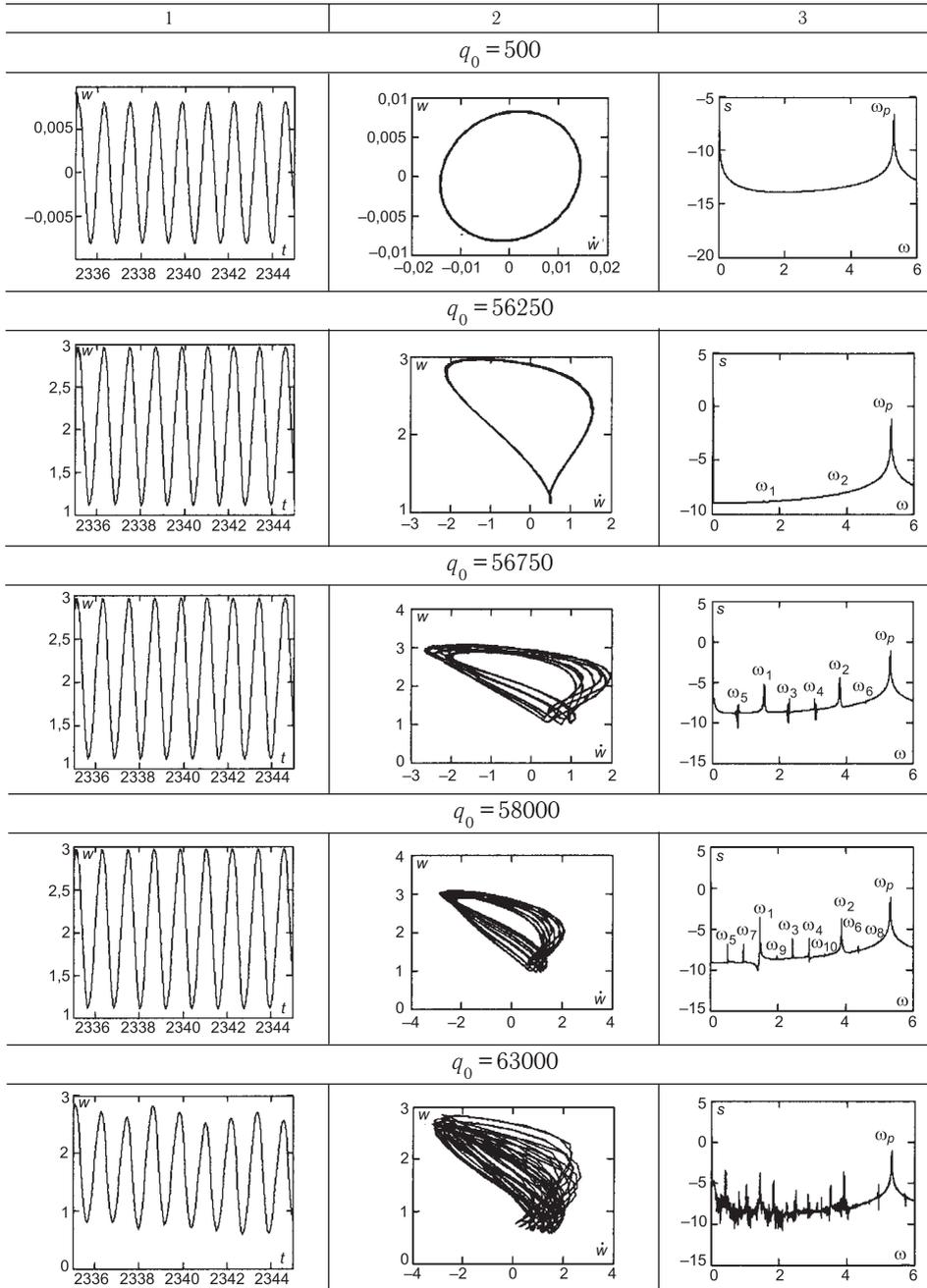
Сигнал $w(0,5, t)$	Фазовый портрет $w(\dot{w})$	Спектр мощности $s(\omega)$
1	2	3
$q_0 = 500$		
		
$q_0 = 12000$		
		
$q_0 = 20000$		
		
$q_0 = 40000$		
		

водится сигнал для центральной точки балки, во втором фазовый портрет, в третьем столбце — спектр мощности. При изучении всех полученных сценариев перехода гармонических колебаний в хаотические были выявлены следующие закономерности.

а) $16 \leq n_q \leq 40$ имеется один общий сценарий (см. табл. 1): возникает несоизмеримая частота $\omega_1 = 0,97$, затем с увеличением амплитуды нагрузки возникают две частоты ($\omega_2 = 2,88$, $\omega_3 = 3,38$), зависящие от ω_1 и ω_p : $\omega_2 - \omega_1 = \omega_p - \omega_3$. При дальнейшем движении по амплитуде внешнего воздействия появляющиеся новые частоты образуют линейные комбинации с ω_1 и ω_p . Таким образом, получен квазипериодический сценарий [4] перехода гармонических колебаний в хаотические.

б) Для $n_q = 8,4$ сценарий (табл. 2) заключается в следующем: происходит утроение периода колебаний системы, т.е. помимо частоты возбуждения $\omega_p = 5,3$ возникают две зависимые частоты $\omega_1 = 1,54$ и $\omega_2 = 3,76$. При увеличении амплитуды нагрузки число зависимых частот растет. Система переходит в хаос путем увеличения количества периодов коле-

Таблица 2



бания — 5, 7, 11. Данный сценарий отличается от предыдущего и может быть назван модифицированным сценарием Фейгенбаума, в отличие от классического².

в) Сценарий, при котором $n_q = 12$, можно назвать «пограничным», так как в нем имеют место оба вышеописанных сценария.

2. Далее рассмотрено влияние места приложения нагрузки на характер колебаний системы. Во всех случаях величина полосы внешнего воз-

² Feigenbaum M.J. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations // J. Stat. Phys. 1978. Vol. 19, N 1. P. 25–52.

действия оставалась неизменной $n_q = 4$, а местоположение нагрузки по длине балки изменялось. В первом случае нагрузка прикладывалась с 1 по 4-й отрезок, в каждом последующем область приложения нагрузки смещалась на 2 отрезка вправо (т.е. № 2: 2-6, № 3: 4-8 и т.д., № 9: 16-20).

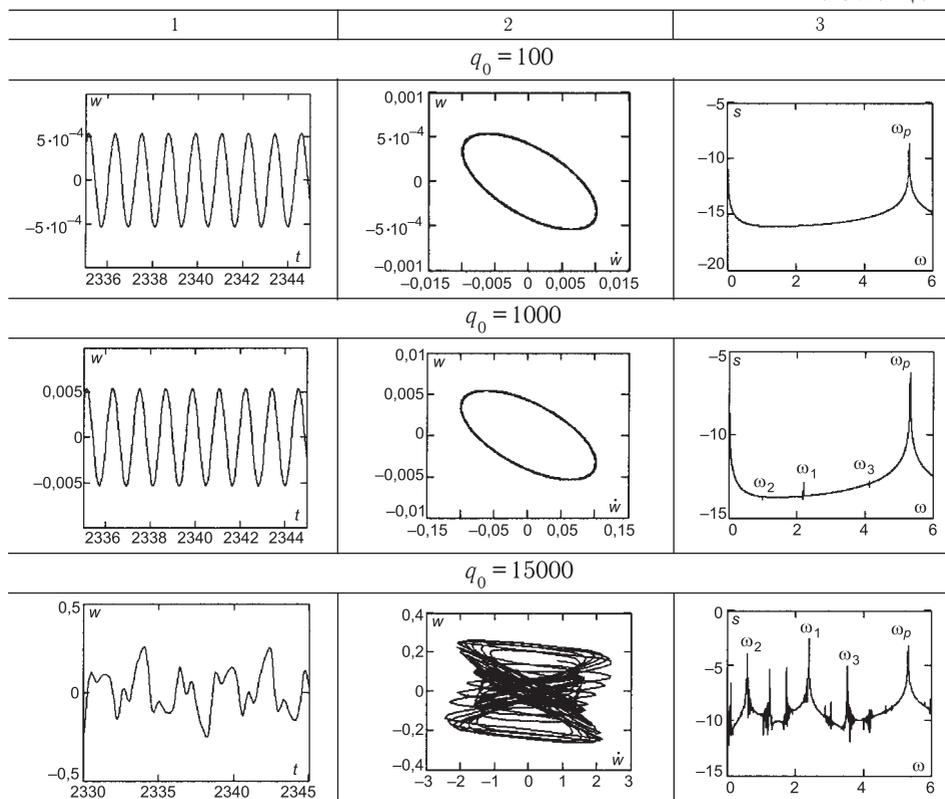
Исследование позволило выявить общие типы сценариев для рассмотренных случаев.

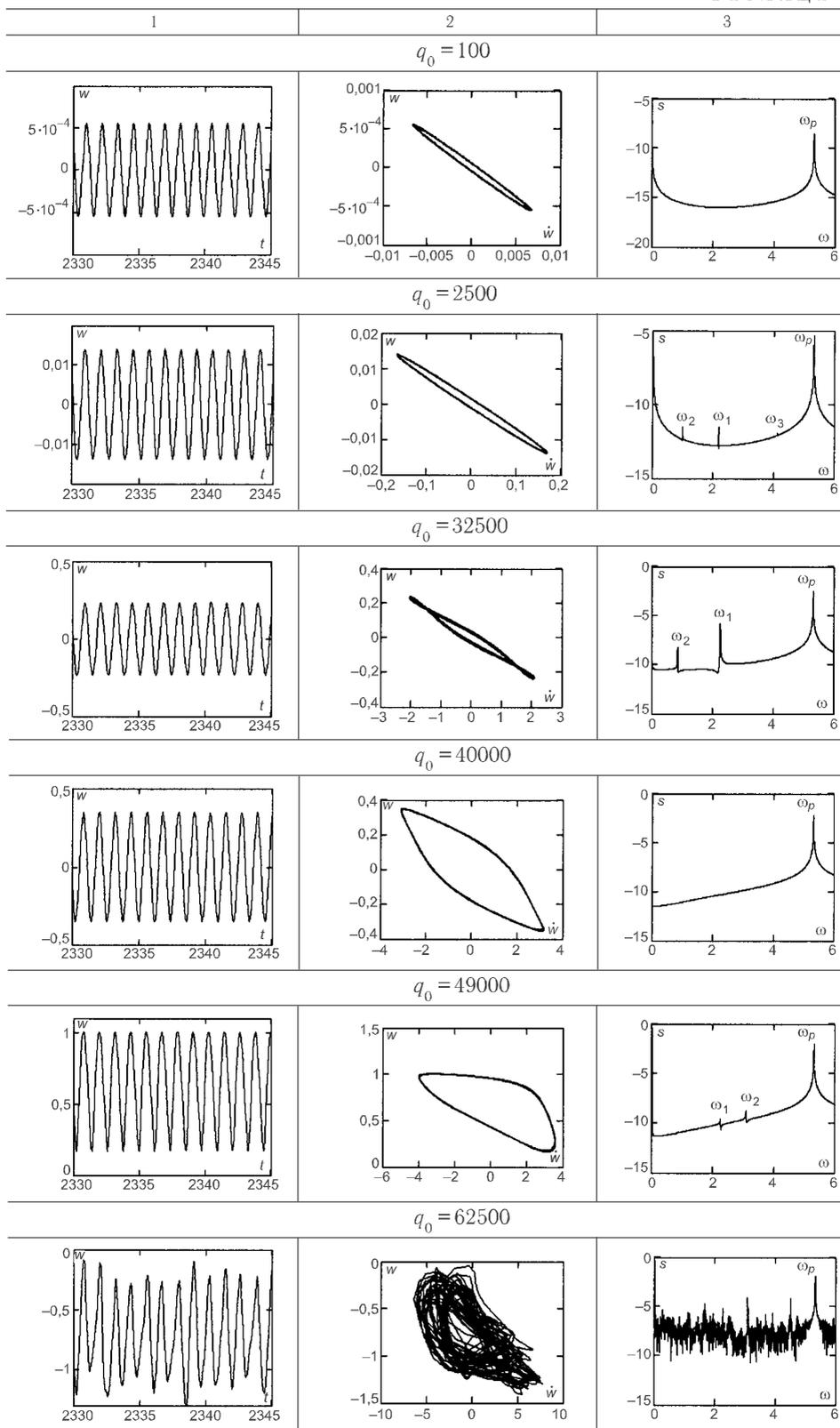
а) Для случаев № 1, 2, 4-7, 9 возникает несоизмеримая частота $\omega_1 = 2,1598$. Затем появляются зависимые частоты $\omega_2 = 0,97561$, $\omega_3 = 4,12$, $\omega_p - \omega_3 = \omega_3 - \omega_2 = 1,18$. Затем в спектре мощности появляются новые частоты, образующие линейные комбинации с ω_1 и ω_p , что при увеличении амплитуды нагрузки приводит систему в состояние хаоса (табл. 3). Сценарий перехода — квазипериодический.

б) В варианте № 3 (4-8 отрезки) при движении по амплитуде нагрузки появляются частоты $\omega_1 = 2,1598$, $\omega_2 = 0,97561$, $\omega_3 = 4,12$, но в отличие от случая а) переход к хаотическим колебаниям не происходит, так как частоты ω_1 , ω_2 , ω_3 пропадают и колебания становятся гармоническими. При дальнейшем увеличении амплитуды нагрузки появляется несоизмеримая частота $\omega_1 = 3,073$, затем $\omega_2 = 2,227$ и образуется линейная комбинация $\omega_p = \omega_1 + \omega_2$. Далее количество линейных комбинаций растет и колебания становятся хаотическими. Данный сценарий можно назвать комбинированным сценарием квазипериодичность–перемежаемость: квазипериодический сценарий с перемежаемостью по параметру — амплитуда нагрузки (табл. 4).

в) Интересен случай № 8. Система три раза меняет равновесное состояние. Трижды происходит уменьшение количества частот колебаний системы вплоть до одночастотных колебаний, при этом в каждом случае присутствует модифицированный сценарий Фейгенбаума (МФ) — увеличения количества периодов колебаний системы (3, 7). Данный сценарий

Таблица 3





также можно назвать комбинированным сценарием МФ-переменяемость: модифицированный сценарий Фейгенбаума с переменяемостью по параметру — амплитуда нагрузки.

Вывод. Место приложения и ширина полосы внешней нагрузки существенно влияют на характер колебаний балки. Были получены квазипериодический сценарий, модифицированный сценарий Фейгенбаума, а также две различные модификации комбинированных сценариев, каждый из которых является новым.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Euler, L. Sur la force des colonnes [Text] / L. Euler // *Memories de L'Academie de Berlin*. — 1757. — Vol. 13. — P. 252–282.
2. Karman, Th. Festigkeitsprobleme in Maschinenbau [Text] / Th. Karman // *Encyklo. D. Math. Wiss.* — 1910. — Vol. 4, N 4. — P. 311–385.
3. Десятова, А.С. Диссипативная динамика геометрически нелинейных балок Бернулли–Эйлера [Text] / А.С. Десятова, М.В. Жигалов, О.А. Салтыкова, В.А. Крысько // *Изв. РАН. МТТ*. — 2008. — № 6. — С. 128–136.
4. Feigenbaum, M.J. Quasiperiodicity in dissipative systems: A renormalization group analysis [Text] / M.J. Feigenbaum, L.P. Kadanoff, S.J. Shenker // *Physica*. — 1982. — V.D.5. — 370 p.

КРЫСЬКО В.А., д-р техн. наук, проф.; E-mail: tak@sun.ru

Саратовский государственный технический университет

ЖИГАЛОВ М.В., канд. техн. наук, доц.; E-mail: ZhigalovM@yandex.ru

Саратовский государственный технический университет

КРЫЛОВА Е.Ю., асп.; E-mail: kat.krylova@bk.ru

Саратовский государственный технический университет

Получено после доработки 12.01.11

Krysko V.A., doctor of technical sciences, professor; E-mail: tak@sun.ru, Saratov State Technical University, Russia

Zhigalov M.V., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ZhigalovM@yandex.ru, Saratov State Technical University, Russia

Krylova E.Yu., post-graduate student; E-mail: kat.krylova@bk.ru, Saratov State Technical University, Russia

THE STUDY OF NONLINEAR DYNAMICS OF BERNOULLI–EULERS BEAMS UNDER LOCAL LOADS

The article is devoted to research scenarios of oscillations passage for nonlinear Bernoulli–Eulers beams under influence of uneven cross alternating loading, from harmonic in chaotic. We received quasi-periodical scenario, modified Feigenbaums scenario and two various modifications of the combined scenarios, each of which is new. Results adequacy confirm by comparison the results which received by using two different methods: finite-element method in Bubnov–Galerkins form and finite difference method $O(h^2)$.

Key words: beams, nonlinear oscillations, scenarios of passage in chaos, dissipative systems, Bernoulli–Eulers beams.

REFERENCES

1. Euler, L. Sur la force des colonnes [Text] / L. Euler // *Memories de L'Academie de Berlin*. — 1757. — Vol. 13. — P. 252–282.
2. Karman, Th. Festigkeitsprobleme in Maschinenbau [Text] / Th. Karman // *Encyklo. D. Math. Wiss.* — 1910. — Vol. 4, N 4. — P. 311–385.
3. Desyatova, A.S. Dissipation dynamics of geometrical nonlinear beams of Bernoulli–Eulers [Text] / A.S. Desyatova, M.V. Zhigalov, O.A. Saltykova, V.A. Krysko // *Izv. RAN. MTT*. — 2008. — N 6. — P. 128–136.
4. Feigenbaum, M.J. Quasiperiodicity in dissipative systems: A renormalization group analysis [Text] / M.J. Feigenbaum, L.P. Kadanoff, S.J. Shenker // *Physica*. — 1982. — V.D.5. — 370 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.31:678.06

Ш.М. РАХИМБАЕВ, Н.М. ТОЛЫПИНА

О ВЛИЯНИИ ЗНАКА ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА РАЗЖИЖАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ

Исследовано влияние мелкого заполнителя с различным зарядом поверхности на разжижающую способность суперпластификаторов анионного типа в мелкозернистых бетонах.

Ключевые слова: суперпластификатор, мелкий заполнитель, распыл конуса, перлит, кварцевый песок, дзета-потенциал.

В ранее проведенных авторами исследованиях [1] было установлено, что разжижающая способность суперпластификаторов зависит от вида применяемого мелкого заполнителя, а именно знака заряда его поверхности. При этом анионоактивные добавки (на долю которых приходится более 70–80 % известных ПАВ) обеспечивают лучший разжижающий эффект в смесях с положительно заряженным мелким заполнителем. В связи с этим необходимо применять пластификаторы, функциональные группы которых имеют разноименный заряд с поверхностью частиц заполнителя. Если преобладающий знак заряда поверхности частиц заполнителя и функциональной группы суперпластификатора совпадает, то отощение бетонной смеси приводит к ослаблению действия суперпластификатора, так как последний разжижает лишь вяжущее, но не заполнитель.

Наилучшими добавками для тощих бетонных смесей, содержащих гранит, кварцевый песок или другой мелкий заполнитель с отрицательно заряженной поверхностью, являются катионоактивные пластификаторы. Однако такие добавки в настоящее время отсутствуют, и неясно, как они влияют на процессы твердения. В данных случаях можно использовать неионогенные добавки, имеющие положительный эффективный заряд функциональных групп. Одна из таких добавок рассмотрена в работе [2]. Необходимы дальнейшие исследования в этом направлении.

Цель данной работы — изучение эффективности действия анионоактивных суперпластификаторов в смесях мелкозернистого бетона на мелком заполнителе, дзета-потенциал поверхности которого близок к нейтральному. В качестве мелкого заполнителя использовали дробленый природный перлит.

Для исследований были использованы материалы: портландцемент ПЦ 500 Д0 (ЗАО «Белгородский цемент»), суперпластификатор С-3, гиперпластификатор Мельфлюкс 5561, кварцевый песок Нижнеольшанского месторождения, мелкий заполнитель, полученный дроблением перлита Мухор-Талинского месторождения на лабораторной щековой дробилке.

Удельная поверхность ПЦ 500 Д0 — 310 м²/кг, гранулометрический состав, определяемый методом лазерной гранулометрии на оборудовании MicroSizer 201, показал наличие частиц размером 0–5 мкм — 9,3 %, 5–30 мкм — 31 %. Модуль крупности (ГОСТ 8735–88) применяемого мелкого заполнителя составил для кварцевого песка $M_{кр} = 1,26$, для перлитового — $M_{кр} = 2,5$.

Влияние добавок-пластификаторов на разжижающую способность цементно-песчаных смесей определяли по расплыву конуса (РК) в соответствии с ГОСТ 310.4–81. Несмотря на повышенное значение модуля крупности перлитового заполнителя по сравнению с кварцевым песком, водопотребность первого существенно выше. По-видимому, это обусловлено проявлением эффекта активного заполнителя еще на стадии приготовления мелкозернистого бетона.

Измерения дзета-потенциала кварцевого песка и перлита проводили на оборудовании Zetasizer Nano ZS при помощи методики МЗ-PALS, запатентованной компанией Malvern. Функционирование системы Zetasizer Nano ZS полностью автоматизировано.

Как видно из рис. 1 по максимальным пикам на кривых, преобладающий заряд поверхности у кварцевого песка соответствует $-31,6$ мV, у перлита $+4,17$ мV. Суммарное значение ξ -потенциала у кварцевого песка равно -29 мV, у перлита $-0,5$ мV. Это объясняется тем, что перлит содержит 14,7 % Al_2O_3 и 7,3 % щелочей. В небольших количествах встречаются активные центры противоположного знака: у кварцевого песка $+3,13$ мV (7,9 %), у перлита $-82,3$ мV (3,1 %).

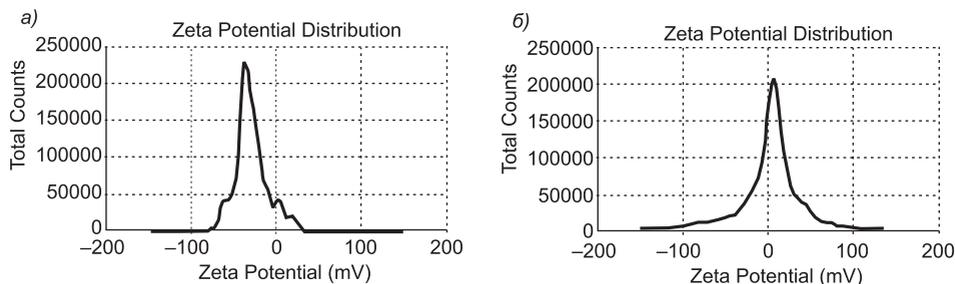


Рис. 1. Дзета-потенциал поверхности кварцевого песка и перлита
а — кварцевый песок; б — перлит

Исследования показали, что смеси на перлитовом песке составов перлит: цемент = 2:1, 3:1 и 4:1 разжижаются добавкой С-3 (анионактивной) в большей степени, чем на кварцевом песке (рис. 2).

При дозировке С-3 0,25 % расплыв конуса у смесей на перлите больше, чем на кварцевом песке: на 17,2 % (2:1), на 5,6 (3:1), на 4,16 % (4:1). С ростом дозировки С-3 эта разница возрастала. При дозировке 1 % С-3 расплыв конуса у смесей на перлитовом заполнителе был больше, чем на кварцевом песке на 40,6 % (2:1), на 35,5 (3:1), на 30 % (4:1). Такая особенность разжижения позволяет предположить, что, применяя С-3 на цементно-перлитовых смесях, можно добиться существенного снижения В/Ц по сравнению с кварцевым песком, обеспечивая этим более плотную структуру цементного камня.

Были проведены исследования по изменению расплыва конуса цементно-песчаных смесей при неизменном содержании добавки С-3 в смеси (1,2 г С-3 на 720 г смеси, т.е. 0,16 % от массы всей смеси), в которых

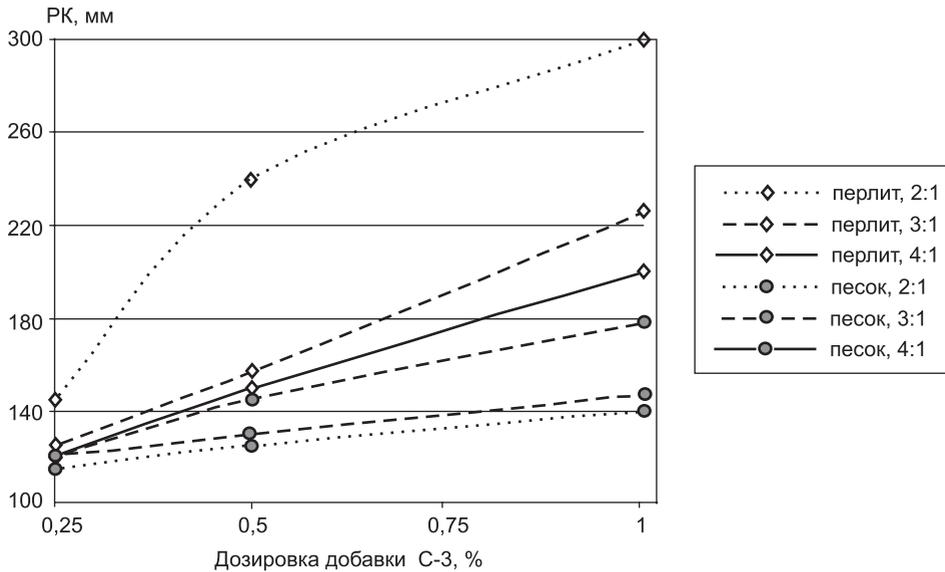


Рис. 2. Эффективность разжижения добавкой С-3 цементно-песчаных смесей различного состава на перлитовом и кварцевом песке

соотношение П:Ц менялось от 2:1 к 6:1. Полученные результаты приведены на рис. 3.

С ростом содержания кварцевого песка в смеси при постоянном расходе добавки С-3 расплыв конуса уменьшался от 150 (2:1) до 138 мм (4:1). На перлитовом песке эта зависимость носила экстремальный характер: расплыв конуса сначала увеличивался от 190 (2:1) до 245 мм (4:1), при дальнейшем отощении смеси перлитом расплыв конуса уменьшался до 200 (5:1) и 135 мм (6:1). Расплыв конуса на перлитовом песке превышал расплыв конуса на кварцевом песке на 23,6 % (2:1), на 28,6 (3:1), на 43,6 % (4:1).

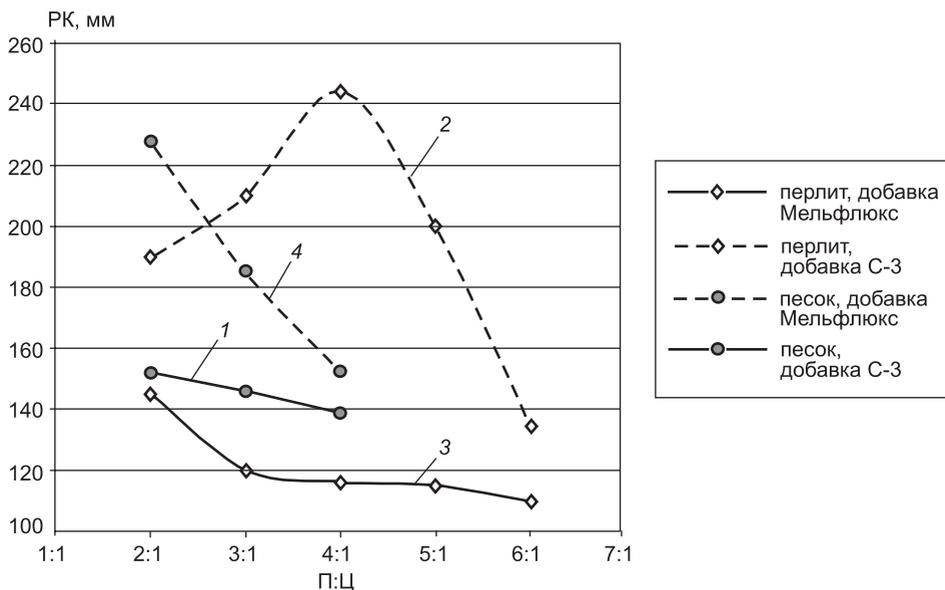


Рис. 3. Влияние вида заполнителя на разжижающую способность суперпластификаторов в цементно-песчаных смесях: С-3 (0,16 % от массы всей смеси), Мельфлюкс 5561 (0,08 % от массы всей смеси)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимаев, Ш.М. Влияние вида заполнителя на эффективность действия суперпластификатора С-3 [Текст] / Ш.М. Рахимаев, Е.Н. Хахалева // Архитектурно-строительное материаловедение на рубеже веков: матер. Междунар. интернет-конф. — Белгород : Изд-во БелГТАСМ, 2002. — С. 147–150.
2. Матвиенко, О.И. Цементные системы с добавкой экологически чистых модификаторов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Матвиенко Ольга Ивановна. — Белгород : БелГТАСМ, 1999. — 160 с.
3. Рахимаев, Ш.М. Регулирование технических свойств тампонажных растворов [Текст] / Ш.М. Рахимаев. — Ташкент : Фан, 1976. — 159 с.

РАХИМБАЕВ Ш.М., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ТОЛЫПИНА Н.М., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено после доработки 24.01.11

Rakhimbaev Sh.M., doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Tolykina N.M., candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

ABOUT INFLUENCE OF THE SIGN ON THE CHARGE OF THE FILLER ON DILUTING ABILITY OF SUPERSOFTENERS

Influence of a small filler with a various charge of a surface on diluting ability of supersofterners the electronegative type in fine-grained concrete is investigated.

Key words: supersofterner, a small filler, fine aggregate wreathed cone, a perlite, quartz sand, dzeta-potential.

REFERENCES

1. Rakhimbaev, Sh.M. Influence of filler on the effectiveness of superplasticizer C-3 [Text] / Sh.M. Rakhimbaev, E.N. Hahaleva // Architecture and building materials at the turn of the century : proceedings of the international internet conference. — Belgorod : Izd. BelGTASM, 2002. — P. 147–150.
2. Matvienko, O.I. Cement systems with an additive of non-polluting modifiers [Text] : dis. ... cand. tech. sci. : 05.23.05 / Matvienko Olga Ivanovna. — Belgorod : BelGTASM, 1999. — 160 p.
3. Rakhimbaev, Sh.M. Regulation of technical properties for cementation of chinks solutions [Text] / Sh.M. Rakhimbaev. — Tashkent : Fan, 1976. — 159 p.

УДК 691.327.002.3

В.М. ФЕДОРОВ, А.М. ПИТЕРСКИЙ

**ТОНКОДИСПЕРСНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ
В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ БЕТОНЕ**

Показана целесообразность применения золы-унос и керамзитовой пыли в бетоне плит и труб, широко используемых на проводящих сетях оросительных систем, системах водоснабжения и водоотведения. Наряду с повышением эксплуатационных показателей бетона достигнуто снижение расхода цемента и повышение качества изделий.

Ключевые слова: добавки, микронаполнитель, отходы, зола, керамзитовая пыль, плиты, трубы, бетон, трещиностойкость, долговечность, прочность, математическая модель, факторы.

Для экономии цемента в состав бетонной смеси нередко вводят добавки микронаполнителей [1]. Наиболее желательно было бы применение молотых минеральных материалов. Но использование их в смесях приводит к повышению себестоимости бетонных и железобетонных элементов. Поэтому, учитывая особенности сырьевой базы Северо-Кавказского региона, большой практический интерес представляет изучение возможности применения в качестве микронаполнителей тонкодисперсных промышленных отходов. О целесообразности такого направления исследований свидетельствует тот факт, что только на региональных керамзитовых заводах ежемесячно вывозится в отвалы порядка 170 т керамзитовой пыли, а Новочеркасская ГРЭС является крупнейшим поставщиком золы-унос, отгрузка которой может производиться практически в неограниченных количествах.

В связи с вышеизложенным в задачу исследований входило выявление влияния тонкодисперсных промышленных отходов (золы-унос, керамзитовой пыли) на эксплуатационные качества гидротехнического бетона плит и труб, широко используемых на проводящих сетях оросительных систем, системах водоснабжения и водоотведения.

Железобетонные плиты креплений и плиты покрытий работают в сложных условиях, подвергаясь попеременному водонасыщению и высушиванию, отрицательно влияющих на их эксплуатационные свойства, прежде всего на трещиностойкость и долговечность. Указанные свойства оценивались на основе изменения прочности при изгибе бетонных образцов, находящихся в среде с переменной влажностью окружающей среды [2]. При этом сравнивались прочностные показатели при изгибе затвердевших образцов после насыщения их водой с прочностными показателями аналогичных образцов после насыщения их водой и дополнительного выдерживания в воздушно-сухих условиях при относительной влажности воздуха от 40 до 60 % в течение от 12 до 36 ч, и по полученным коэффициентам оценивались трещиностойкость и долговечность исследуемых бетонов.

Для выяснения влияния добавки золы-унос на трещиностойкость и долговечность бетона был использован двухфакторный симплекс-суммируемый план на правильном шестиугольнике. Этот план, несмотря на то

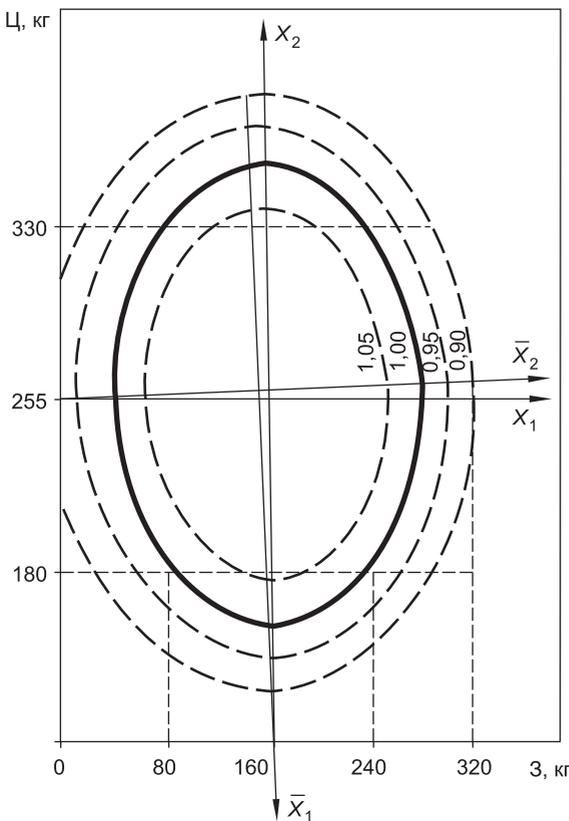
что не является оптимальным по статистическим характеристикам, выбран из-за его экономичности. По результатам всего семи опытов он позволяет получить квадратичные двухфакторные модели исследуемых систем. Выбранный в качестве исследуемых факторов расход золы-унос в смесях (фактор X_1) варьировался в диапазоне от 0 до 320 кг/м³, а расход цемента (фактор X_2) с учетом составов бетона плит изменялся в опытах от 180 до 330 кг/м³.

Для каждого из опытов изготавливались шесть образцов-призм 40×40×160 мм. Далее образцы пропаривались и погружались в воду для полного насыщения водой. По истечении двух суток по три образца каждого из семи составов испытывались на изгиб ($R_{и}^{вл}$). Остальные три образца после извлечения из воды дополнительно, в течение 36 ч, выдерживались в воздушно-сухих условиях, после чего также испытывались на изгиб ($R_{и}^{сух}$). Трещиностойкость и долговечность согласно [2] оценивались величиной $K_{тр} = R_{и}^{вл} / R_{и}^{сух}$. В результате обработки экспериментальных данных и расчета по известной методике [3] коэффициентов уравнения регрессии была получена начальная математическая модель $\hat{y}_k = 10^2 \cdot K_{тр}$:

$$\hat{y}_k = 115 - 3,7X_1 + 0,7X_2 - 24,5X_1^2 - 10,5X_2^2 - 1,3X_1X_2. \quad (1)$$

Расчет критических величин коэффициентов и исключение статистически незначимого (b_2) позволили получить конечную математическую модель ($F_a = 2,7 < F_T = 3,8$) и построить ее геометрический образ (см. рисунок):

$$\hat{y}_k = 115 - 3,7X_1 - 24,5X_1^2 - 10,5X_2^2 - 1,3X_1X_2. \quad (2)$$



Геометрический образ величины $K_{тр}$

Анализ математической модели (2) и ее геометрического образа показал, что равнопрочность ($K_{тр} = 1$) бетонных образцов, находящихся в среде с переменной влажностью окружающей среды, наблюдается в широком диапазоне расходов золы-унос. Учитывая целесообразность максимального использования летучих зол в бетонах независимо от их марки, количество золы-унос на 1 м³ смеси может быть доведено до 240–280 кг. Дальнейшее увеличение расхода золы-унос приводит к снижению трещиностойкости и долговечности бетона. Таким образом, введение летучих зол в бетонные смеси в оптимальных количествах обеспечивает не только экономное расходование цемента, но и повышает трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных

элементов (конструкций), работающих в условиях переменной влажности, характерных для водохозяйственных объектов.

В отличие от обычного бетона использование добавки золы в составе центрифугированного бетона железобетонных труб не привело к повышению эксплуатационных качеств бетона. Возможно, это связано с распределением частиц в процессе центрифугирования бетонной смеси. Под действием центробежных сил мельчайшие частицы золы, близкие по размерам к коллоидным, могут удаляться из бетонной смеси вместе с избыточной водой затворения, отжимаемой при центрифугировании из бетонной смеси. В связи с этим было принято решение отказаться от использования золы в составе центрифугированного бетона железобетонных труб и исследовать влияние добавки керамзитовой пыли на свойства центрифугированного бетона.

Керамзитовая пыль вводилась в бетонную смесь заводского состава взамен части песка (или цемента). Количество воды затворения в каждом опыте подбирали экспериментально из условия получения равноподвижных смесей. Из приготовленных бетонных смесей формовали образцы-призмы $40 \times 40 \times 160$ мм и цилиндры диаметром и высотой 30 мм. Цилиндры формовали на лабораторной центрифуге в специальных формах. Затем образцы подвергались тепловлажностной обработке по режиму 4+3+6+4. Далее призмы испытывали на изгиб, их половинки на сжатие, а цилиндры — на раскалывание вдоль образующей. Результаты испытаний приведены в таблице.

Как следует из представленных в таблице данных, добавка керамзитовой пыли позволяет без снижения прочностных показателей сократить расход цемента на 25 %. При введении добавки керамзитовой пыли не за счет цемента, а за счет части песка прочностные показатели балочек повышаются в большей мере, чем центрифугированных цилиндров. Оптимальная дозировка добавки керамзитовой пыли находится в пределах $100\text{--}160$ кг/м³ (20–30 % от массы цемента). При этом прочность центрифугированных образцов на растяжение при раскалывании повышается на 25–40 % без снижения расхода цемента.

На материалах завода напорных труб были изготовлены образцы центрифугированных бетонных труб диаметром 180 мм, длиной 300 мм с добавкой керамзитовой пыли в количестве 25 % от массы цемента, вводимой за счет частичной замены песка и для получения сравнительных данных — без керамзитовой пыли. Опытные образцы труб после пропаривания подвергали

Результаты испытаний

№ состава	Цемент, кг/м ³	Керамзитовая пыль (КП)		Прочность образцов после ТВО					
				$R_{и}$		$R_{сж}$		усилие на раскалывание	
		кг/м ³	% от массы Ц	МПа	%	МПа	%	Н	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	517	—	0	2,96	100	12,8	100	2785	100
2	385	130	25	3,00	102	12,4	97	2896	104
3	372	158	30	2,72	92	10,1	79	2613	94
4	525	53	10	3,67	124	17,6	137	3287	118
5	525	103	20	3,52	119	17,1	134	3537	127
6	525	130	25	3,78	128	16,2	126	3928	141
7	525	158	30	3,89	132	16,8	131	3815	137
8	525	185	35	—	—	—	—	3120	112
9	525	210	40	3,44	120	14,3	112	2590	93
10	525	310	50	2,98	101	13,2	103	2005	72

испытаниям на гидростатическое давление. Образец без добавки выдержал давление 0,5 МПа, а труба с добавкой 25 % керамзитовой пыли разрушилась при давлении воды в ней 0,9 МПа. Добавка керамзитовой пыли повысила прочность на растяжение центрифугированного бетона на 80 %.

Испытания изготовленных в кольцевых формах одновременно с формированием труб бетонных образцов показали, что опытный состав центрифугированного бетона с добавкой 25 % керамзитовой пыли по сравнению с контрольным (заводским) прочнее при раскалывании на 17–20 %. Водопоглощение бетона с добавкой на 0,5–0,7 % ниже, чем контрольного. Таким образом, введение добавки керамзитовой пыли в состав центрифугированного бетона железобетонных труб позволяет существенно повысить его прочностные показатели, на 15–20 % снизить расход цемента без ухудшения прочности бетона, повысить трещиностойкость и водонепроницаемость труб, улучшить их качество и снизить процент брака при изготовлении труб по существующей технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов, Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий [Текст] / Ю.М. Баженов, А.Г. Комар. — М. : Стройиздат, 1984. — 672 с.
2. А.С. 346668, СССР. Способ определения долговечности бетона [Текст] / А.Е. Шейкин. : Оpubл. 14.10.1973 ; Бюл. № 37. — С. 57.
3. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях [Текст] / В.А. Вознесенский. — М. : Финансы и статистика, 1981. — 262 с.

ФЕДОРОВ В.М., канд. техн. наук, проф.

Новочеркасская государственная мелиоративная академия

ПИТЕРСКИЙ А.М., канд. техн. наук, проф.

Новочеркасская государственная мелиоративная академия

Получено после доработки 07.12.10

Fedorov V.M., candidate of technical sciences, professor, NovoCherkassk State Meliorative Academy, Russia

Pitersky A.M., candidate of technical sciences, professor, NovoCherkassk State Meliorative Academy, Russia

TONKODISPERSNYE INDUSTRIAL WASTES IN HYDRAULIC ENGINEERING CONCRETE

The expediency of application of ashes-ablation and haydite is shown a dust in concrete of plates and the pipes widely used on spending networks of irrigating systems, water supply and water removal systems. Along with increase of operational indicators of concrete decrease in the expense of cement and improvement of quality of products is reached.

Key words: additives, a microfiller, a waste, ashes, haydite dust, plates, pipes, concrete, crack resistance, longevity, durability, mathematical model, factors.

REFERENCES

1. Bazhenov, Yu.M. Technolog of concrete and ferro-concrete products [Text] / Yu.M. Bazhenov, A.G. Komar. — M. : Stroyizdat, 1984. — 672 p.
2. A.S. 346668, SSSR. Way definitions of durability of concrete [Text] / A.E. Shejkin : published 14.10.1973 ; Bull. N 37. — P. 57.
3. Voznesensky, V.A. Statistical methods of planning of experiment in technical and economic researches [Text] / V.A. Voznesensky. — M. : Finance and statistics, 1981. — 262 p.

УДК 691.51/55

О.А. МИРЮК

**ВЛИЯНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА
НА СВОЙСТВА СУЛЬФОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Исследована возможность повышения прочности и водостойкости композиций за счет сочетания строительного гипса и каустического магнезита при затворении растворами $MgCl_2$ или $MgSO_4$.

Ключевые слова: каустический магнезит, строительный гипс, сульфомагнезиальные композиции, твердение, водостойкость.

Магнезиальные вяжущие — эффективная разновидность малоэнергоемких материалов, характеризующаяся интенсивным твердением, высокими прочностными показателями. Ограниченность запасов магнезиальных пород обуславливает дефицит каустического магнезита и предопределяет целесообразность получения смешанных сульфомагнезиальных вяжущих.

Цель работы — синтез и исследование сульфомагнезиальных композиций различного вещественного состава.

В экспериментах использованы каустический магнезит ПМК-75 и строительный гипс марки Г-5АII. Вяжущие композиции готовили путем тщательного смешения тонкомолотых компонентов. В качестве затворителя использованы растворы хлорида и сульфата магния различной плотности. Прочностные свойства определены на образцах размером $20 \times 20 \times 20$ мм, изготовленных из теста нормальной густоты. Фазовый состав затвердевших материалов оценивали дифрактометрическим методом анализа. Строение камня исследовали с помощью электронной микроскопии.

При исследовании композиций «каустический магнезит — строительный гипс» выявлено [1], что введение полугидрата сульфата кальция способствует уменьшению водопотребности и удлинению сроков схватывания вяжущего. Отмечено, что замена до 60 % каустического магнезита гипсовым компонентом не ухудшает характеристик композиций, прочность некоторых из них превосходит показатели каустического магнезита на 25 %.

На примере смешанного магнезиального вяжущего с 40 % полугидрата сульфата кальция исследовано влияние состава и концентрации затворителя. Композиции затворяли растворами хлорида и сульфата магния плотностью $1200\text{--}1280$ кг/м³ (см. таблицу). Результаты экспериментов свидетельствуют, что состав раствора соли мало влияет на водопотребность вяжущих, которая достигает 46–47 %. Композиции на основе раствора сульфата магния отличаются быстрым схватыванием, например, при использовании затворителей одинаковой плотности начало схватывания теста на основе $MgSO_4$ составляет 10 мин, на основе $MgCl_2$ — 30 мин.

Вид затворителя существенно влияет на характер твердения, фазовый состав и строение камня сульфомагнезиального вяжущего. Изменение плотности растворов обеих солей от 1200 до 1240 кг/м³ сопровождается упрочнением камня в возрасте 1 сут в 1,5–2,0 раза. Дальнейшее увеличение кон-

Влияние вида затворителя на состав и свойства сульфомагнезиального камня

Затворитель		Возраст, сут	Предел прочности при сжатии, МПа	Интенсивность отражений фаз на дифрактограмме, отн. ед.					
соль	плотность раствора, кг/м ³			MgO (0,211 нм)	Mg(OH) ₂ (0,483 нм)	5Mg(OH) ₂ ·MgCl ₂ ·8H ₂ O (0,419 нм) / 3Mg(OH) ₂ ·MgSO ₄ ·8H ₂ O (0,517 нм)	CaSO ₄ ·0,5H ₂ O (0,604 нм)	CaSO ₄ ·2H ₂ O (0,430 нм)	
MgCl ₂	1240	1	45	88	35	74 / нет	100	24	
		7	55	82	40	81 / нет	82	27	
		28	85	81	28	87 / нет	76	36	
		90	93	77	35	71 / нет	65	36	
MgCl ₂	1200	7	42	85	56	65 / нет	38	46	
		1240	7	55	83	40	81 / нет	82	27
		1280	7	80	82	35	100 / нет	88	24
MgSO ₄	1200	7	27	100	93	нет / 100	0	100	
		1240	7	35	95	98	нет / 85	7	96
		1280	7	58	93	100	нет / 60	10	91

центрации затворителя в меньшей степени повышает показатели прочности (см. таблицу). Для композиций продолжительного твердения зависимость прочности камня от плотности затворителя менее выразительна.

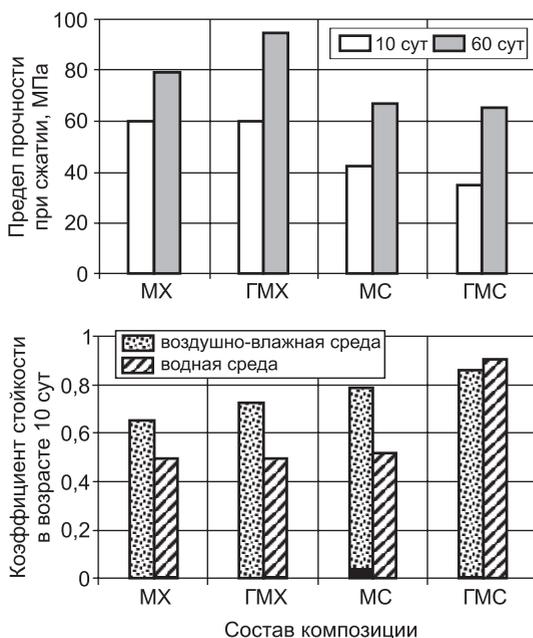
В составе затвердевшего сульфомагнезиального вяжущего присутствуют фазы, характерные для самостоятельной гидратации компонентов, а также гидратные комплексы в виде двойных или тройных солей.

Сопоставление состава и свойств композиций, отличающихся затворителем, позволило отметить наибольшую гидратационную активность оксида магния при использовании высококонцентрированного раствора хлорида магния (см. таблицу). При этом реакционная способность MgO проявляет повышенную зависимость от увеличения плотности раствора MgSO₄, мало изменяясь при росте плотности раствора MgCl₂.

Для активной гидратации гипсовой составляющей композиции предпочтителен раствор MgSO₄ пониженной плотности, который обеспечивает завершение процесса в ранние сроки. Увеличение концентрации обеих солей, особенно хлорида магния, замедляет гидратацию полуводного гипса.

Рис. 1. Влияние вещественного состава вяжущего на прочность и водостойкость камня (плотность затворителя 1240 кг/м³)

Состав композиции: МХ — каустический магнезит, затворитель — раствор хлорида магния; МС — каустический магнезит, затворитель — раствор сульфата магния; ГМХ — гипсомагнезиальное вяжущее, затворитель — раствор хлорида магния; ГМС — гипсомагнезиальное вяжущее, затворитель — раствор сульфата магния



Наибольшая роль в упрочнении композиции принадлежит виду гидратов, формирующих структуру сульфомагнезиального камня. Использование раствора MgCl₂ способствует интенсив-

ному твердению и увеличению прочности камня различного возраста в среднем на 20–70 % по сравнению с композицией, затворенной раствором $MgSO_4$ (см. рис. 1; таблицу).

Твердение сульфомагнезиального оксихлоридного вяжущего сопровождается образованием гидроксихлорида магния $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$, гидроксида магния $Mg(OH)_2$. При повышении плотности затворителя значительная часть оксида магния преобразуется в гидроксихлориды, и почти на 30–40 % уменьшается содержание гидроксида магния; формируется также $Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 2MgCO_3 \cdot 6H_2O$ [2]. С увеличением плотности $MgCl_2$ снижается степень гидратации полугидрата сульфата кальция, образуется меньшее количество (см. таблицу) и как результат минимизируется вклад двухводного гипса в формирование первичного каркаса камня вяжущего.

Замедленная гидратация полуводного гипса, обусловленная повышением концентрации оксида и хлорида магния, обеспечивает плавный характер кристаллизации двухводного гипса, способствующий уплотнению и повышению стойкости камня вяжущего. Повышение прочности образцов в отдаленные сроки твердения, по-видимому, обусловлено уплотнением структуры камня за счет продолжающейся гидратации и усиления сцепления гидратов.

Затворение сульфомагнезиальной композиции раствором $MgSO_4$ сопровождается энергичной гидратацией гипсовой составляющей (см. таблицу). Значительная часть оксида магния в композициях, затворенных сульфатом магния, преобразуется в гидроксид магния.

Исследования сульфомагнезиальных вяжущих длительного твердения показали, что после 10 лет пребывания на воздухе различия в показателях прочности композиций стали менее выразительными, при этом качественный состав материалов мало изменился. По данным дифрактометрического анализа (рис. 2), камень вяжущего, затворенного раствором $MgCl_2$, состоит из гидроксихлоридов магния $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ и $3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$, гидроксида магния, двухводного гипса. С увеличением концентрации раствора $MgCl_2$ растет степень гидратации MgO , повышается содержание гидроксихлоридов магния, стабильных при длительном твердении; снижение гидратационной активности полугидрата сульфата кальция обуславливает уменьшение доли двухводного гипса. При использовании высококонцентрированного хлоридного затворителя формируется крупноблочная структура сульфомагнезиального камня (рис. 3).



Рис. 2. Влияние вида затворителя на содержание основных фаз сульфомагнезиального камня длительного твердения

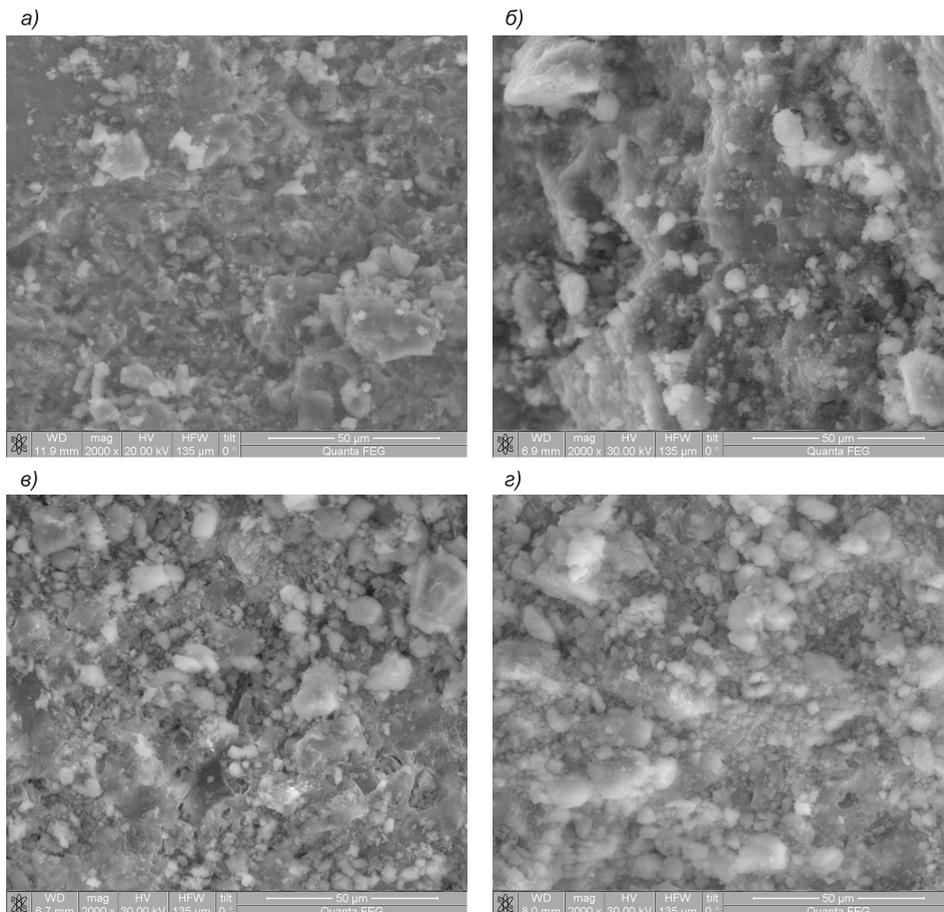


Рис. 3. Микроструктура сульфомagneзиального камня длительного твердения
 Затворитель — раствор $MgCl_2$: а — плотность 1200 кг/м^3 ; б — плотность 1280 кг/м^3 .
 Затворитель — раствор $MgSO_4$: в — плотность 1200 кг/м^3 ; г — плотность 1280 кг/м^3

Фазовый состав камня на основе сульфатного затворителя отличается повышенной долей негидратированного оксида магния; большим содержанием гидроксида магния, количество которого не зависит от плотности раствора соли. В затвердевшей композиции присутствуют гидросульфатно-магнезиальные комплексы $3Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 8H_2O$ (плотность раствора 1200 кг/м^3) и $3(Mg_6(OH)_{10} \cdot SO_4) \cdot H_2O$ (плотность раствора 1280 кг/м^3). Использование сульфатного затворителя обеспечивает формирование максимально возможного количества двухводного гипса, которое вчетверо превосходит аналогичный показатель камня оксихлоридного твердения (см. рис. 2).

Известно, что при длительном хранении во влажных условиях прочность гипсовых и магнезиальных материалов уменьшается.

Исследовано влияние условий твердения на прочность камня вяжущих различного состава. Для данного эксперимента принята методика: после предварительного твердения на воздухе в течение 3 сут образцы делили на три группы, которые помещали в различные условия (вода; воздушно-влажная среда с влажностью 80–85 %; воздух). Образцы хранили в указанных средах в течение различного времени (2–60 сут) для изучения характера изменений состава и структуры камня. По результатам одного из испытаний определяли коэффициент стойкости — отноше-

ние прочности камня после пребывания в водной (воздушно-влажной) среде к прочности камня воздушного твердения (см. рис. 1).

Анализ экспериментальных данных выявил повышенную стойкость сульфомагнезиального вяжущего к действию сред с повышенной влажностью. В отличие от образцов каустического магнезита, растрескавшихся после 7 сут водного хранения, образцы исследуемых сульфомагнезиальных композиций сохранили целостность структуры.

Повышенная устойчивость камня каустического магнезита и сульфомагнезиального вяжущего, затворенных раствором сульфата магния, к воздействию влажной среды обусловлена повышенной долей гидратов, склонных к расширению и обеспечивших уплотнение твердеющей структуры.

Разработанные сульфомагнезиальные композиции рекомендованы для изготовления мелкоштучных изделий плотной и ячеистой структуры.

Предварительные исследования пены, полученной на основе раствора хлорида магния с различной плотностью и пенообразователя «Унипор», показали, что для формирования устойчивой мелкопористой структуры предпочтителен затворитель плотностью 1200 кг/м³. При увеличении плотности раствора хлорида магния от 1100 до 1250 кг/м³ плотность пены возрастает от 190 до 260 кг/м³, кратность снижается с 6 до 5; истечение жидкости из пены (за 80 мин) сокращается вдвое.

На основе магнезиальных вяжущих оксихлоридного твердения готовили пеномассу по одностадийному методу: суспензию, полученную перемешиванием всех компонентов, вспенивали в миксерном смесителе.

При использовании природного протеинового пеноконцентрата «Унипор» сульфомагнезиальная композиция, в отличие от каустического магнезита, проявляет слабую способность к вспениванию, а полученный пенобетон имеет низкую прочность.

Использование ряда синтетических пенообразователей ухудшает свойства пеномассы из магнезиальной суспензии на основе солевого раствора, резко снижает выход пеномассы.

Неоднозначность влияния пеноконцентратов различного происхождения на составляющие композиции обусловила предпочтительность отдельного приготовления сульфомагнезиальных пенобетонных смесей. Магнезиальную пеномассу, предварительно полученную на солевом затворителе и протеиновом пеноконцентрате, смешивали с гипсовой пеномассой, одновременно приготовленной на водном растворе синтетического пеноконцентрата. Пеномассы готовили в смесителе миксерного типа в течение 40 с. Раздельное приготовление пеномасс позволяет использовать композиции, содержащие до 30 % строительного гипса, для получения сульфомагнезиальных пенобетонов, не уступающих по прочности магнезиальным.

Выводы. Эффективность сульфомагнезиальных композиций определяется возможностью замены значительной части дефицитного каустического магнезита строительным гипсом при сохранении характеристик материала.

Определяющее влияние на твердение композиций оказывает вид гидратов, который обусловлен составом и концентрацией затворителя.

Интенсивное твердение на воздухе обеспечивают гидроксхлориды магния при затворении композиций раствором MgCl₂ высокой плотности.

Повышенная стойкость камня к действию воды достигается уплотнением структуры камня за счет увеличения доли расширяющихся гидратов, образующихся при затворении композиций раствором $MgSO_4$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мирюк, О.А. Вяжущие вещества из техногенного сырья [Текст] / О.А. Мирюк, И.С. Ахметов. — Рудный : Рудненский индустриальный ин-т, 2002. — 250 с.
2. Мирюк, О.А. Влияние состава минерального компонента на твердение магниевой композиции [Текст] / О.А. Мирюк // Новости науки Казахстана. — 2006. — № 2. — С. 115–120.

*МИРЮК О.А., д-р техн. наук, проф.; E-mail: psm58@mail.ru
Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Казахстан*

Получено 11.01.11

Miryuk O.A., doctor of technical sciences, professor; E-mail: psm58@mail.ru, Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan

INFLUENCE OF MATERIAL STRUCTURE ON PROPERTIES SULFOMAGNESIUM COMPOSITIONS

The possibility of strength increasing and water resistance of composition at expense combining of construction gypsum with caustic magnesite and mixing with $MgCl_2$ or $MgSO_4$ solution is determined.

Key words: caustic magnesite, construction gypsum, sulfomagnesium compositions, hardening, water resistance.

REFERENCES

1. Miryuk, O.A. Binders from technogenic raw [Text] / O.A. Miryuk, I.S. Akhmetov. — Rudny : Rudny Industrial Institute, 2002. — 250 p.
2. Miryuk, O.A. Influence of mineral component composition on hardening of magnesium composition [Text] / O.A. Miryuk // Novosti nauku Kazachstana. — 2006. — N 2. — P. 115–120.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 693.547.3.001.24

Е.Ю. ЧИКИРЕВА

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ КОЛОНН И ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ МОНОЛИТНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ С ПРОГРЕВНЫМ И БЕСПРОГРЕВНЫМ ВЫДЕРЖИВАНИЕМ БЕТОНА

Обоснована энергосберегающая технология зимнего бетонирования одиночных колонн и плит перекрытий монолитных каркасов зданий с прогревным и беспроевным выдерживанием бетона с описанием физических и математических моделей и особенности их численной реализации. Рассмотрены управляемые температурные режимы тепловой обработки бетона (управляемый температурный режим разогрева, прогрева в оптимальном температурном диапазоне и остывания бетона).

К л ю ч е в ы е с л о в а : бетон, зимнее бетонирование, одиночная колонна, плита перекрытия, температурный режим, математическое моделирование, численная аппроксимация дифференциальных уравнений теплопроводности, прогноз температурного и прочностного полей в монолитном бетоне.

Исследованиями [Ю.А. Попова], Ю.В. Лунева [1, 2 и др.], а также С.Н. Андриевского, И.А. Паргачевской, Ю.А. Пинаевой и Е.К. Усинского и др. научно обоснована концепция управляемых температурных режимов разогрева, прогрева в оптимальном температурном диапазоне и остывания бетона (рис. 1), адаптированная автором статьи к постановке и решению задач, связанных с зимним бетонированием конструкций, указанных в наименовании данной статьи.

Однако при этом:

1) необходимо учесть суточную динамику температуры воздуха в виде суточной синусоидальной зависимости

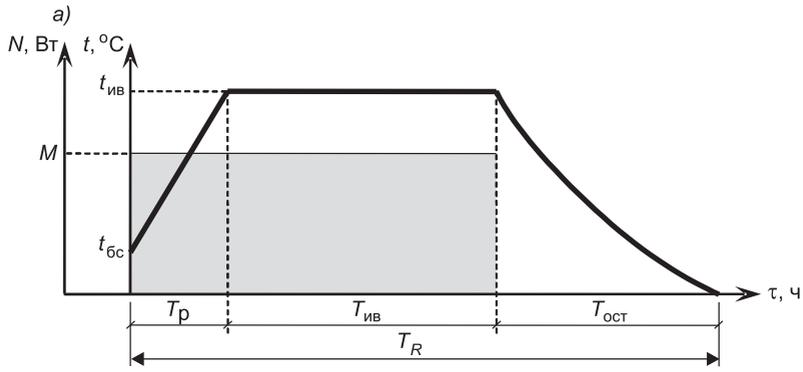
$$\Theta_{\text{сут}}(\tau \in 24 \text{ ч}) = \Theta_{\text{расч}}(\tau = T) + A_{\text{норм}}^{\text{сут}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \tau / T_{\text{сут}}), \quad (1)$$

где $\Theta_{\text{сут}}(\tau = T)$ — среднесуточная по среднемуголетию температура воздуха в конкретном регионе ($\tau \in \Omega$, где $\Omega = 8760$ ч — продолжительность годового цикла) на момент времени $\tau = T$, ч, от начала зимнего периода года, °С;

$A_{\text{норм}}^{\text{сут}}$ — нормативная амплитуда суточных колебаний температуры воздуха в указанном выше регионе, °С;

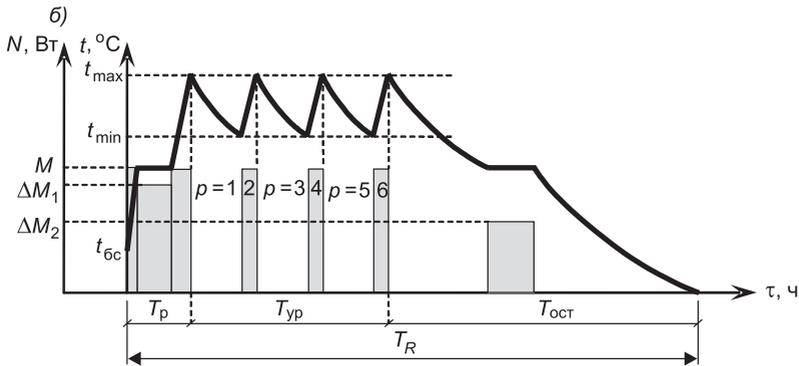
$\tau \in T_{\text{сут}}$, где $T_{\text{сут}} = 24$ ч;

2) расчет процесса нарастания прочности бетона носит вторичный характер по отношению к расчету температурного поля в бетоне (расчет



$$N = M, \quad \tau \in T_p \wedge \tau \in (T_p, T_p + T_{ив})$$

$$N = 0, \quad \tau \in (T_p + T_{ив}, T_p + T_{ив} + T_{ост})$$



$$\begin{cases} N = M, \tau \in T_p \wedge \frac{\partial t}{\partial \tau} < \left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)_{\max} \\ N = \Delta M_1, \tau \in T_p \wedge \frac{\partial t}{\partial \tau} \geq \left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)_{\max} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} N = M, \tau \in T_{уп} \wedge p = 2 \cdot k, k = 1, 2, \dots, s \\ N = 0, \tau \in T_{уп} \wedge p = 2 \cdot k - 1, k = 1, 2, \dots, s \end{cases}$$

Рис. 1. Неуправляемый (а) и управляемый (б) температурные режимы тепловой обработки бетона и их алгоритмические диспетчеры

температурного поля на очередном шаге внешнего цикла $\Delta\tau \rightarrow$ расчет средневзвешенной по объему конструкции температуры (среднеобъемной температуры) бетона $t_{cp} \rightarrow$ расчет прироста среднеобъемной прочности бетона), что не позволяет проводить экспертную оценку равномерности прочностного поля с установлением неблагоприятных мест в конструкции, где бетон не набрал критической или проектной прочности в заданные в ППР сроки;

3) не доказана корректность численной реализации ГУ IV рода (мест теплового сопряжения свежееуложенного бетона бетонизируемой конструкции с бетоном ранее забетонированных конструкций), когда численная реализация заключается только в замене теплофизических характеристик одного бетона на характеристики другого без учета того обстоятельства, что в одном узле координатной сети стыкуются конструкции с разными теплофизическими характеристиками;

4) не исследовано влияние химических добавок в бетонную смесь (например, добавки «Модификатор бетона «Бенотех УТБС»» (ускоритель твердения бетонной смеси с пластифицирующим эффектом)) на интенсивность процесса набора прочности бетона;

5) проведенные в НГАСУ (Сибстрин) С.Н. Андриевским экспериментальные исследования удельного электрического сопротивления бетона

на Чернореченском портландцементе недостаточно адаптированы к электродному прогреву бетона;

б) при практической реализации управляемых температурных режимов разогрева, прогрева в оптимальном температурном диапазоне и остывания бетона не учтена суточная динамика температуры воздуха.

Опишем решение перечисленных задач на примере *одиночной колонны* монолитного каркаса (рис. 2).

Не рассматривая подробно методы и последовательность технологических операций технологического процесса зимнего бетонирования одиночной колонны монолитного каркаса, подробно описанные в [2], остановимся на следующих особенностях физической постановки задачи. При прогревном выдерживании бетона выделим три метода его прогрева: периферийный прогрев электрическими нагревательными проводами (ЭНП), сквозной электродный прогрев (ЭП) струнными электродами и периферийный ЭП полосовыми электродами.

В соответствии с расчетной схемой рис. 2 бетонированная колонна опирается на ранее забетонированную плиту перекрытия и через нее — на нижерасположенную и ранее возведенную колонну. Т.е. бетонированная колонна имеет технологическое и тепловое сопряжение как с плитой перекрытия в основании, так и через нее — с нижерасположенной и ранее забетонированной колонной. При этом обозначим:

X — расстояние от геометрической оси бетонированной колонны до границы зоны теплового влияния свежееуложенного бетона по координатной оси x на ранее забетонированную плиту перекрытия;

Y — то же, по координатной оси y ;

$H + \delta_{пл} + Z$ — координата по оси z границы теплового влияния свежееуложенного бетона бетонированной колонны на нижерасположенную и ранее забетонированную колонну ($\delta_{пл}$ — толщина плиты перекрытия, м;

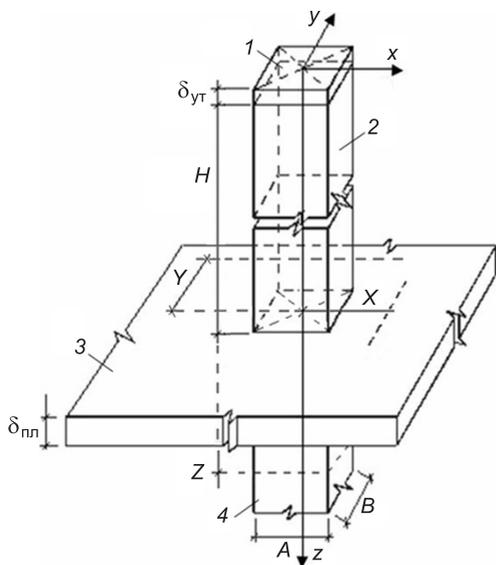


Рис. 2. Расчетная схема бетонированной одиночной колонны монолитного каркаса зданий 1 — утеплитель сверху; 2 — бетонированная колонна; 3 — ранее забетонированная плита перекрытия; 4 — нижерасположенная ранее забетонированная колонна

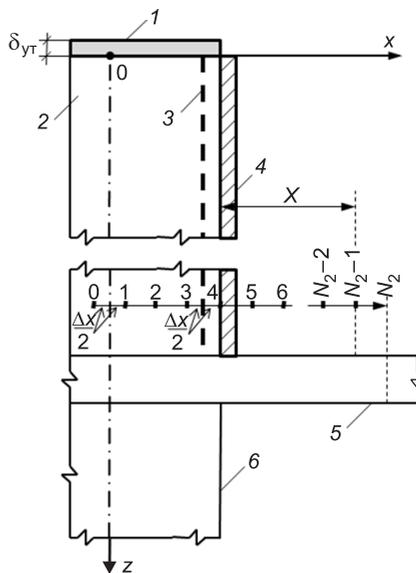


Рис. 3. Схема ограничений на величину шага численного интегрирования по оси x

1 — утеплитель сверху; 2 — свежееуложенный бетон бетонированной колонны; 3 — арматурный каркас; 4 — опалубка; 5 — ранее забетонированная плита перекрытия; 6 — нижерасположенная ранее забетонированная колонна

Z — расстояние от нижней поверхности плиты до границы зоны теплового влияния на нижерасположенную и ранее забетонированную колонну, м).

Линейный источник тепла от ЭНП q_1 , Вт/м, приводится к объемно-распределенному по схеме $q_1 \rightarrow q_{пр} \rightarrow W_{пр}$, где $q_{пр}$, Вт/м² = $q_1 \cdot L/F$ (L — расчетная длина нагревательного провода на рассматриваемой грани колонны, м²); $W_{пр}$, Вт/м³ = $q_{пр}/l$, где l — шаг численного интегрирования по координатной оси, нормальной к рассматриваемой грани колонны, как правило, равный толщине защитного слоя арматуры, м; q_1 — линейный источник тепла; $q_{пр}$ — интенсивность теплового потока; $W_{пр}$ — объемно-распределенный источник тепла; F — площадь рассматриваемой грани конструкции, м².

Определим объемно-распределенный искусственный источник тепла при сквозном прогреве бетона струнными электродами в соответствии с действующей нормативной базой

$$W_{эп}(\tau) = \frac{2 \cdot \pi \cdot U^2}{\rho(\tau) \cdot B^2 \cdot \ln\left[\frac{2b}{d}\right] \cdot \sqrt{\frac{b}{2d}}}, \quad (2)$$

где U — напряжение тока, В;

$\rho(\tau)$ — изменяющееся во времени удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м;

b — расстояние от осей арматурных стержней в углах арматурного каркаса до оси струнного электрода, м;

d — диаметр струнного электрода, м.

При периферийном прогреве бетона полосовыми электродами плоский источник тепла $q_{эп}$, Вт/м², приводится к объемно-распределенному

$$W_{эп}(\tau) = \frac{q_{эп}}{l} = \frac{0,785 \cdot U^2}{\rho(\tau) \cdot b \cdot \ln\left[2,54 \frac{b}{a}\right] \cdot 1}, \quad (3)$$

где a и b — соответственно ширина полосовых электродов и расстояние между осями смежных полос, м;

l — шаг численного интегрирования по оси, нормальной к поверхности теплообмена.

Для каждого из альтернативных методов прогрева бетона целесообразно рассмотреть два альтернативных температурных режима (традиционный неуправляемый и нетрадиционный управляемый) в соответствии с рис. 1 и с математической формализацией их алгоритмических диспетчеров.

При беспробном выдерживании бетона на основании экспериментальных исследований С.А. Мироновым [4, с. 94] на примере противоморозной добавки нитрита натрия (см. таблицу) можно сделать вывод о том, что объемно-распределенным источником тепла экзотермического типа можно пренебречь, т.е. принять $W_{экз} = 0$.

Для создания возможности экспертной оценки равномерности прочности поля в бетоне бетонируемой конструкции рассмотрим *синхронный* расчет температурного и прочностного полей с реализацией следующей схемы расчета среднеобъемной прочности бетона: расчет объемного температурного поля → расчет объемного прочностного поля → расчет среднеобъемной температуры и прочности бетона → расчет нарастания прочности бетона на очередном шаге внешнего цикла.

Удельное тепловыделение бетона с содержанием NaNO_2 10 % от массы цемента (расход цемента 325 кг/м³, В/Ц = 0,52, на портландцементе М500)

Температура выдерживания бетона, °С	Удельное тепловыделение бетона (кДж/кг)/(Вт · ч/м ³) в возрасте, ч						
	24	48	72	120	168	192	240
-10	0/0	0/0	0,8/7,8	7,5/42	15,5/63	20,9/74	29,3/81

С учетом изложенной физической модели **математическая модель** динамики температурного и прочностного полей в бетоне бетонированной колонны имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & 1. \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{кол1}}}{C_{\text{кол1}}} \cdot \left[\frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] + \frac{W_{\text{экз}}(\tau)}{C_{\text{кол1}}} + \frac{W_{\text{иск}}(\tau)}{C_{\text{кол1}}}, \\
 & \quad x \in A/2 \wedge y \in B/2 \wedge z \in H \wedge \tau \in T_{R70\%}; \\
 & 2. \frac{\partial t_{\text{пл}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{пл}}}{C_{\text{пл}}} \cdot \left[\frac{\partial^2 t_{\text{пл}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{пл}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 t_{\text{пл}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right], x \in X \wedge y \in Y \wedge z \in (H, H + \delta_{\text{пл}}); \\
 & 3. \frac{\partial t_{\text{кол2}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{кол2}}}{C_{\text{кол2}}} \cdot \left[\frac{\partial^2 t_{\text{кол2}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{кол2}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 t_{\text{кол2}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right], x \in A/2 \wedge y \in B/2 \wedge z \in (H + \delta_{\text{пл}}, H + \delta_{\text{пл}} + Z); \\
 & 4. \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x=0, y \in B/2, z \in H, \tau)}{\partial x} = 0; \\
 & 5. \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y=0, z \in H, \tau)}{\partial y} = 0; \\
 & 6. -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x=A/2, y \in B/2, z \in H, \tau)}{\partial x} = \\
 & \quad = K_{\text{пр}}^{\text{кол}} \cdot [t_{\text{кол1}}(x=A/2, y \in B/2, z \in H, \tau) - \theta]; \\
 & 7. -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y=B/2, z \in H, \tau)}{\partial y} = \\
 & \quad = K_{\text{пр}}^{\text{кол}} \cdot [t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y=B/2, z \in H, \tau) - \theta]; \\
 & 8. -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y \in B/2, z=0, \tau)}{\partial z} = \\
 & \quad = K_{\text{пр}}^{\text{ут}} \cdot [t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y \in B/2, z=0, \tau) - \theta]; \\
 & 9. -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y \in B/2, z=H, \tau)}{\partial z} + \\
 & \quad + \lambda_{\text{пл}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл}}(x \in A/2, y \in B/2, z=H, \tau)}{\partial z} = 0;
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
10. & -\lambda_{\text{пл}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл}} \{ [x \in A/2 \wedge y \in (B/2, Y)] \vee [x \in (A/2, X), \wedge y \in Y] \wedge \\
& \wedge [z = H, z = H + \delta_{\text{пл}}] \}}{\partial z} = \alpha \cdot [t_{\text{пл}} \{ [x \in A/2 \wedge y \in (B/2, Y)] \vee \\
& \vee [x \in (A/2, X) \wedge y \in Y] \wedge [z = H, z = H + \delta_{\text{пл}}] \} - \theta]; \\
11. & -\lambda_{\text{пл}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл}} [x \in A/2, y \in B/2, z = H + \delta_{\text{пл}}]}{\partial z} + \\
& + \lambda_{\text{кол2}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол2}} [x \in A/2, y \in B/2, z = H + \delta_{\text{пл}}]}{\partial z} = 0; \\
12. & -\lambda_{\text{кол2}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол2}} [x = A/2, y \in B/2, z \in (H + \delta_{\text{пл}}, H + \delta_{\text{пл}} + Z)]}{\partial x} = \\
& = \alpha \cdot [t_{\text{кол2}} [x = A/2, y \in B/2, z \in (H + \delta_{\text{пл}}, H + \delta_{\text{пл}} + Z)] - \theta]; \\
13. & -\lambda_{\text{кол2}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол2}} [x \in A/2, y = B/2, z \in (H + \delta_{\text{пл}}, H + \delta_{\text{пл}} + Z)]}{\partial y} = \\
& = \alpha \cdot [t_{\text{кол2}} [x \in A/2, y = B/2, z \in (H + \delta_{\text{пл}}, H + \delta_{\text{пл}} + Z)] - \theta]; \\
14. & t_{\text{кол2}} [x \in A/2, y \in B/2, z \geq H + \delta_{\text{пл}} + Z] = \text{const} = \theta; \\
15. & t_{\text{пл}} [x \geq X, y, z \in (H, H + \delta_{\text{пл}})] = \text{const} = \theta; \\
16. & t_{\text{пл}} [x, y \geq Y, z \in (H, H + \delta_{\text{пл}})] = \text{const} = \theta; \\
17. & t_{\text{кол1}} (x \in A/2, y \in B/2, z \in H, \tau = 0) = t_{\text{бс}}; \\
18. & t_{\text{пл}} [x \in X, y \in Y, z \in (H, H + \delta_{\text{пл}}), \tau = 0] = \theta; \\
19. & t_{\text{кол2}} [x \in A/2, y \in B/2, z \in (H + \delta_{\text{пл}}, H + \delta_{\text{пл}} + Z), \tau = 0] = \theta; \\
20. & R^{\tau=0} (x \in A/2, y \in B/2, z \in H) = 0; \\
21. & R^{\tau+\Delta\tau} (x \in A/2, y \in B/2, z \in H) = R^{\tau} (x \in A/2, y \in B/2, z \in H) + \\
& + \Delta R^{\tau+\Delta\tau} (x \in A/2, y \in B/2, z \in H); \\
22. & \begin{cases} N = M, \tau \in T_p \wedge \tau \in (T_p, T_p + T_{\text{ив}}), \\ N = 0, \tau \in T_p \wedge \tau \in (T_p + T_{\text{ив}}, T_p + T_{\text{ив}} + T_{\text{ост}}); \end{cases} \\
& \left\{ \begin{array}{l} N = M, \tau \in T_p \wedge \frac{\partial t}{\partial \tau} < \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\text{max}}^p, \\ N = \Delta M_1, \tau \in T_p \wedge \frac{\partial t}{\partial \tau} \geq \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\text{max}}^p \end{array} \right. \\
& \quad \downarrow \\
23. & \left\{ \begin{array}{l} N = M, \tau \in (T_p, T_p + T_{\text{yp}}) \wedge p = 2 \cdot k, k = 1, 2, \dots, s, \\ N = 0, \tau \in (T_p, T_p + T_{\text{yp}}) \wedge p = 2 \cdot k - 1, k = 1, 2, \dots, s \end{array} \right. \\
& \quad \downarrow \\
& \left\{ \begin{array}{l} N = 0, \tau \in (T_p + T_{\text{ив}}, T_p + T_{\text{ив}} + T_{\text{ост}}) \wedge \text{abs} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) < \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\text{max}}^{\text{ост}}, \\ N = \Delta M_2, \tau \in (T_p + T_{\text{ив}}, T_p + T_{\text{ив}} + T_{\text{ост}}) \wedge \text{abs} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) \geq \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\text{max}}^{\text{ост}}. \end{array} \right.
\end{aligned} \tag{4}$$

В математической модели (4):

(4.1) — трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности бетона с двумя объемно-распределенными источниками тепла (источником тепла экзотермического типа и искусственным источником тепла при прогревном выдерживании бетона);

(4.2) и (4.3) — трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности бетона ранее забетонированных соответственно плиты перекрытия и нижерасположенной колонны;

(4.4) и (4.5) — условия тепловой симметрии соответственно $x = 0$ и $y = 0$;

(4.6) и (4.7) — ГУ III рода на вертикальных гранях бетонируемой колонны соответственно при $x = A/2$ и $y = B/2$;

(4.8) — ГУ III рода на утепленной поверхности бетонируемой колонны;

(4.9) — ГУ IV рода (условие теплового сопряжения бетона бетонируемой колонны и бетона ранее забетонированной плиты перекрытия);

(4.10) — ГУ III рода на неутепленных верхней ($z = H$) и нижней ($z = H + \delta_{пл}$) поверхностях ранее забетонированной плиты перекрытия в пределах зоны теплового влияния бетонируемой колонны с координатной привязкой $\{[x \in A/2 \wedge y \in (B/2, Y)] \vee [x \in (A/2, X) \wedge y \in Y] \wedge [z = H, z = H + \delta_{пл}]\}$;

(4.11) — ГУ IV рода (условие теплового сопряжения бетона ранее забетонированной плиты перекрытия и бетона нижерасположенной ранее забетонированной колонны);

(4.12) и (4.13) — ГУ III рода на неутепленных вертикальных гранях ранее забетонированной колонны на участке (по оси z): $z \in [(H + \delta_{пл}), (H + \delta_{пл} + Z)]$;

(4.14)–(4.16) — ГУ на границах зон теплового влияния свежееуложенного бетона бетонируемой колонны нижерасположенных ранее забетонированных колонны (4.14) и плиты перекрытия (4.15) и (4.16);

(4.17)–(4.20) — начальные условия с координатной привязкой;

(4.21) — математическая формализация процесса нарастания прочности бетона бетонируемой колонны *во всех узлах объемной координатной сетки*;

(4.22) — алгоритмический диспетчер, «управляющий» традиционным температурным режимом тепловой обработки бетона с его изотермическим выдерживанием;

(4.23) — алгоритмический диспетчер, «управляющий» температурным режимом разогрева, прогрева в оптимальном температурном диапазоне и остывания бетона *при необходимости с автоматическим регулированием тепловой мощности нагревателей с целью соблюдения всех нормативных температурных ограничений*.

Особенности численной реализации математической модели

(4). 1. Для численной аппроксимации дифференциальных уравнений в математической модели (4) наиболее эффективной является неявная разностная схема дробных шагов, разработанная академиком Н.Н. Яненко для решения двумерных космических задач и адаптированная Ю.А. Поповым и Т.В. Богатыревой к решению трехмерных задач проблемы зимнего бетонирования монолитных конструкций соответственно в декартовой и цилиндрической системах координат.

2. Рассмотрим особенности численной реализации ГУ IV рода на примере ГУ (4.9)

$$\begin{aligned}
 & -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y \in B/2, z = H, \tau)}{\partial z} + \\
 & + \lambda_{\text{пл}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл}}(x \in A/2, y \in B/2, z = H, \tau)}{\partial z} = 0.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Определим границы вложенных циклов с учетом очередности прогонок по координатным осям: ось $z \rightleftharpoons$ ось $x \rightleftharpoons$ ось y :

$$\left. \begin{aligned} \text{по оси } z: M_1 &= \text{ROUND}(H / \Delta z); M_2 = \text{ROUND}[(H + \delta_{\text{пл}}) / \Delta z]; \\ M_1 &= \text{ROUND}[(H + \delta_{\text{пл}} + Z) / \Delta z]; \\ \text{по оси } x: N_1 &= \text{ROUND}[(A / 2) / \Delta x]; N_2 = \text{ROUND}(X / \Delta x); \\ \text{по оси } y: U_1 &= \text{ROUND}[(B / 2) / \Delta y]; U_2 = \text{ROUND}(Y / \Delta y). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

С учетом направленности тепловых потоков по закону Фурье представим (5) в виде

$$\frac{\lambda_{\text{кол1}}}{\Delta z} \cdot [t_{i=M_1-1,j,k}^{n+1/3} - t_{i=M_1,j,k}^{n+1/3}] = \frac{\lambda_{\text{пл}}}{\Delta z} \cdot [t_{i=M_1,j,k}^{n+1/3} - t_{i=M_1+1,j,k}^{n+1/3}], \quad (7)$$

откуда очевидными условиями достаточно корректной численной реализации ГУ IV рода (5) являются:

а) на шаге $i = M_1 - 1$ до $i = M_1$ при расчете прогоночных коэффициентов в формулы A_1 , B_1 и C_1 в качестве теплофизических характеристик бетона подстановка $\lambda_{\text{кол1}}$ и $C_{\text{кол1}}$;

б) на шаге $i = M_1$ до $i = M_1 + 1$ при расчете прогоночных коэффициентов в формулы A_1 , B_1 и C_1 в качестве теплофизических характеристик бетона подстановка $\lambda_{\text{пл}}$ и $C_{\text{пл}}$;

в) на шаге $i = M_1 - 1$ подстановка температуры бетона по явной разностной схеме.

В итоге ГУ IV рода (5) окончательно может быть представлено в виде

$$t_{i=M_1,j,k(\text{кол1})}^{n+1/3} = t_{i=M_1-1,j,k(\text{кол1})}^n - \frac{\lambda_{\text{пл}}}{\lambda_{\text{кол1}}} \cdot [t_{i=M_1,j,k(\text{пл})}^{n+1/3} - t_{i=M_1+1,j,k(\text{пл})}^{n+1/3}]. \quad (8)$$

Аналогично по неявно-разностной схеме проведем численную реализацию ГУ IV рода (4.11):

$$t_{i=M_2,j,k(\text{пл})}^{n+1/3} = t_{i=M_2-1,j,k(\text{пл})}^n - \frac{\lambda_{\text{кол1}}}{\lambda_{\text{пл}}} \cdot [t_{i=M_2,j,k(\text{кол2})}^{n+1/3} - t_{i=M_2+1,j,k(\text{кол2})}^{n+1/3}]. \quad (9)$$

3. Особенности численной реализации ГУ III рода (4.6)–(4.8), (4.10), (4.12) и (4.13):

а) реализация ГУ по неявной разностной схеме, если первая прогонка (с расчетом прогоночных коэффициентов), от границы ГУ III рода и по явной разностной схеме, а если первая прогонка к границе ГУ III рода;

б) в соответствии с рис. 3 вводятся ограничения на величину шага численного интегрирования по координатной оси, нормальной к границе ГУ III рода.

4. На рис. 4 показаны также особенности численной реализации ГУ на границах зоны теплового влияния бетонируемой колонны на бетон ранее забетонированных конструкций по всем координатным осям (на примере оси x).

5. Все прогоночные коэффициенты, ранее выведенные Ю.А. Поповым и Т.В. Богатыревой, адаптированы автором к решаемой задаче при прогревном и беспрогревном выдерживании бетона. В настоящее время разрабатывается продукт на алгоритмическом языке Borland Builder C++.

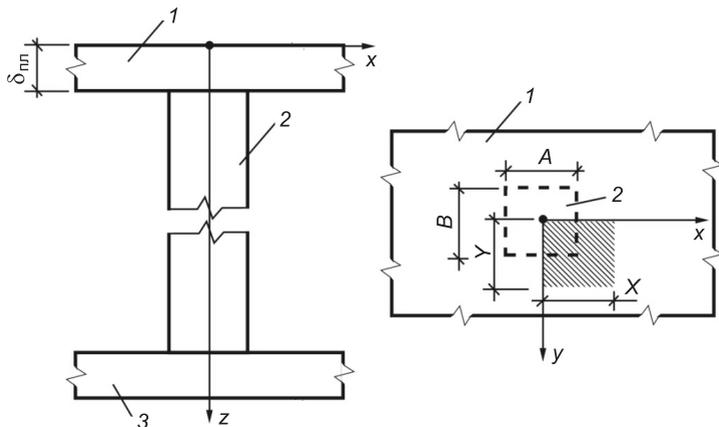


Рис. 4. Расчетная схема теплового сопряжения бетонируемой плиты перекрытия монолитного каркаса с ранее забетонированной одиночной колонной

1 — бетонируемая плита перекрытия; 2 — ранее забетонированная одиночная колонна; 3 — нижерасположенная ранее забетонированная плита перекрытия

Рассмотрим примеры численной реализации ГУ III по неявной и явной разностным схемам:

Неявная разностная схема на примере ГУ III рода (4.8)

$$-\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y \in B/2, z = 0, \tau)}{\partial z} = K_{\text{пр}}^{\text{ут}} \cdot [t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y \in B/2, z = 0, \tau) - \theta], \quad (10)$$

где

$$K_{\text{пр}}^{\text{ут}} = \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}} \right]^{-1}. \quad (11)$$

В соответствии с принятой очередностью прогонок в декартовой системе координат преобразуем (12) в последовательности

а) для обратной прогонки по оси Z

$$t_{i=0,j,k}^{n+1/3} = \alpha_{i=0,j,k} \cdot t_{i=1,j,k}^{n+1/3} + \beta_{i=0,j,k}; \quad (12)$$

б) с учетом (12) формулу (10) преобразуем к виду

$$t_{i=0,j,k}^{n+1/3} = \frac{\frac{\lambda_{\text{кол1}}}{\Delta z} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}} \right] \cdot t_{i=1,j,k}^{n+1/3} + \theta}{\frac{\lambda_{\text{кол1}}}{\Delta z} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}} \right] + 1}. \quad (13)$$

Тогда получим прогоночные коэффициенты в (12):

$$\alpha_{i=0,j,k} = D_1 / (D_1 + 1); \quad \beta_{i=0,j,k} = \theta / (D_1 + 1),$$

где

$$D_1 = \frac{\lambda_{\text{кол1}}}{\Delta z} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}} \right].$$

Явная разностная схема на примере ГУ III рода (3.6)

$$\begin{aligned}
 & -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x = A/2, y \in B/2, z \in H, \tau)}{\partial x} = \\
 & = K_{\text{пр}}^{\text{кол}} \cdot [t_{\text{кол1}}(x = A/2, y \in B/2, z \in H, \tau) - \theta],
 \end{aligned} \tag{14}$$

где

$$K_{\text{пр}}^{\text{кол}} = \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\text{оп}}}{\lambda_{\text{оп}}} \right]^{-1}. \tag{15}$$

Формула для обратной прогонки по оси x будет иметь *явный* вид

$$t_{i,j=N_1,k}^{n+2/3} = \delta_{i,j=N_1,k} \cdot t_{i,j=N_1-1,k}^n + \gamma_{i,j=N_1,k}, \tag{16}$$

где

$$\delta_{i,j=N_1,k} = D_2 / (D_2 + 1); \quad \gamma_{i,j=N_1,k} = \theta / (D_2 + 1),$$

откуда

$$D_2 = \frac{\lambda_{\text{кол1}}}{\Delta x} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{\text{оп}}}{\lambda_{\text{оп}}} \right].$$

6. После завершения всех вложенных циклов $[i(\Delta z) \Leftrightarrow j(\Delta x) \Leftrightarrow k(\Delta y)]$ перед переходом на очередной шаг внешнего цикла Δt :

а) для свежеложенного бетона бетонируемой колонны с использованием рассчитанного температурного поля на шаге $n + 1$ $[t_2(0:M_1, 0:N_1, 0:U_1)]$ расчет во всех узлах объемной координатной сетки прочности бетона с заполнением массива $[R_2(0:M_1, 0:N_1, 0:U_1)]$ циклами: $i = 0, 1, 2, \dots, M_1, j = 0, 1, 2, \dots, N_1, k = 0, 1, 2, \dots, U_1$, с использованием формулы $R_2[i, j, k] = R_1[i, j, k] + \Delta R[i, j, k]$; при этом расчет процесса прироста прочности бетона $+ \Delta R[i, j, k]$ проводится с помощью цифрового блока компьютерной интерполяции высокодостоверных экспериментальных номограмм ЦНИИОМТП, созданного с использованием математического пакета MathCAD 2001i Professional;

б) расчет среднесуточной температуры и среднеобъемной прочности свежеложенного бетона путем сначала суммирования температуры и прочности бетона во всех узлах объемной координатной сетки, а затем делением полученных сумм на количество узлов в объемной координатной сетке $[(M_1 + 1) \cdot (N_1 + 1) \cdot (U_1 + 1)]$.

Рассмотрим решение задач, перечисленных в постановочной части статьи, на примере зимнего бетонирования плиты перекрытия монолитного каркаса, сопрягаемой с ранее забетонированной одиночной колонной (рис. 4).

Опуская подробности физической постановки задачи, аналогичные изложенным выше при обосновании физической модели для одиночной колонны, отметим изменения в координатной привязке расчетного фрагмента плиты перекрытия и ранее забетонированных одиночной колонны и нижерасположенной ранее забетонированной плиты перекрытия:

по оси z : $M_1 = \text{ROUND}(\delta_{\text{пл}} / \Delta z)$, где $\delta_{\text{пл}}$ — толщина бетонируемой плиты перекрытия, м; $M_2 = \text{ROUND}[(\delta_{\text{пл}} + Z_{\text{кол1}}) / \Delta z]$, где $Z_{\text{кол1}}$ — расстояние от нижней поверхности бетонируемой плиты перекрытия до границы зоны теплового влияния бетона бетонируемой плиты перекрытия на нижерасположенную ранее забетонированную колонну, м;

по оси x : $N_1 = \text{ROUND}[(A/2)/\Delta x]$; $N_2 = \text{ROUND}[X/\Delta x]$, где X — координата по оси x границы зоны теплового влияния ранее забетонированной колонны на свежееуложенный бетон плиты перекрытия; заметим, что при $x \geq X$ $\frac{\partial t(x, y, z)}{\partial x} = 0$;

по оси y : $U_1 = \text{ROUND}[(B/2)/\Delta y]$; $U_2 = \text{ROUND}[Y/\Delta y]$, где Y — координата по оси y границы зоны теплового влияния ранее забетонированной колонны на свежееуложенный бетон плиты перекрытия; при $y \geq Y$ $\frac{\partial t(x, y, z)}{\partial y} = 0$.

Математическая модель динамики температурного и прочностного полей в бетоне бетонируемой плиты перекрытия имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & 1. \left. \frac{\partial t_{\text{пл}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{пл}}}{C_{\text{пл}}} \cdot \left[\frac{\partial^2 t_{\text{пл}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{пл}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{пл}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] + \frac{W_{\text{экз}}(\tau)}{C_{\text{пл}}} + \frac{W_{\text{иск}}(\tau)}{C_{\text{пл}}}, \right. \\
 & x \in X \wedge y \in Y \wedge z \in \delta_{\text{пл}} \wedge \tau \in T_{R_{70}\%}; \\
 & 2. \left. \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{кол1}}}{C_{\text{кол1}}} \cdot \left[\frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{кол1}}(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right], x \in A/2 \wedge y \in B/2 \wedge z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z_{\text{кол1}}); \right. \\
 & 3. -\lambda_{\text{пл1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x \in X, y \in Y, z = 0, \tau)}{\partial z} = \\
 & = K_{\text{пр}}^{\text{пл1}} \cdot [t_{\text{пл1}}(x \in X, y \in Y, z = 0, \tau) - \theta]; \\
 & 4. -\lambda_{\text{пл1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y \in B/2, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial z} + \\
 & + \lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}(x \in A/2, y \in B/2, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial z} = 0; \\
 & 5. -\lambda_{\text{пл1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x \in (A/2, X), y \in (B/2, Y), z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial y} = \\
 & = K_{\text{пр}}^{\text{пл1}} \cdot [t_{\text{пл1}}(x \in (A/2, X), y \in (B/2, Y), z = \delta_{\text{пл1}}, \tau) - \theta]; \\
 & 6. \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x \geq X, y \in (B/2, Y) \vee y \in Y, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial x} = 0; \\
 & 7. \frac{\partial t_{\text{пл1}}(x \in (A/2, X) \vee x \in X, y \geq Y, z = \delta_{\text{пл1}}, \tau)}{\partial y} = 0; \\
 & 8. -\lambda_{\text{кол1}} \cdot \frac{\partial t_{\text{кол1}}[x = A/2, y \in B/2, z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z_{\text{кол1}}), \tau]}{\partial x} = \\
 & = \alpha \cdot \{t_{\text{кол1}}[x = A/2, y \in B/2, z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z_{\text{кол1}}), \tau] - \theta\};
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\left. \begin{aligned}
9. & -\lambda_{\text{колн}} \cdot \frac{\partial t_{\text{колн}} [x \in A/2, y = B/2, z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z_{\text{колн}}), \tau]}{\partial x} = \\
& = \alpha \cdot \{t_{\text{колн}} [x \in A/2, y = B/2, z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z_{\text{колн}}), \tau] - \theta\}; \\
10. & t_{\text{пл1}} (x \in X, y \in Y, z \in \delta_{\text{пл1}}, \tau = 0) = t_{\text{бс}}; \\
11. & R^{\tau=0} (x \in X, y \in Y, z \in \delta_{\text{пл1}}, \tau = 0) = 0; \\
12. & t_{\text{колн}} (x \in A/2, y = B/2, z \in (\delta_{\text{пл1}}, \delta_{\text{пл1}} + Z_{\text{колн}}), \tau = 0) = \theta; \\
13. & R^{\tau+\Delta\tau} (x \in X, y \in Y, z \in \delta_{\text{пл1}}) = R^{\tau} (x \in X, y \in Y, z \in \delta_{\text{пл1}}) + \\
& + \Delta R^{\tau+\Delta\tau} (x \in X, y \in Y, z \in \delta_{\text{пл1}}); \\
14. & \begin{cases} N = M, \tau \in T_p \wedge \tau \in (T_p, T_p + T_{\text{ив}}), \\ N = 0, \tau \in T_p \wedge \tau \in (T_p + T_{\text{ив}}, T_p + T_{\text{ив}} + T_{\text{ост}}); \end{cases} \\
& \begin{cases} \left\{ \begin{aligned} N = M, \tau \in T_p \wedge \frac{\partial t}{\partial \tau} < \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\text{макс}}^{\text{раз}}, \\ N = \Delta M_1, \tau \in T_p \wedge \frac{\partial t}{\partial \tau} \geq \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\text{макс}}^{\text{раз}}, \end{aligned} \right. \\ \downarrow \\ 15. & \begin{cases} N = M, \tau \in (T_p, T_p + T_{\text{ур}}) \wedge p = 2 \cdot k, k = 1, 2, \dots, s, \\ N = 0, \tau \in (T_p, T_p + T_{\text{ур}}) \wedge p = 2 \cdot k - 1, k = 1, 2, \dots, s, \end{cases} \\ & \downarrow \\ & \begin{cases} N = 0, \tau \in (T_p + T_{\text{ив}}, T_p + T_{\text{ив}} + T_{\text{ост}}) \wedge \text{abs} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) < \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\text{макс}}^{\text{ост}}, \\ N = \Delta M_2, \tau \in (T_p + T_{\text{ив}}, T_p + T_{\text{ив}} + T_{\text{ост}}) \wedge \text{abs} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) \geq \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{\text{макс}}^{\text{ост}}. \end{cases}
\end{aligned} \right\} \quad (17)$$

В математической модели (17):

(17.1) — дифференциальное уравнение теплопроводности свежееуложенного бетона бетонизируемой плиты перекрытия с двумя объемно-распределенными источниками тепла;

(17.2) — дифференциальное уравнение теплопроводности бетона ниже-расположенной и ранее забетонированной колонны;

(17.3) — ГУ III рода на *утепленной* поверхности свежееуложенного бетона бетонизируемой плиты перекрытия;

(17.4) — ГУ IV рода (условие теплового сопряжения бетона бетонизируемой плиты перекрытия и бетона ниже-расположенной и ранее забетонированной колонны);

(17.5) — ГУ III рода на нижней поверхности бетонизируемой плиты перекрытия с учетом термического сопротивления $\delta_{\text{оп}}/\lambda_{\text{оп}}$ нижних щитов опалубки;

(17.6)–(17.7) — ГУ на границах зон теплового влияния бетона ранее забетонированной ниже-расположенной колонны на бетон бетонизируемой плиты перекрытия по координатным осям соответственно x и y ;

(17.8) и (17.9) — ГУ III рода на неутепленных вертикальных гранях ранее забетонированной колонны, нормальных к координатным осям соответственно x и y ;

(17.10)–(17.12) — начальные условия;

(17.13) — математическая формализация процесса нарастания прочности бетона;

(17.14) и (17.15) — алгоритмические диспетчеры, «управляющие» соответственно традиционным температурным режимом с изотермическим выдерживанием бетона и управляемыми температурными режимами разогрева, прогрева в оптимальном температурном диапазоне и остывания бетона.

С учетом направленности тепловых потоков по закону Фурье неявная схема численной реализации ГУ IV рода (17.4) может быть представлена в виде

$$t_{i=M_1, j, k}^{n+1/3}(\text{пл}) = t_{i=M_1-1, j, k}^n(\text{пл}) - \frac{\lambda_{\text{кол1}}}{\lambda_{\text{пл1}}} \cdot [t_{i=M_1, j, k}^{n+1/3}(\text{кол1}) - t_{i=M_1+1, j, k}^{n+1/3}(\text{кол1})]. \quad (18)$$

В остальном численная реализация математической модели (17) аналогична ранее описанной схеме численной реализации математической модели (4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, Ю.А. Управляемые режимы тепловой обработки бетона [Текст] / Ю.А. Попов, В.В. Молодин, Ю.В. Лунев // Бетон и железобетон. — 2006. — № 5. — С. 10–12.
2. Молодин, В.В. Зимнее бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях [Текст]: монография / В.В. Молодин, Ю.В. Лунев. — Новосибирск : Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2006. — 300 с.
3. Головнев, С.Г. Технология бетонных работ в зимнее время [Текст] / С.Г. Головнев. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2004. — 70 с.
4. Мионов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования [Текст] / С.А. Мионов. — М. : Стройиздат, 1975. — 700 с.

ЧИКИРЕВА Е.Ю., студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 26.01.11

Chikireva E.Yu., student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

COMPUTATIONAL VALIDATION OF TECHNOLOGY OF WINTER CONCRETING FOR SINGLE COLUMNS AND PLATES OF MONOLITHIC BUILDING FRAME OVERLAPS WITH HEATING AND NON-HEATING MATURING OF CONCRETE

The energy-saving technology of winter concreting for single columns and plates of monolithic building frame overlaps with heating and non-heating maturing of concrete is proved. The description of physical and mathematical models and features of their numerical realization are described. Controlled temperature modes of thermal processing of concrete (an operated temperature mode of a warming up, heating in an optimum temperature range and concrete cooling) are considered.

Key words: concrete, winter concreting, a single column, an overlapping plate, a temperature mode, mathematical modeling, numerical approximation of the differential equations of heat conductivity, the forecast temperature and strength fields in monolithic concrete.

REFERENCES

1. Попов, Ю. А. Operated modes of thermal processing of concrete [Text] / Yu.A. Popov, V.V. Molodin, Yu.V. Lunev // Concrete and ferro-concrete. — 2006. — N 5. — P. 10–12.
2. Molodin, V.V. Winter concreting of monolithic building designs in winter conditions [Text]: monography / V.V. Molodin, Yu.V. Lunev. — Novosibirsk : Publishing-polygraph NSUACE (Sibstrin), 2006. — 300 p.
3. Golovnev, S.G. Technology of concrete works during winter time [Text] / S.G. Golovnev. — Chelyabinsk : Publishing-polygraph SUSU, 2004. — 70 p.
4. Mironov, S.A. Theory and methods of winter concreting [Text] / S.A. Mironov. — M. : Stroyizdat, 1975. — 700 p.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.921.42:532.5.031

Д.В. МАКЛАКОВ, А.Ю. АЛЕКСАНДРОВ, В.Н. ПОСОХИН

К РАСЧЕТУ ТЕЧЕНИЯ НАД ПРОТЯЖЕННЫМ ТЕПЛОИСТОЧНИКОМ, СНАБЖЕННЫМ ДВУСТОРОННИМ ЩЕЛЕВЫМ НИЖНИМ ОТСОСОМ

Течение над теплоисточником при действии нижнего отсоса рассматривается как результат взаимодействия двух плоских вихрей и двух линейных стоков. Определяются размеры рециркуляционной зоны над источником и необходимая интенсивность стоков, при которой обеспечивается улавливание потока вредных выделений.

Ключевые слова: теплоисточник, нижний отсос, плоский вихрь, линейный сток, интенсивности вихрей и стоков.

Предлагается новая схема течения над теплоисточником, снабженным двусторонним щелевым нижним отсосом.

В результате взаимодействия восходящего конвективного потока с течением, индуцированным всасывающими щелями, над теплоисточником образуется рециркуляционная зона — купол. Течение внутри рециркуляционной зоны формируется двумя стоками и двумя симметрично расположенными свободными вихрями с циркуляциями $-\gamma$ для правого и γ для левого вихря. Описанная схема показана на рис. 1, где реальные отсосы заменены линейными стоками с удельной интенсивностью q каждый.

Требуется определить соотношения между параметрами q и γ , при которых такое течение возможно, а также найти характерные размеры купола H и b . Течение считаем плоским и потенциальным. В дальнейшем половину расстояния между всасывающими щелями принимаем за характерный размер, т.е. $a = 1$.

Построим комплексный потенциал течения $W = \phi + i\psi$, где ϕ и ψ — соответственно потенциал и функция тока. Известно, что комплексный потенциал вихря, расположенного в точке z_0 , имеет вид

$$W_\gamma = \frac{\gamma}{2\pi i} \ln(z - z_0),$$

а комплексный потенциал стока, расположенного в точке z_i :

$$W_q = -\frac{q}{2\pi} \ln(z - z_i).$$

Здесь $z = x + iy$ — комплексная координата.

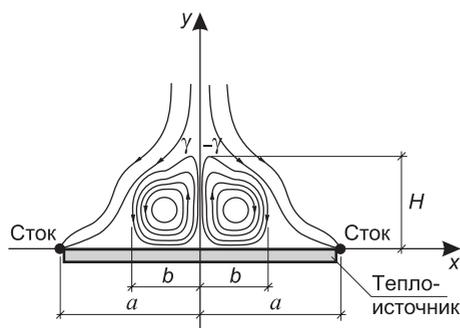


Рис. 1

Пусть правый вихрь с циркуляцией $-\gamma$ расположен в точке $z_0 = c + id$, тогда левый вихрь с циркуляцией γ располагается в точке $z_1 = -c + id$.

Для того чтобы действительная ось Ox (твердая стенка) была линией тока, необходимо расположить дополнительные вихри в точке $z_2 = c - id$ с циркуляцией γ и в точке $z_3 = -c - id$ с циркуляцией $-\gamma$. Интенсивности стоков, расположенных в точках $z = 1$ и $z = -1$, очевидно, также должны быть удвоены. Тогда комплексный потенциал течения запишется в виде

$$W = -\frac{q}{\pi} \ln(z-1) - \frac{q}{\pi} \ln(z+1) - \frac{\gamma}{2\pi i} \ln(z-z_0) + \frac{\gamma}{2\pi i} \ln(z+\bar{z}_0) + \frac{\gamma}{2\pi i} \ln(z-\bar{z}_0) - \frac{\gamma}{2\pi i} \ln(z+z_0). \quad (1)$$

Здесь черта означает комплексно сопряженную величину: $z_0 = c + id$, $\bar{z}_0 = c - id$.

Разделяя действительную и мнимую части выражения (1), находим потенциал

$$\varphi = -\frac{q}{\pi} \left[\ln\sqrt{(x-1)^2 + y^2} + \ln\sqrt{(x+1)^2 + y^2} \right] - \frac{\gamma}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{y-d}{x-c} + \operatorname{arctg} \frac{y+d}{x+c} \right] + \frac{\gamma}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{y-d}{x+c} + \operatorname{arctg} \frac{y+d}{x-c} \right] \quad (2)$$

и функцию тока течения

$$\psi = -\frac{q}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{y}{x-1} + \operatorname{arctg} \frac{y}{x+1} \right] + \frac{\gamma}{2\pi} \left[\ln\sqrt{(x-c)^2 + (y-d)^2} + \ln\sqrt{(x+c)^2 + (y+d)^2} \right] - \frac{\gamma}{2\pi} \left[\ln\sqrt{(x+c)^2 + (y-d)^2} + \ln\sqrt{(x-c)^2 + (y+d)^2} \right]. \quad (3)$$

Дифференцируя выражение (1) по z , находим комплексно сопряженную скорость течения

$$\frac{dW}{dz} = v_x - iv_y = -\frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{z-1} + \frac{1}{z+1} \right) - \frac{\gamma}{2\pi i} \left(\frac{1}{z-z_0} + \frac{1}{z+z_0} \right) + \frac{\gamma}{2\pi i} \left(\frac{1}{z-z_0} + \frac{1}{z+z_0} \right). \quad (4)$$

Известен гидродинамический принцип: вихрь сам на себя не действует. Это означает, что скорость движения вихря в потоке равна скорости, индуцированной в точке расположения вихря всеми остальными особенностями потока.

Например, чтобы определить скорость вихря в точке z_0 , надо удалить из выражения (4) скорость, индуцированную самим вихрем. В нашем случае вихри неподвижны, поэтому

$$-\frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{z_0-1} + \frac{1}{z_0+1} \right) - \frac{\gamma}{2\pi i} \frac{1}{2z_0} + \frac{\gamma}{2\pi i} \left(\frac{1}{z_0-z_0} + \frac{1}{z_0+z_0} \right) = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой в комплексной форме систему двух уравнений с двумя неизвестными c и d . Введем обозначение

$$\varepsilon = \frac{q}{\gamma} \quad (6)$$

и выделим в равенстве (5) действительную и мнимую части. В результате получим следующую систему:

$$\begin{cases} c[c^4 + 2c^2(d^2 - 1) + (1 + d^2)] + 8\varepsilon d(c^2 + d^2 - 1)(c^2 + d^2) = 0, \\ -d[(c^2 - 1) + d^2][(c^2 + 1) + d^2] + 8\varepsilon c(c^2 + d^2)(1 + c^2 + d^2) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Опуская промежуточные преобразования, приведем конечные результаты. Получено две пары решений системы уравнений (7):

$$n = \rho_1 \sqrt{\frac{1 - \rho_1^2}{2}}, \quad d = \rho_1 \sqrt{\frac{1 + \rho_1^2}{2}}, \quad (8)$$

$$c = \rho_2 \sqrt{\frac{1 - \rho_2^2}{2}}, \quad d = \rho_2 \sqrt{\frac{1 + \rho_2^2}{2}}, \quad (9)$$

где параметры ρ_1 и ρ_2 определяются из уравнений:

$$\rho_1 = \sqrt[4]{\frac{32\varepsilon^2 - 3 + 16\sqrt{4\varepsilon^2 - 1}}{64\varepsilon^2 + 9}}, \quad (10)$$

$$\rho_2 = \sqrt[4]{\frac{32\varepsilon^2 - 3 - 16\sqrt{4\varepsilon^2 - 1}}{64\varepsilon^2 + 9}}. \quad (11)$$

Из равенств (10), (11) следует, что решение системы (7) возможно при $\varepsilon \geq 0,5$. При $\varepsilon = 0,5$ обе пары решений сливаются. В этом случае

$$\rho = \frac{1}{\sqrt[4]{5}}, \quad c = \sqrt{\frac{\sqrt{5} - 1}{10}}, \quad d = \sqrt{\frac{\sqrt{5} + 1}{10}}. \quad (12)$$

Графики функций $c(\varepsilon)$ и $d(\varepsilon)$ для веток решений (8) и (9) показаны на рис. 2. Первая ветка решений — сплошная линия, вторая — штриховая.

На рис. 3 приведены линии тока, построенные по уравнению (3): слева для первой, справа для второй веток решения при разных значениях параметра ε . При $\varepsilon = 0,5$ картины течений одинаковы (обе ветки решения сливаются).

Из рис. 3 видно, что для ветки решения, определяемого формулами (8), при $\varepsilon > 0,5$ купол отрывается от теплоисточника, причем с увеличением ε высота защитного купола возрастает. Такое решение физически нереально, поэтому считаем, что для данной задачи физически правильное решение дается формулами (9).

Определим далее размеры купола. Для этого необходимо ре-

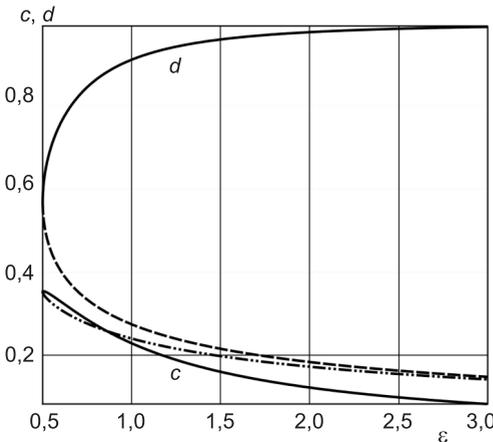


Рис. 2

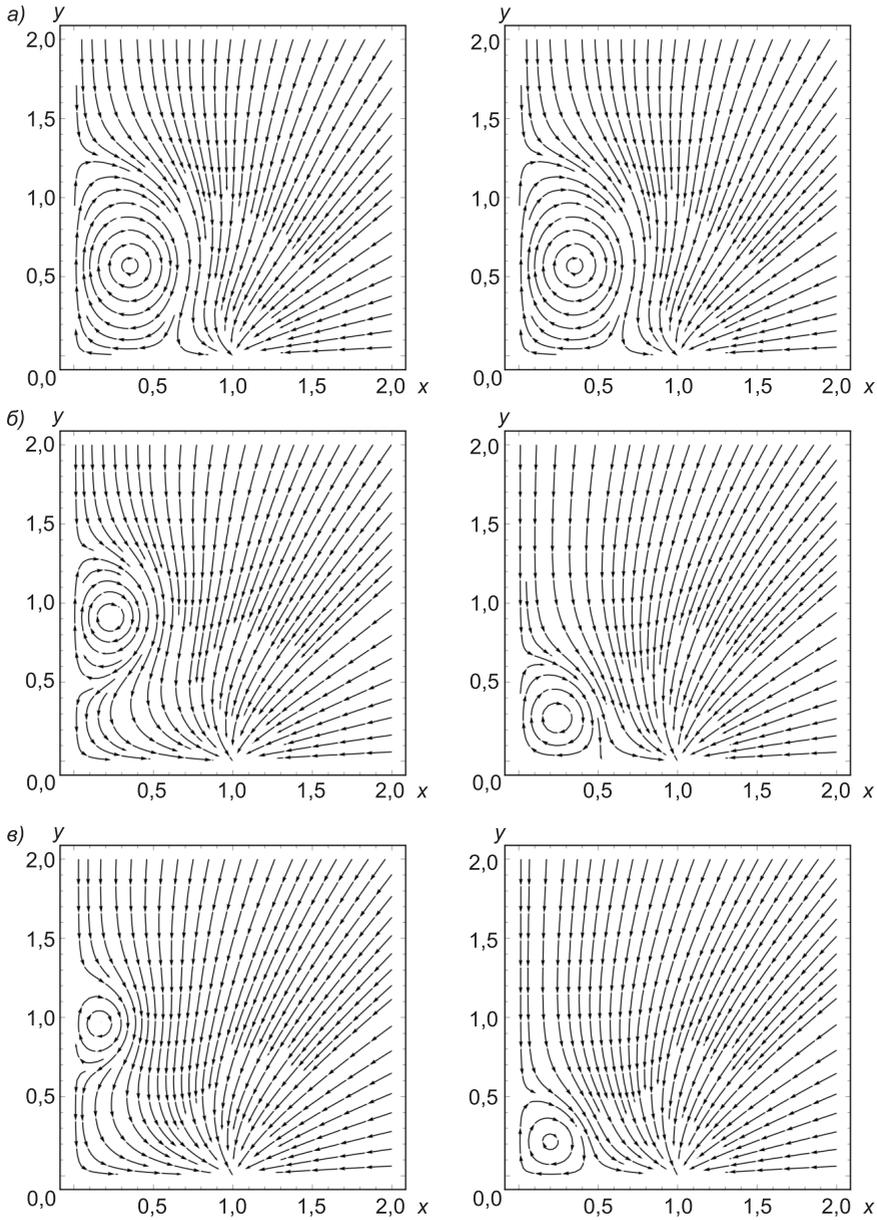


Рис. 3. Линии тока:
 $\varepsilon = 0,5$ (а); $\varepsilon = 1$ (б); $\varepsilon = 1,5$ (е)

шить уравнение $dW/dz = 0$. Учтем, что в формуле (4) $z_0 = c + id$ и исключим из рассмотрения корень $z = 0$. В результате получим биквадратное уравнение

$$\varepsilon z^4 + 2(cd - c^2\varepsilon + d^2\varepsilon)z^2 + \varepsilon(c^2 + d^2)^2 - 2cd = 0, \quad (13)$$

где c и d определяются по формулам (9).

Решение уравнения (13) дается формулами

$$U_1 = z^2 = \frac{c^2\varepsilon - d^2\varepsilon - cd - \sqrt{cd[2\varepsilon + (d - 2c\varepsilon)(c + 2d\varepsilon)]}}{\varepsilon}, \quad (14)$$

$$U_2 = z^2 = \frac{c^2\varepsilon - d^2\varepsilon - cd + \sqrt{cd[2\varepsilon + (d - 2c\varepsilon)(c + 2d\varepsilon)]}}{\varepsilon}. \quad (15)$$

Так как $z = \sqrt{U}$, то отрицательному корню уравнения (13) соответствует точка на оси Oy — вершина купола, а положительным — точки, лежащие на оси Ox . Тогда относительная высота купола —

$$H = \sqrt{-U_1}, \quad (16)$$

а его относительная ширина —

$$2b = 2\sqrt{U_2}. \quad (17)$$

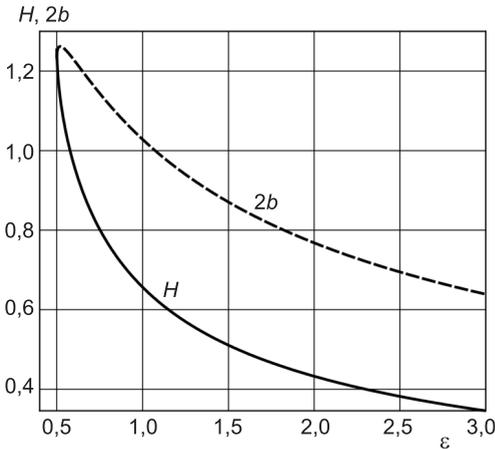


Рис. 4

На рис. 4 представлены графики функций $H(\varepsilon)$ и $2b(\varepsilon)$, откуда видно, что с увеличением ε (т.е. с увеличением интенсивности отсоса) купол становится более компактным.

Полученное решение обладает тем недостатком, что оно не содержит характеристик теплоисточника, которые и определяют циркуляцию вихрей γ . Из соображений размерности можно принять

$$\gamma = kL_{\text{ист}}, \quad q = k\varepsilon L_{\text{ист}}, \quad (18)$$

где k — безразмерный коэффициент, который необходимо найти из опыта;

$L_{\text{ист}}$ — комплекс величин, характеризующий интенсивность теплоисточника и имеющий размерность расхода.

Согласно [1] можно принять

$$L_{\text{ист}} = a_3 \sqrt[3]{\frac{gQ_k}{c_p \rho T}},$$

где a — полуширина источника, м;

Q_k — удельная конвективная тепловая мощность источника, кВт/м;

c_p — удельная теплоемкость воздуха, кДж/кг·К;

T и ρ — температура (К) и плотность воздуха (кг/м³) на удалении от теплоисточника.

Принимая $q = 9,81$ м/с²; $c_p = 1,005$ кДж/кг·К; $T = 293$ К; $\rho = 1,2$ кг/м³:

$$L_{\text{ист}} = 0,3aQ_k^{1/3}.$$

Учитывая, что q — интенсивность стока на единицу длины, общая интенсивность двустороннего отсоса

$$L_{\text{отс}} = 2ql = 0,6\varepsilon kaQ_k^{1/3}l,$$

где l — длина отсоса (стока).

Из опытных данных [2] следует, что $k = 4,87$. Тогда окончательно имеем

$$L_{\text{отс}} = 2,92a\varepsilon Q_k^{1/3}l.$$

Пример расчета. Найти необходимую интенсивность двустороннего нижнего отсоса у теплоисточника ($2a \times l = 0,3 \times 1,2$ м, $Q_k = 0,4$ кВт/м). По данным [2] относительная высота купола вредных выделений над поверхностью источника в нашем случае $H = 0,673$

(напомним, что все линейные размеры отнесены к полуширине источника, поэтому реальная высота купола $0,673 \cdot 0,15 = 0,1$ м). По графику рис. 4 находим соответствующее этой высоте значение $\varepsilon = 1$. Необходимая интенсивность отсоса

$$L_{\text{отс}} = 2,92 \cdot 0,15 \cdot 1 \cdot 0,4^{1/3} \cdot 1,2 = 0,387 \text{ м}^3 / \text{с} = 1390 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении [Текст] / И.А. Шепелев. — М. : Стройиздат, 1978. — 145 с.
2. Посохин, В.Н. Расчет местных отсосов от тепло-газовыделяющего оборудования [Текст] / В.Н. Посохин. — М. : Машиностроение, 1984. — 160 с.

*МАКЛАКОВ Д.В., д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: dmitri.maklakov@ksu.ru
Казанский федеральный (приволжский) университет*

*АЛЕКСАНДРОВ А.Ю., студ.; E-mail: lesh_a_@mail.ru
Казанский федеральный (приволжский) университет*

ПОСОХИН В.Н., д-р техн. наук, проф.; E-mail: posohin@kgasu.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 17.01.11

Maklakov D.V., doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: dmitri.maklakov@ksu.ru, Kazan Federal (Volga region) University, Russia

Aleksandrov A.Yu., student; E-mail: lesh_a_@mail.ru, Kazan Federal (Volga region) University, Russia

Posokhin V.N., doctor of technical sciences, professor; E-mail: posohin@kgasu.ru, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

CALCULATION OF THE FLOW ABOVE A LENGTHY HEAT SOURCE EQUIPPED WITH A DOUBLE-SIDED SLOT BOTTOM SUCTION

In the paper the flow above a heat source equipped with a bottom suction is considered as the result of the interaction of two plane vortices and two line sinks. The sizes of the recirculation zone above the source and the necessary strength of the sinks, which provides the trapping of harmful impurities, are determined.

Key words: heat source, bottom suction, plane vortex, line sink, strengths of vortices and sinks.

REFERENCES

1. Shepelev, I.A. Aerodynamics of indoor air flows [Text] / I.A. Shepelev. — М. : Stroyizdat, 1978. — 145 p.
2. Posokhin, V.N. Calculation of local suction from heat-gas generating equipment [Text] / V.N. Posokhin. — М. : Mashinostroenie, 1984. — 160 p.

УДК 697.921.252

О.Д. САМАРИН

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ПЕРЕКРЕСТНОТОЧНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ

Рассмотрены процессы теплообмена в пластинчатых перекрестноточных аппаратах утилизации теплоты для систем механической вентиляции. Предложена приближенная аналитическая формула для оценки температурной эффективности таких аппаратов с использованием безразмерных параметров. Дан анализ полученной зависимости и показаны пределы ее применимости.

К л ю ч е в ы е с л о в а : теплоутилизатор, теплоноситель, температурная эффективность.

Как известно [1], для утилизации теплоты вытяжного воздуха с целью энергосбережения в системах механической вентиляции и кондиционирования применяются теплообменные аппараты различных конструкций, в том числе пластинчатые перекрестноточные рекуператоры. Основной характеристикой, отражающей теплотехническое совершенство теплообменника, являются его коэффициенты температурной эффективности, отнесенные к нагреваемому и греющему теплоносителю. Максимальная эффективность теплоутилизаторов при их использовании в вентиляционных системах достигается при равенстве расходов притока и вытяжки. В этом случае данные коэффициенты для обоих потоков воздуха будут равны одной и той же величине, которую можно обозначить символом ε . По определению [1], [2]

$$\varepsilon = \frac{t_{2x} - t_{1x}}{t_{1r} - t_{1x}},$$

где t_{1r} и t_{1x} — температуры соответственно вытяжного и приточного воздуха на входе в утилизатор;

t_{2x} — температура притока на выходе из аппарата.

В работе [3] автором на основании обработки результатов численных расчетов по программе для ЭВМ, моделирующей процессы в рекуператоре с помощью конечно-разностной аппроксимации системы дифференциальных уравнений теплообмена [4], найдено выражение для ε в виде

$$\varepsilon = \frac{NTU}{A \cdot NTU + 1}. \quad (1)$$

Здесь $NTU = \frac{3,6 \cdot KF}{Gc}$ — число единиц переноса теплоты для рекуператора в целом [1], [2], где K — коэффициент теплопередачи теплообменника, Вт/(м²·К); F — его поверхность теплообмена, м²; G — массовый расход воздуха, кг/ч; $c = 1,005$ — его удельная теплоемкость, кДж/(кг·К).

Числовой коэффициент A по данным [3] составляет 1,137.

Попытаемся теперь обосновать полученное значение A аналитическими методами. Воспользуемся следующим условным приемом. Разобьем теплообменник на четыре квадрата и попытаемся выразить его общую эф-

фективность через характеристики отдельных частей. Безразмерные температуры каждого потока воздуха на выходе из соответствующего квадрата θ_{r2} и θ_{x2} находим через их значения на входе θ_{r1} и θ_{x1} по следующим очевидным формулам:

$$\theta_{x2} = \theta_{x1} + \varepsilon_{1/2}(\theta_{r1} - \theta_{x1}), \quad \theta_{r2} = \theta_{r1} - \varepsilon_{1/2}(\theta_{r1} - \theta_{x1}). \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon_{1/2}$ — температурная эффективность части теплообменника в пределах одного квадрата. Во всех случаях под θ понимается отношение $\frac{t - t_{1x}}{t_{1r} - t_{1x}}$. Поскольку все четыре квадрата одинаковы, $\varepsilon_{1/2}$ для каждого из них можно определить по выражению (1), только вместо NTU необходимо использовать величину $NTU/2$. Так получается, исходя из определения параметра NTU, потому что расход воздуха при этом составляет половину от общего, а поверхность теплообмена — только $1/4$.

Тогда температура каждого потока на входе в следующий квадрат принимается равной его температуре на выходе из предыдущего. С учетом данного обстоятельства распределение значений θ в пределах рекуператора показано на рис. 1, где принято, что приточный воздух движется слева направо, а вытяжной — снизу вверх. В данном случае пренебрегаем неравномерностью температурного поля по ширине квадрата, т.е. в направлении, перпендикулярном потоку, однако, как будет показано ниже, заметной ошибки в результат это не вносит.

Суммарная температурная эффективность будет, очевидно, совпадать со средним значением безразмерной температуры приточного воздуха на выходе из теплообменника, т.е. из двух правых квадратов на рис. 1. Она же должна быть равна величине ε , вычисляемой по формуле (1). Отсюда после некоторых преобразований можно найти зависимость (3), связывающую параметры ε и $\varepsilon_{1/2}$. Заметим, что она не содержит в явном виде никакой конкретной функции $\varepsilon(NTU)$, поскольку исходя из наиболее общего определения температурной эффективности и вытекающих из него соотношений (2):

$$\varepsilon - \varepsilon_{1/2}(2 - 2 \cdot \varepsilon_{1/2} + \varepsilon_{1/2}^2) = 0. \quad (3)$$

Однако если подставить в (3) выражения для параметров ε и $\varepsilon_{1/2}$ через NTU в соответствии с (1), получаем искомое уравнение для коэффициента A . В конечном итоге оно сводится к алгебраическому третьей степени, а потому является существенно нелинейным, так что для его решения

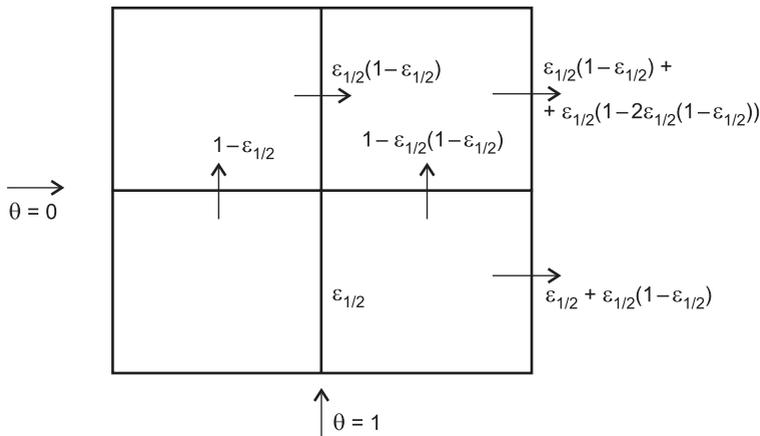


Рис. 1. Распределение безразмерных температур по частям рекуператора

проще всего воспользоваться численными методами. Результаты расчетов по разработанной для этой цели автором программе для ЭВМ на алгоритмическом языке Fortran-6.6 фирмы Compaq приведены на рис. 2.

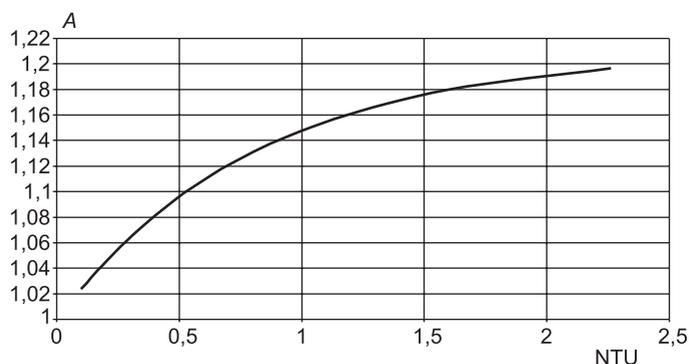


Рис. 2. Зависимость коэффициента A от NTU по уравнению (3)

Можно показать, что полученная зависимость весьма хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени (4), такой же, как и исходное соотношение (3). Его график в пределах толщины линии совпадает с кривой, показанной на рис. 2.

$$A = 1 + 0,24 \cdot NTU - 0,11 \cdot NTU^2 + 0,0185 \cdot NTU^3. \quad (4)$$

Легко убедиться, что среднее значение A во всем рассматриваемом диапазоне изменения NTU действительно равно 1,137, согласно [3]. Следовательно, сделанное ранее допущение о равномерном распределении температуры воздуха на выходе из каждого квадрата в направлении, перпендикулярном потоку, действительно не вносит качественных и даже количественных искажений в получаемый результат.

Для наглядности на рис. 3 приведено также сопоставление численных расчетов величины ε по данным [3] (линия 1) с результатами вычислений по формуле (1), если коэффициент A определяется по выражению (4) (линия 2). Нетрудно заметить, что и здесь упрощения, принятые при получении зависимости (3), вызывают лишь незначительные расхождения с численным экспериментом. Возникающая при этом погрешность, как правило, не превышает 1–2 % и только при $NTU > 1,1$ становится несколько больше, но все же остается в пределах обычной точности инженерных расчетов.

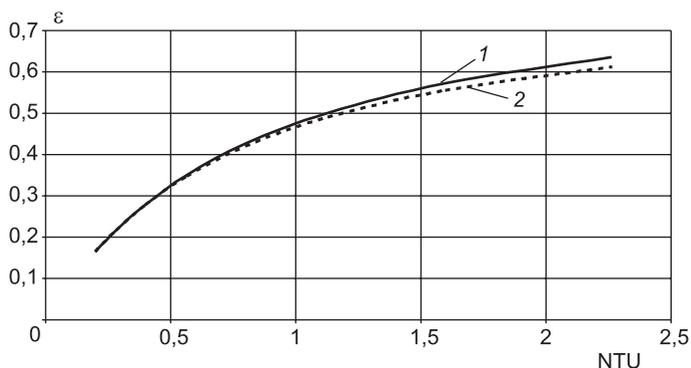


Рис. 3. Зависимость ε от NTU

1 — численный расчет [3]; 2 — формула (1) с коэффициентом A по выражению (4)

Иначе говоря, использованная здесь довольно грубая схема все же достаточно адекватно описывает реальные теплообменные процессы в рекуператоре, давая возможность делать правильные выводы о характере изменения параметра ε и тем самым убедиться в достоверности формулы (1), полученной при обработке результатов численного моделирования.

Таким образом, получены чрезвычайно простые соотношения для оценки температурной эффективности пластинчатых рекуперативных перекрестноточных теплообменников при равных расходах приточного и вытяжного воздуха и подтверждена их справедливость приближенным аналитическим решением системы интегральных уравнений теплопереноса в аппарате. Эти выражения пригодны для конструктивного и поверочного расчета таких устройств, а также для исследования переменных режимов их функционирования в течение отопительного периода, по крайней мере, на стадии оценочных вычислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белова, Е.М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях [Текст] / Е.М. Белова. — М. : Евроклимат, 2006. — 640 с.
2. Леонтьев, А.И. Теория теплообмена [Текст] / А.И. Леонтьев и др. — М. : Изд-во МГТУ, 1997. — 684 с.
3. Самарин, О.Д. О приближенном расчете температурной эффективности аппаратов утилизации теплоты в системах механической вентиляции [Текст] / О.Д. Самарин // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 11–12. — С. 53–56.
4. Самарин, О.Д. О расчете температурной эффективности пластинчатых перекрестноточных теплоутилизаторов [Текст] / О.Д. Самарин // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. — 2009. — № 1. — С. 30–33.

*САМАРИН О.Д., канд. техн. наук, доц.
Московский государственный строительный университет*

Получено 13.12.10

Samarin O.D., candidate of technical sciences, assistant professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

ON ANALYTICAL CALCULATION OF TEMPERATURE EFFICIENCY OF FLAP-TYPE CROSS-FLOW HEAT REGENERATORS

The processes of heat exchange in flap-type cross-flow heat regenerators for mechanical ventilation systems are reviewed. The approximated analytical formula for an estimation of temperature efficiency of such devices with usage of dimensionless parameters is offered. The analysis of the obtained relation is given and boundaries of its applicability are shown. The presentation is illustrated graphically and by comparison with results of numerical calculation.

Key words: hear regenerator, heat carrier, temperature efficiency.

REFERENCES

1. Belova, E.M. Central air condition systems in buildings [Text] / E.M. Belova. — M. : Euroclimate, 2006. — 640 c.
2. Leontyev, A.I. Theory of heat and mass exchange [Text] / A.I. Leontyev etc. — M. : MSTU Publishers, 1997. — 684 p.
3. Samarin, O.D. On approximated calculation of temperature efficiency of heat regenerators in mechanical ventilation systems [Text] / O.D. Samarin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 11–12. — P. 53–56.
4. Samarin, O.D. On calculation of temperature efficiency of flap-type cross-flow heat regenerators [Text] / O.D. Samarin // Engineering systems. AVOK–NW. — 2009. — N 1. — P. 30–33.

УДК 697.444:658.562

А.Н. МАШЕНКОВ, А.В. ФИЛИМОНОВ

**ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ
ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ**

Предложена методика раннего обнаружения дефектов теплопроводов конструкции «труба в трубе».

Ключевые слова: оперативный дистанционный контроль, методика раннего обнаружения дефекта, функция вероятностного обнаружения.

Возможность комплексного диагностирования тепловых сетей предполагает применение различных алгоритмов оценки состояния теплопроводов [1] и получения нормативов надежности на основе данных по их эксплуатации [2]. Достоверность результатов конкретного метода диагностирования и его влияние на показатель надежности проверяются опытным путем [3]. Очевидно, что использование большего количества методов диагностирования повышает вероятность своевременного обнаружения дефекта и увеличивает степень надежности, поскольку условия применимости конкретного метода имеют взаимодополняющие особенности [4]. Представленный анализ алгоритмов и методов оценки состояния теплосетей [1] основывался на эксплуатации действующих систем теплоснабжения, где большинство подземных трубопроводов расположено в каналах и имеет теплоизоляцию из минеральной ваты. Однако за последние 7–8 лет появился опыт эксплуатации теплопроводов конструкции «труба в трубе» с пенополиуретановой теплоизоляцией в гидроизолирующей оболочке из полиэтилена или оцинкованной стали.

Использование предварительно изолированных труб с теплоизоляцией из пенополиуретана налагает определенные ограничения на применение некоторых методов инструментальной диагностики тепловых сетей. Следовательно, объективно необходимым является включение в систему диагностирования дополнительных методов оценки, приборов и средств, позволяющих определить техническое состояние трубопроводов в пенополиуретановой изоляции. Инструментальный способ заложен в элементной базе самого трубопровода¹ с проводниками оперативного дистанционного контроля (ОДК).

Практика эксплуатации тепловых сетей свидетельствует о недостаточном внедрении системы ОДК на уровне 10–20 % в связи с малой информированностью специалистов, эксплуатирующих тепловые сети, о достоинствах и преимуществах системы контроля, а также повышенными требованиями к качеству монтажа трубопроводов, поскольку отклоне-

¹ СП 41-105-2002. Проектирование и строительство тепловых сетей бесканальной прокладки из стальных труб с индустриальной изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке: утв. Госстроем России 26.12.02: ввод в действие с 01.03.03. М., 2003. 34 с.

ния от технологии производства работ могут повлиять на показания системы ОДК.

Для исследования были использованы данные эксплуатации трубопроводов с пенополиуретановой изоляцией в полиэтиленовой оболочке за период эксплуатации 2007–2010 гг. общей протяженностью трасс 7,1 км в двухтрубном исполнении на 94 участках, оснащенных системой ОДК типа *Nordic* с двумя медными проводниками. Бесканально проложено 14 % трубопроводов, остальные в канале на песчаной подсыпке или опорах.

Контроль состояния трубопроводов проводился в соответствии с внутренними положениями по предприятию на основании документации ООО «Термолайн» «Руководство по применению. Система оперативного дистанционного контроля “Термолайн”» 2 раза в месяц переносным многоуровневым детектором ДПП-АМ для определения дефекта типа «намокание» и «обрыв». Ежеквартально проводился локаторный контроль рефлектометром «Рейс-105М» полным обследованием трубопровода с возможностью определить место дефекта, сохранением рефлектограмм и данных по сопротивлению изоляции и проводников.

Результаты диагностических проверок сохранялись в архиве, журнале обследования и паспорте тепловой сети. За время наблюдения выявлено 5 дефектов с истечением теплоносителя от некачественного монтажа сварных стыков, из них одно место утечки системой ОДК не определено и 30 дефектов от неплотностей изоляционной оболочки, из них 12 мест указано системой.

Пенополиуретан, применяемый в качестве теплоизоляционного материала, имеет большое электрическое сопротивление. Физическое свойство пенополиуретана, заключающееся в уменьшении значения электрического сопротивления при увеличении влажности, например, при появлении воды из-за повреждения полиэтиленовой оболочки или трубы, служит в качестве диагностического признака. Система ОДК считается работоспособной в случае, если электрическое сопротивление отдельного элемента трубопровода больше или равно 150 МОм и целостность сигнальных проводников подтверждена измеренным значением сопротивления проводов. Сопротивление изоляции смонтированной системы должно быть не менее 1 МОм при длине трубопровода до 300 м. Электрическое сопротивление изоляции измерялось между установленными в пенополиуретане медными проводами и стальной трубой. Данные, полученные по среднестатистическим замерам, представлены на рис. 1. Система является работоспособной, наблюдается снижение сопротивления изоляции с уменьшением диаметра трубопровода. Практическое значение сопротивления изоляции на работоспособных участках значительно больше минимально достаточных.

Пороговое сопротивление дефекта находится в пределах от 1 до 5 кОм. Выбор указанного диапазона, в котором должно находиться пороговое сопротивление, объясняется тем, что при данных значениях сопротивления изоляции в трубопроводе существует дефект, который можно локализовать. Наличие в детекторе нескольких уровней индикации позволяет определить появление дефекта на ранней стадии, до достижения критического значения сопротивления изоляции 5 кОм, если применить методику раннего обнаружения дефекта.

Методика раннего обнаружения дефекта заключается в периодическом использовании на обследуемом участке локатора поврежде-

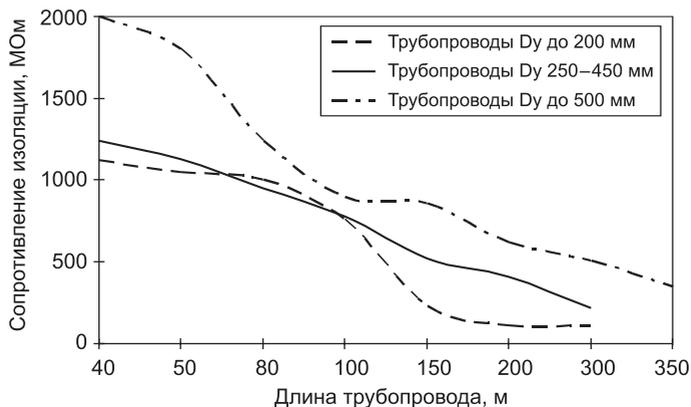


Рис. 1. Сопротивление ППУ изоляции трубопроводов в зависимости от длины участка

ний (импульсного рефлектометра) с занесением полученных результатов в базу данных. Изменение со временем значения сопротивления изоляции и данных рефлектограммы (график отраженных электрических импульсов) позволит сделать вывод о динамике развития повреждения.

Импульсный рефлектометр имеет функцию, использование которой повышает вероятность обнаружения дефекта и его более точное местонахождение. Данная функция позволяет сравнить две рефлектограммы, что необходимо, когда дефект только развивается. Для уточнения местонахождения дефекта рефлектограмма, полученная при измерении, сравнивается с эталонной, в качестве которой используются данные исследуемого участка, записанные сразу после монтажа трубопровода.

Основным фактором, влияющим на работоспособность системы ОДК, является технологическая составляющая монтажа трубопровода, которая в данном случае отнесена к случайным событиям, в отличие от анализа повреждаемости [2]. За отказ системы принято состояние, при котором не удастся обнаружить место дефекта с критическими параметрами.

По данным эксплуатации общий параметр потока отказов системы ОДК в одной трубе составил $\omega = 0,62$ (1/км год). Данный параметр учитывает утечки теплоносителя, дефекты изоляции и относится непосредственно к системе контроля, но должен влиять на надежность системы теплоснабжения как элемент трубопроводной системы. Распределение обнаруженных дефектов по возможности определения представлено на рис. 2. Трубопроводы сгруппированы по диаметрам для оценки влияния на возможность определения мест повреждения. Полученные данные показывают, что диаметр трубопровода не оказывает влияния на вероятность определения места дефекта.

Вся информация из памяти прибора сохранялась с использованием персонального компьютера с помощью специальной программы «Рейд-6». Программное обеспечение позволяет производить двусторонний обмен информацией прибора с компьютером, хранить и обрабатывать рефлектограммы, а также создать архив данных. С помощью архива процесс поиска мест дефектов значительно ускоряется и обнаружение дефектов становится возможным на более ранней стадии. Записанная при вводе в экс-

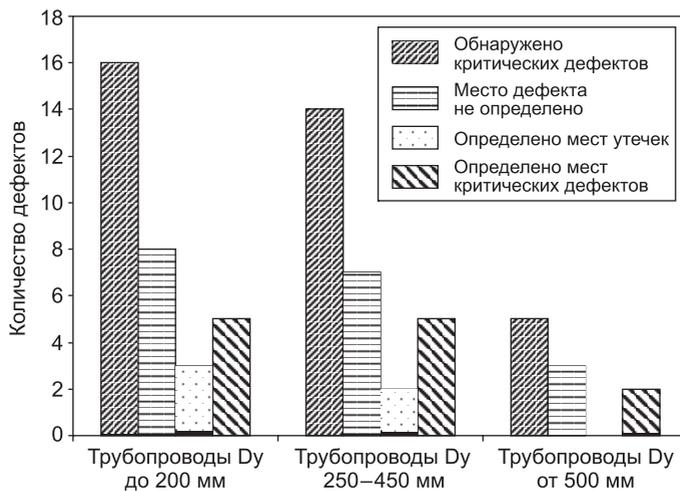


Рис. 2. Распределение обнаруженных дефектов по возможности определения

плуатацию теплотрассы и помещенная в архив рефлектограмма помечается характерными точками (дефекты, неподвижные опоры, повороты, отводы).

Надежность системы ОДК определяется в первую очередь состоянием изоляционной оболочки трубопровода. Невозможность определения места дефекта связана с повышенным влагосодержанием протяженных участков изоляции без достаточного локального увлажнения. Результаты наблюдений позволяют сделать вывод о практической вероятности обнаружения с помощью системы ОДК места утечки теплоносителя на уровне 0,8. Необходимо увеличение объема статистического материала для уточнения результатов исследования во временном интервале.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машенков, А.Н. О контроле состояния тепловых сетей [Текст] / А.Н. Машенков, А.В. Филимонов // Новости теплоснабжения. — 2003. — № 10. — С. 37–40.
2. Машенков, А.Н. Диагностика как элемент управления надежностью тепловой сети в процессе эксплуатации [Текст] / А.Н. Машенков, А.В. Филимонов // Приволжский научный журнал. — 2007. — № 2. — С. 49–51.
3. Машенков, А.Н. Особенности локализации повреждений на тепловых сетях с использованием средств акустического контроля поверхности грунта [Текст] / А.Н. Машенков, А.В. Филимонов // Изв. вузов. Строительство — 2003. — № 3. — С. 79–83.
4. Филимонов, А.В. Течеискатели для поиска утечек на тепловых сетях. Опыт регионов [Текст] / А.В. Филимонов, Ю.В. Никитенко // Новости теплоснабжения. — 2009. — № 5. — С. 49–51.

МАШЕНКОВ А.Н., канд. техн. наук, доц.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

ФИЛИМОНОВ А.В., начальник лаборатории диагностики

ООО «Нижегородтеплоэнерго»; E-mail: a.filimonov@nte.nnov.ru

г. Нижний Новгород

Получено после доработки 01.02.11

Mashenkov A.N., candidate of technical sciences, assistant professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Filimonov A.V., head of the laboratory diagnosis LLC «Nizhegorodteploenergo»; E-mail: a.filimonov@nte.nnov.ru, Nizhny Novgorod, Russia

PRACTICAL ASPECTS OF RELIABILITY TO THE SYSTEM OPERATIONAL REMOTE CONTROL OF THERMAL NETWORKS

The procedure of early detection of defects of heat conductors of a desing a pipe in a pipe is offered.

Key words: operating the remote control, the method of early detection of the defect, the function of the probability of detection.

REFERENCES

1. Mashenkov, A.N. Few words about the control of thermal networks [Text] / A.N. Mashenkov, A.V. Filimonov // Heatservis News. — 2003. — N 10. — P. 37–40.
 2. Mashenkov, A.N. Diagnosis as a control of thermal networks reliability in operation [Text] / A.N. Mashenkov, A.V. Filimonov // Volga journal. — 2007. — N 2. — P. 49–51.
 3. Mashenkov, A.N. Features of the localization of damage in thermal networks with the use of acoustic control surface soil [Text] / A.N. Mashenkov, A.V. Filimonov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2003. — N 3. — P. 79–83.
 4. Filimonov, A.V. Leak detectors to search for leaks heat networks. Experience regions [Text] / A.V. Filimonov, Yu.V. Nikitenko // Heatservis News. — 2009. — N 5. — P. 49–51.
-

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 539.3:625.7/.8

Е.А. ВОЛКОВА, А.А. ЛЯПИН, М.Г. СЕЛЕЗНЕВ, Е.В. УГЛОВА

О РЕШЕНИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуется обратная задача строительной механики об определении реальных модулей упругости материала основных слоев дорожной конструкции на основе характеристик динамического деформирования ее поверхности. Для трехслойной модели дорожной конструкции предложена итерационная схема решения, даются рекомендации по выбору параметров задачи для устойчивости данной схемы.

Ключевые слова: обратная задача, динамический прогиб, модули упругости.

Широкий круг практических проблем строительной механики решается на основе разработки и реализации расчетных моделей, описывающих особенности статического и динамического деформирования различных объектов. Основной проблемой является проблема адекватности расчетной модели реальности. Чаще всего адекватность расчетной модели подтверждают близостью расчетных данных с материалами эксперимента для частных случаев. В общем случае, как правило, требуется корректировка расчетной модели по данным натурального эксперимента. Для этого фактически необходимо сформулировать и решить обратную задачу механики, входными данными для которой являются результаты натуральных экспериментальных исследований. Решения обратных задач строительной механики, механики деформируемого твердого тела и механики сплошной среды определены общим математическим аппаратом. Они некорректны с математической точки зрения. Разработке и реализации математических методов решения обратных задач посвящен чрезвычайно большой объем публикаций, связанных с конкретными проблемами различных областей практической деятельности человека (строительство, разрушающие методы контроля объектов различного назначения, сейсморазведка полезных ископаемых, выявление дефектов и мн. др.) [1]. Опыт исследований иллюстрирует существенную зависимость методики решения от конкретной постановки задачи, используемых экспериментальных средств и методов обработки данных. При этом в большинстве случаев рассматриваются режимы динамического воздействия на объект как более информативные.

По результатам исследований, связанных с решением обратных задач, установлены важные факторы, определяющие эффективность подхода:

— выбор характеристики или параметра, являющегося критерием при определении искомых величин или зависимостей;

- наличие решения прямой задачи или формулировка краевой задачи для дифференциального уравнения или системы уравнений;
- выбор математического метода или алгоритма решения;
- контроль устойчивости алгоритма и достоверности получаемого результата (в этой части работы возможно получить доказательство единственности решения).

Рассмотрим обратную задачу строительной механики для конкретного типа объектов — дорожных конструкций. Одна из наиболее важных проблем дорожной отрасли — разработка методов получения объективной информации о ее состоянии с использованием неразрушающих инструментальных методов контроля.

Задача — определить реальные модули упругости материала основных слоев дорожной конструкции (асфальтобетона, основания и грунта земляного полотна) на основе характеристик динамического деформирования ее поверхности, которые могут быть получены с использованием экспериментальных средств и методов. При постановке задачи учитываем, что в ходе эксплуатации геометрические размеры слоев и их плотность изменяются слабо. Подобная постановка соответствует обратной коэффициентной задаче.

Исходные данные к решению задачи. 1. Расчетные характеристики динамического напряженно-деформированного состояния элементов системы при различных типах воздействия на основе решения прямой задачи (строятся *численно* с применением методов интегральных преобразований и гармонического анализа).

2. Информация об основных характеристиках (амплитудных, частотных) динамического деформирования поверхности конструкции при различных типах воздействия в *результате расчета или проведения натурных экспериментальных исследований* с использованием мобильного виброизмерительного комплекса. Его характеристики (чувствительность, диапазон рабочих частот и др.) хорошо изучены, отработана методика проведения натурных экспериментальных исследований и реализован программный комплекс числовой обработки данных.

Выбор метода решения обратной задачи. Реализация численного решения прямой задачи существенно ограничивает возможности использования основных методов решения обратных задач, базирующихся на аналитических подходах [1, 2].

Результат расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) поверхности дорожной конструкции при кратковременном ударе малой энергии показывает [3, 4], что изменение данной характеристики при варьировании модулей упругости исследуемой системы в пределах их реального изменения относительно мало. АЧХ имеет монотонно убывающий характер, определяемый отсутствием поверхностных и каналовых волн в слоистой структуре. Т.е. временная и частотная зависимости волновых характеристик фиксированной точки поверхности рассматриваемой области недостаточно информативны для решения поставленной обратной задачи. Это определяет необходимость выявления такой характеристики динамического деформирования поверхности, которая в наибольшей степени оказалась бы чувствительной к варьированию модулей упругости верхних слоев дорожной конструкции.

Обширный численный эксперимент на базе решения прямой задачи об ударе по поверхности среды показал, что такой характеристикой является изменение максимальной амплитуды вертикального смещения при удалении по поверхности конструкции от точки удара — «чаша максимальных динамических прогибов», определяемая *численно*. Эта характе-

ристика может быть также получена и на основе проведения натуральных измерений в результате установки на поверхности покрытия группы датчиков на разном удалении от точки удара. Изложенное определяет необходимость разработки *численного* алгоритма решения обратной задачи, с использованием одного из вариантов градиентных методов в сочетании с методом последовательных приближений. При его разработке и реализации, безусловно, будет выявлено практическое ограничение на число коэффициентов, подлежащих определению.

Пусть рассматриваемая область представляет собой многослойное полупространство, описываемое в цилиндрической системе координат (R, θ, z) как $R \geq 0, z \leq h, \theta \in [0, 2\pi)$, h — общая толщина слоев конструкции. Физические свойства среды будем характеризовать модулем упругости E_j , коэффициентом Пуассона ν_j и плотностью ρ_j , постоянными в пределах каждого j -го слоя ($j = 0, 1, \dots, N$), $j = 0$ соответствует подстилающему полупространству.

В общем случае решение обратной задачи приводится к функциональному уравнению в неявной форме для определения параметров E_j

$$U_z(R, E_j) = \varphi(R). \quad (1)$$

Здесь $U_z(R, E_j) = \max_{t \in [0, +\infty)} |U_z(R, z, t, E_j)_{z=h}|$ — расчетная чаша максимальных динамических прогибов (получаемая численно для заданных значений параметров);

$\varphi(R)$ — заданная форма чаши (в общем случае полученная в результате обработки экспериментальных данных).

$U_z(R, z, t, E_j) = \sum_k p_k \operatorname{Im}(U_z^{(k)}(R, z, \omega_k, E_j) e^{-i\omega_k t})$ — вертикальное перемещение

точки конструкции, найденное в данной работе методом гармонического анализа через суперпозицию стационарных решений на частотах ω_k и известных значениях коэффициентов p_k разложения импульса ударного воздействия на поверхности.

$U_z^{(k)}(R, z, \omega_k, E_j)$ в условиях осевой симметрии поверхностной нагрузки вычисляются в виде интеграла Фурье–Бесселя [4].

Здесь следует отметить, что важным моментом, определяющим достоверность результата и устойчивость алгоритма решения обратной задачи, является учет реальной погрешности получаемых экспериментальных данных при определении $\varphi(R)$. Эта погрешность имеет частотную зависимость, определенную различными факторами. Она может изменяться в зависимости от внешних (уровень, частотная характеристика воздействия, трансформация частотного спектра при прохождении колебаний от источника к объекту и др.) или внутренних факторов (погрешность обработки оцифрованных экспериментальных данных, точность расчета прямой задачи на основе разработанной по принятому алгоритму или программному комплексу модели и др.). Исследование влияния этих факторов на устойчивость алгоритма и точность решения обратной задачи представляет существенные сложности.

На основе поверки элементов виброизмерительного комплекса установлена его способность проводить достоверные измерения (погрешность порядка 3–5 %, линейность измеряемого ускорения) в диапазоне частот 1–300 Гц. Эти данные определяют изменение максимальной амплитуды вертикального смещения точки при прохождении пакета волн от воздействия удара малой энергии в тех же пределах (погрешность 3–5 %). Су-

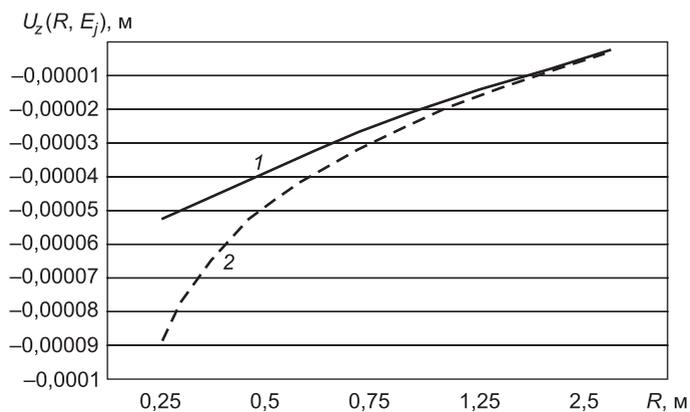
щественно, что эта погрешность фактически не изменяется при варьировании расстояния от источника колебаний до точки наблюдения (в пределах соотношения полезный сигнал / шум не менее 1,5, что обеспечивает достоверность результатов измерений на расстоянии не менее 3 м от ударной установки до точки наблюдения, значительно превышающем полудлину чаши статического прогиба оси грузового автомобиля). Поэтому влияние погрешности измерений на точность получаемого результата достаточно легко моделировать численно.

Методика решения обратной задачи. Для определения методики целесообразно провести анализ чаш максимальных динамических прогибов для конкретной конструкции, полученных по данным натурального эксперимента и в результате расчета по проектным данным. В ходе численного эксперимента дорожная конструкция рассматривалась как трехслойная система: слой покрытия (монолитные слои из асфальтобетона, обладающие изгибной жесткостью), слой основания (несвязные слои), земляное полотно. Грунтовый массив моделировался в виде двухслойного полупространства (слой на более жестком полупространстве). Расчетные характеристики моделируемых дорожных конструкций (толщины слоев и модули упругости), представленные в таблице, получены из проектных данных, а также из сопоставления с исследованиями материалов вырубки. Здесь следует отметить, что число параметров взято из анализа строения наиболее распространенных дорожных конструкций, где конструктивные слои с близкими характеристиками (два слоя асфальтобетона) рассмотрены как один.

В качестве примера на рисунке представлены графики чаш максимальных динамических прогибов при ударе по поверхности конструкции груза в 15 кг, сброшенного с высоты 1 м.

**Расчетные характеристики элементов модели
«дорожная конструкция — грунт»**

Расчетные параметры конструкции	Элементы модели «дорожная конструкция — грунт»		
	асфальтобетон	слой основания	грунт земляного полотна
Модуль упругости E , МПа	2300	283	47
Плотность ρ , кг/м ³	2250	1900	1700
Коэффициент Пуассона ν	0,35	0,3	0,35
Толщина h , м	0,2	0,5	3,0



Сопоставление расчетной чаши прогибов (1) и экспериментальной (2), замеренной в летний период, трасса М-4 «Дон»

На графиках видно, что расхождение расчетных и экспериментальных данных достаточно велико и изменяется в пределах чаши прогибов. Учитывая, что число искомых параметров равно трем, целесообразно и сопоставление этих кривых проводить в трех точках, поэтапно.

В результате ряда попыток разработки численного алгоритма восстановления параметров E_j из уравнения (1) на основе различных методик, можно предложить следующий алгоритм на основе итерационного процесса, включающего в себя следующую последовательность действий.

1. Численно находим

$$\frac{\partial U_z(R_k^{(0)}, E_0^{(0)}, E_1^{(0)}, E_2^{(0)})}{\partial E_j}, \quad j = 0, 1, 2,$$

по расчетной чаше максимальных динамических прогибов при проектных значениях $E_j = E_j^{(0)}$. Для получения численно устойчивых результатов достаточным является использование аппроксимации производной по Ньютону второго порядка

$$y'(x_k) = \frac{1}{\Delta x} \left[\Delta y_0 - \frac{1}{2} \Delta^2 y_0 \right] = \frac{1}{\Delta x} \left[y_1 - y_0 - \frac{1}{2} (y_2 - 2y_1 + y_0) \right]$$

при $|\Delta x / x_k| = 0,01$.

2. Выявляем на основе анализа частных производных

$$\frac{\partial U_z(R_k^{(0)}, E_i^{(0)})}{\partial E_j}, \quad j = 0, 1, 2 \quad \text{точки } R = R_k^{(0)},$$

в которых модули производных имеют максимальные значения. Число данных точек, наиболее чувствительных к изменению модулей упругости, должно совпадать с числом определяемых параметров (в данном случае $k = 1, 2, 3$).

3. Определяем главные члены разложения левой части уравнения (1) — расчетной чаши максимальных динамических прогибов по приращению неизвестных параметров

$$U_y(R, E_1^{(0)} E_2^{(0)} E_3^{(0)}) + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial U_y(R, E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, E_3^{(0)})}{\partial E_j} \Delta E_j$$

и требуем равенства этого выражения в узлах $R = R_k$ величинам максимального динамического прогиба в соответствующих точках, полученным экспериментально. В результате имеем следующую систему линейных алгебраических уравнений для определения ΔE_j :

$$\sum_{j=0}^2 \frac{\partial U_z(R_k^{(0)}, E_0^{(0)}, E_1^{(0)}, E_2^{(0)})}{\partial E_j} \Delta E_j = \varphi(R_k^{(0)}) - U_z(R_k^{(0)}, E_0^{(0)}, E_1^{(0)}, E_2^{(0)}), \quad (2)$$

$k = 1, 2, 3$.

По ΔE_j (2) величинам находим первое приближение значений искомых модулей упругости $E_j^{(1)} = E_j^{(0)} + \Delta E_j$.

4. Проводим расчет чаши максимальных динамических прогибов для полученных значений $E_j^{(1)}$ и повторяем процедуры пунктов 1, 2, 3 до достижения требуемой точности.

Здесь следует отметить, что относительная погрешность определения искомых параметров не может превышать наибольшую из относительных погрешностей определения чаш максимальных динамических прогибов из экспериментальных данных или численно.

Реализация изложенного алгоритма позволила получить решение обратной задачи для реальной дорожной конструкции (см. таблицу) магистрали М-4. Относительная погрешность восстановления модулей упругости E_j , $j = 0, 1, 2$ по теоретическим оценкам составляет 5 % и практически совпадает с данными исследования материала вырубки, проведенной на исследуемом участке дороги.

Достаточно важным для устойчивости алгоритма является выбор точек R_k в пределах чаши прогиба. Эти точки должны быть относительно равномерно распределены в пределах половины интервала прогиба в зонах, каждая из которых максимально зависит от изменения модуля упругости конкретного слоя. Так, центральная часть половины чаши прогиба (0–0,45 м) максимально определена состоянием верхнего слоя конструкции, средняя (0,45–0,9 м) — вторым слоем, а ближняя к краю чаши (0,9–1,35 м) — нижним слоем (грунтом земляного полотна).

Контрольные расчеты для этого и аналогичных ему случаев показали достаточную устойчивость предложенного алгоритма при восстановлении трех параметров (корректировка имела место для всех E_j). Очевидно, что увеличение числа определяемых параметров практически имеет существенные ограничения, в первую очередь по количеству внутренних слоев конструкции. В этом случае представляется целесообразным при наличии двух контактирующих слоев с близкими величинами модулей упругости проводить осреднение их физических характеристик, объединяя в единый слой, с контролем расчетной чаши динамических прогибов на поверхности среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обзор практических приложений обратных задач по определению структуры неоднородных сред [Текст] / Е.А. Аносова, Э.Н. Потетюнко; Рост. гос. строит. ун-т. — Ростов н/Д, 2005. — 248 с. — Библиогр. 121 назв. ; рус. — Деп. в ВИНТИ 30.05.05, № 764—В2005.
2. Ватульян, А.О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела [Текст] / А.О. Ватульян. — М. : Физматлит, 2007. — 223 с.
3. Илиополов, С.К. Динамика дорожных конструкций [Текст] / С.К. Илиополов, М.Г. Селезнев, Е.В. Углова. — Ростов-на-Дону : Рост. гос. строит. ун-т, 2002. — 258 с.
4. Илиополов, С.К. О расчете статического и динамического напряженно-деформированного состояния конструкций дорожных одежд [Текст] / С.К. Илиополов, А.А. Ляпин, М.Г. Селезнев, Е.В. Углова // Северо-Кавказский регион. Естеств. науки. — 1997. — № 1. — С. 44–47.

ВОЛКОВА Е.А., ассист.; E-mail: anosova@yandex.ru

Ростовский государственный строительный университет

ЛЯПИН А.А., д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: lyapin@aaanet.ru

Ростовский государственный строительный университет

СЕЛЕЗНЕВ М.Г., д-р физ.-мат. наук, проф.

Ростовский государственный строительный университет

УГЛОВА Е.В., д-р техн. наук, доц.; E-mail: uglova_e.v.@yandex.ru

Ростовский государственный строительный университет

Получено после доработки 19.01.11

Volkova E.A., assistant; E-mail: anosova@yandex.ru, Rostov State Building University, Russia

Lyapin A.A., doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: lyapin@aaanet.ru, Rostov State Building University, Russia

Seleznev M.G., doctor of physical and mathematical sciences, professor, Rostov State Building University, Russia

Uglova E.V., doctor of technical sciences, assistant professor; E-mail: uglova_e.v.@yandex.ru, Rostov State Building University, Russia

ON THE SOLUTION OF INVERSE PROBLEMS BUILDING MECHANICS ON THE BASED ON EXPERIMENTAL DATA

In this paper studied the inverse problem of structural mechanics of the definition of real elastic modulus of the material basic layers of road construction based on the characteristics of dynamic deformation of the surface. For the three-layer model of road construction proposed iterative solution scheme. Recommendations are made at the choice of parameters for the sustainability of the scheme.

Key words: inverse problem, elastics modulus, dynamic deflection.

REFERENCES

1. The review of practical applications of inverse problems on determining the structure of inhomogeneous structure [Text] / E.A. Anosova, E.N. Potetunko; Rostov State Building University. — Rostov, 2005. — 248 p. — References 121; in russian. — Institute for Scientific and Technical Information of Russian Academy of Sciences (VINITI), 30.05.05, N 764—B2005.
2. V a t u l i a n , A.O. The inverse problem in the mechanics of deformable solids [Text] / A.O. Vatulian. — M. : Physmatlit, 2007. — 223 p.
3. I l i o p o l o v , S.K. The dynamics of road constructions [Text] / S.K. Iliopolov, M.G. Seleznev, E.V. Uglova. — Rostov on Don : Rostov State Building University, 2002. — 258 p.
4. I l i o p o l o v , S.K. About of the calculation of static and dynamic stress-strain state of the road construction [Text] / S.K. Iliopolov, A.A. Lyapin, M.G. Seleznev, E.V. Uglova // Severo-Kavkazsky region. Natural sciences. — 1997. — N 1. — P. 44–47.

УДК 625.76

Д.А. СКОРОБОГАТЧЕНКО

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО
СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ
НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ**

Предлагается использование нечеткой нейронной сети для прогнозирования изменения эксплуатационного состояния автомобильных дорог. Предлагаемая методика позволяет использовать возможности нечеткой логики по обработке информации качественного характера. Преимуществом данного подхода является возможность устранения субъективизма, присущего логико-лингвистической модели прогнозирования на основе реализации процедур обучения нечеткой нейронной сети.

Ключевые слова: автомобильные дороги, моделирование эксплуатационного состояния, нечеткие нейронные сети.

Эксплуатационное состояние автомобильных дорог (ЭС АД) в существенной степени определяет развитие экономики страны [1]. В условиях недостаточного финансирования весьма актуально создание автоматизированных систем управления, важным элементом которых является методика прогнозирования изменения ЭС АД¹. В связи с тем, что процессы прогнозирования изменения ЭС АД достаточно сложны для анализа с помощью общепринятых количественных методов, а состояние автомобильной дороги удобно интерпретируется качественной информацией, была разработана методика прогнозирования на основе логико-лингвистического подхода [2].

Однако существенным уязвимым местом в методике прогнозирования ЭС АД на основе нечетких множеств является субъективизм построения сетки правил и функций принадлежности. Этот недостаток может быть устранен совмещением механизма нечеткого вывода с искусственными нейронными сетями [2]. Получаемая в результате этого объединения нечеткая нейронная сеть (ННС) способна к «обучению», т.е. к самостоятельной корректировке прогнозируемых результатов. В качестве метода обучения предлагается использовать алгоритм обратного распространения.

Общий вид ННС, используемой в модели прогнозирования ЭС АД, представлен на рис. 1 [4]. Рассмотрим послойную работу сети.

На первом слое (L_1) осуществляется ввод данных:

$$y_i^{L_1} = x_i, \quad \text{где } i = 1 \dots N. \quad (1)$$

Количество нейронов данного слоя N соответствует количеству входных переменных. В модели прогнозирования изменения ЭС АД используется ННС с двумя входами, сочетающими последовательно переменную

¹ Скоробогатченко Д.А. Управление распределением ресурсов на эксплуатацию автоторговой структуры региона // Управление региональными системами: интеграционный подход, факторное обеспечение, методы, модели: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 26-27 ноября 2009 г. Волгоград, 2009. С. 329–332.

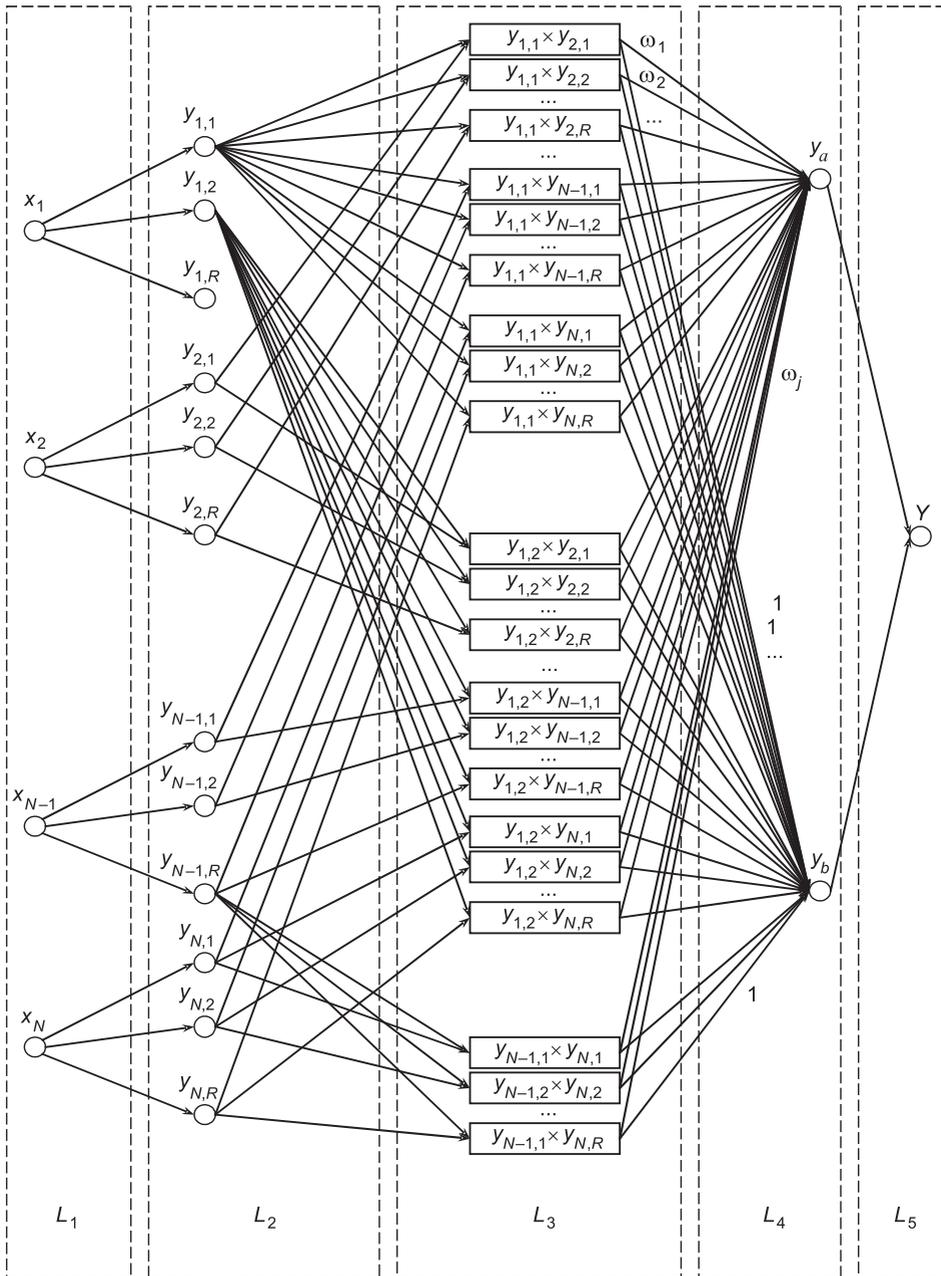


Рис. 1. Структура ННС, используемой в модели прогнозирования изменения ЭС АД

«начальное эксплуатационное состояние элемента автомобильной дороги» с переменной «воздействие на элемент автомобильной дороги факторов внешней среды» или с переменной «управляющее воздействие на элемент автомобильной дороги».

На втором слое (L_2) каждая переменная первого слоя представляется совокупностью ее функций принадлежности гауссовского типа:

$$y_{i,r}^{L_2} = \mu_r(y_i^{L_1}), \text{ или } y_{i,r}^{L_2} = \mu_r(x_i), \text{ где } i = 1..N, r = 1..R. \quad (2)$$

Количество нейронов данного слоя определяется как произведение количества входных нейронов первого слоя на количество соответствующих им функций принадлежности, т.е. $N \times R$. В реализуемой модели для

каждой входной переменной разработано по 9 нечетких множеств. (Для каждой из входных переменных, таких как «начальное эксплуатационное состояние элемента автомобильной дороги», «воздействие на элемент автомобильной дороги факторов внешней среды» и «управляющее воздействие на элемент автомобильной дороги», разработано по 9 нечетких множеств.) Поскольку каждая ННС включает две входные переменные (они сочетаются попарно), то общее количество нейронов данного слоя равно 18.

На третьем слое (L_3) осуществляется умножение значений функций принадлежности согласно разработанным нечетким правилам:

$$y_j^{L_3} = \prod_{\substack{i=1..N \\ r=1..R}} y_{i,r}^{L_2} \text{ или } y_j^{L_3} = \prod_{\substack{i=1..N \\ r=1..R}} \mu_r(x_i), \text{ где } i=1..N, r=1..R, j=1..J. \quad (3)$$

Очевидно, что нейроны данного слоя выполняют операцию минимизации (логического произведения). Выходной сигнал нейронов данного слоя представляет собой как бы «разрозненный прогноз» эксплуатационного состояния элемента автомобильной дороги по каждому отдельному правилу. Следовательно, количество нейронов данного слоя соответствует количеству разработанных нечетких правил J . Для модели прогнозирования изменения ЭС АД было разработано 162 правила.

На четвертом слое (L_4) осуществляется суммирование результатов произведений третьего слоя, помноженных на веса связей:

$$y_a^{L_4} = \sum_{j=1}^J \omega_j \cdot y_j^{L_3} \text{ и } y_b^{L_4} = \sum_{j=1}^J y_j^{L_3}, \text{ где } j=1..J \quad (4)$$

или

$$y_a^{L_4} = \sum_{j=1}^J \omega_j \cdot \left[\prod_{\substack{i=1..N \\ r=1..R}} \mu_r(x_i) \right] \text{ и } y_b^{L_4} = \sum_{j=1}^J \left[\prod_{\substack{i=1..N \\ r=1..R}} \mu_r(x_i) \right].$$

В данном слое находится всего два нейрона. Выход нейрона a получается как сумма произведений значений нейронов третьего слоя на веса связей. Выход нейрона b получается путем простого суммирования значений произведений третьего слоя. На данном слое получается прогнозируемое ЭС АД в нечетком, функциональном виде.

На пятом слое (L_5) осуществляется деление выходного сигнала нейрона a на выход нейрона b :

$$Y^{L_5} = \frac{y_a^{L_4}}{y_b^{L_4}} \text{ или } Y = \sum_{j=1}^J \omega_j \cdot \left[\prod_{\substack{i=1..N \\ r=1..R}} \mu_r(x_i) \right] / y_b^{L_4} = \sum_{j=1}^J \left[\prod_{\substack{i=1..N \\ r=1..R}} \mu_r(x_i) \right]. \quad (5)$$

Выходной сигнал нейрона пятого слоя представляет собой значение прогнозируемого ЭС АД по элементам. Реализованная таким образом ННС способна осуществлять прогноз ЭС АД на основе модели нечеткого вывода, описанной в [3].

Проиллюстрируем работу ННС по прогнозированию ЭС АД с использованием трех лингвистических правил и трех нечетких множеств (рис. 2).

Правило № 1: начальное ЭС АД = ниже «удовл.» и воздействие среды на ЭС АД = ниже «сред.» \Rightarrow конечное ЭС АД = ниже «удовл.».

Правило № 2: если начальное ЭС АД = «удовл.» и воздействие среды на ЭС АД = выше «сред.» \Rightarrow конечное ЭС АД = выше «неуд.».

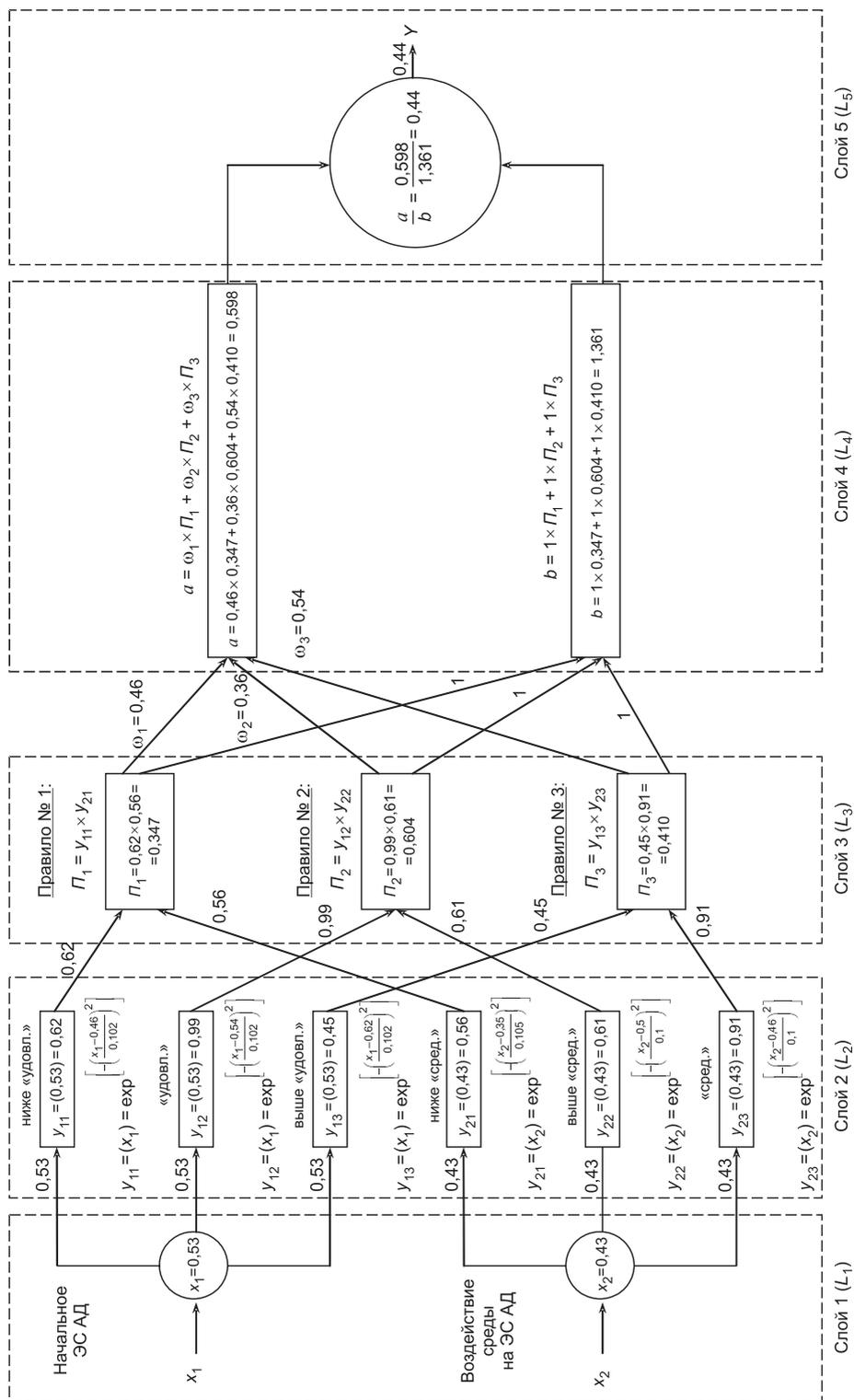


Рис. 2. Пример расчета значения прогнозируемого ЭС АД на основе ННС

**Вид функций принадлежности, нейронов второго слоя ННС
по прогнозированию изменения ЭС АД на основе трех правил**

ЭС АД			Воздействие среды на ЭС АД		
название	вид	значение при $x = 0,53$	название	вид	значение при $x = 0,43$
Ниже «удовл.»	$y(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-0,46}{0,102}\right)^2\right]$	0,62	Ниже «сред.»	$y(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-0,35}{0,105}\right)^2\right]$	0,56
«Удовл.»	$y(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-0,54}{0,102}\right)^2\right]$	0,99	Выше «сред.»	$y(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-0,5}{0,1}\right)^2\right]$	0,61
Выше «удовл.»	$y(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-0,62}{0,102}\right)^2\right]$	0,45	«Сред.»	$y(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-0,46}{0,1}\right)^2\right]$	0,91

Правило № 3: если начальное ЭС АД = выше «удовл.» и воздействие среды на ЭС АД = «сред.» \Rightarrow конечное ЭС АД = «удовл.».

Вид функций принадлежности используемых нечетких множеств представлен в таблице. Функции принадлежности переменных эксплуатационного состояния и внешнего воздействия строились на основе нормативных требований к эксплуатационному состоянию и климатологических справочников соответственно. Из рис. 2 очевидно, что прогнозируемое ЭС АД при заданных значениях входных переменных составляет 0,44.

Результат работы предлагаемой методики рассмотрим на примере прогнозирования эксплуатационного состояния автомобильной дороги Сызрань — Саратов — Волгоград на участке с 446 по 554 км на 2010 г. Данные о фактическом ЭС дороги в 2009 г. были получены на основании диагностики, проведенной Волгоградским филиалом ФГУП РосдорНИИ. С использованием метеорологических данных, сведений о транспортной нагрузке и работах, выполненных эксплуатирующими организациями, был составлен прогноз изменения ЭС рассматриваемого участка дороги на 2010 г. до и после обучения системы. Результаты проанализированы в сравнении с фактическим ЭС участка дороги в 2010 г., рассчитанным по результатам повторной диагностики (рис. 3).

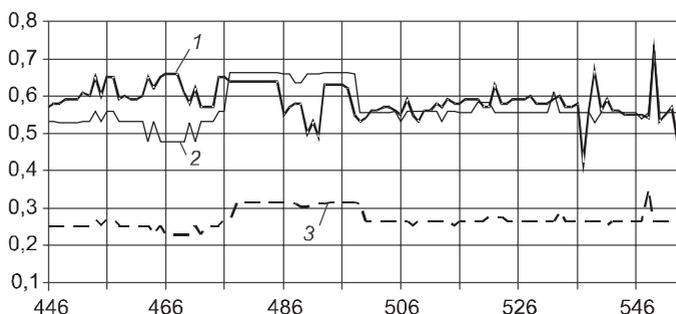


Рис. 3. Сравнение результатов прогнозирования ЭС автомобильной дороги Сызрань-Саратов-Волгоград (446–554 км) на основе качественной информации до и после обучения ННС
1 — фактическое ЭС; 2 — прогнозируемое ЭС после обучения;
3 — прогнозируемое ЭС до обучения

Вывод. Полученная в результате объединения логико-лингвистического подхода и нейронной сети гибридная модель прогнозирования по-прежнему продолжает использовать в своей основе механизм нечеткого вывода, однако, благодаря процессу обучения, присущему нейронным

сетям, устраняется субъективизм в формулировке вида правил и формы функций принадлежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляков, Г.С. Затраты и потребности [Текст] // Автомобильные дороги. — 2006. — № 6. — С. 28–29.
2. Боровик, В.С. Система оценки и прогнозирования изменения транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог [Текст] / В.С. Боровик, Д.А. Скоробогатченко // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 10. — С. 89–94.
3. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации [Текст] / С. Осовский. — М. : Финансы и статистика, 2004. — 344 с.
4. Скоробогатченко, Д.А. Применение нечетких нейросетевых моделей для прогнозирования уровня содержания автомобильных дорог [Текст] / Д.А. Скоробогатченко // Дороги и мосты. — 2010. — Вып. 23/1. — С. 138–146.

*СКОРОБОГАТЧЕНКО Д.А., канд. техн. наук, доц.
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено после доработки 26.01.11

Skorobogatchenko D.A., candidate of technical sciences, assistant professor, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

METHOD OF FORECASTING THE OPERATIONAL STATUS OF ROADS ON THE BASIS OF REPRESENTATION OF FUZZY SETS OF NEURAL NETWORKS

Proposes to use fuzzy neural network for forecasting changes the operational status of highways. The proposed method allows the use of fuzzy logic for processing qualitative information. The advantage of this approach is the possibility of eliminating subjectivity inherent logical-linguistic model predictions based on the implementation of the training procedures of fuzzy neural network.

Key words: roads, modeling the operational status, fuzzy neural networks.

REFERENCES

1. Belyakov, G.S. Zatraty i potrebnosti [Text] / G.S. Belyakov // Avtomobilnye dorogi. — 2006. — N 6. — P. 28–29.
2. Borovik, V.S. Sistema otsenki i prognozirovaniya izmeneniya transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobilnyh dorog [Text] / V.S. Borovik, D.A. Skorobogatchenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 10. — P. 89–94.
3. Osovsky, S. Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii [Text] / S. Osovsky — M. : Finansy i statistika, 2004. — 344 p.
4. Skorobogatchenko, D.A. Primenenie nechetkih neyrosetevykh modeley dlya prognozirovaniya urovnya soderzhaniya avtomobilnyh dorog [Text] / D.A. Skorobogatchenko // Dorogi i mosty. — 2010. — Fasc. 23/1. — P. 138–146.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

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

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ МОЛОТОК С ДРОССЕЛЬНЫМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

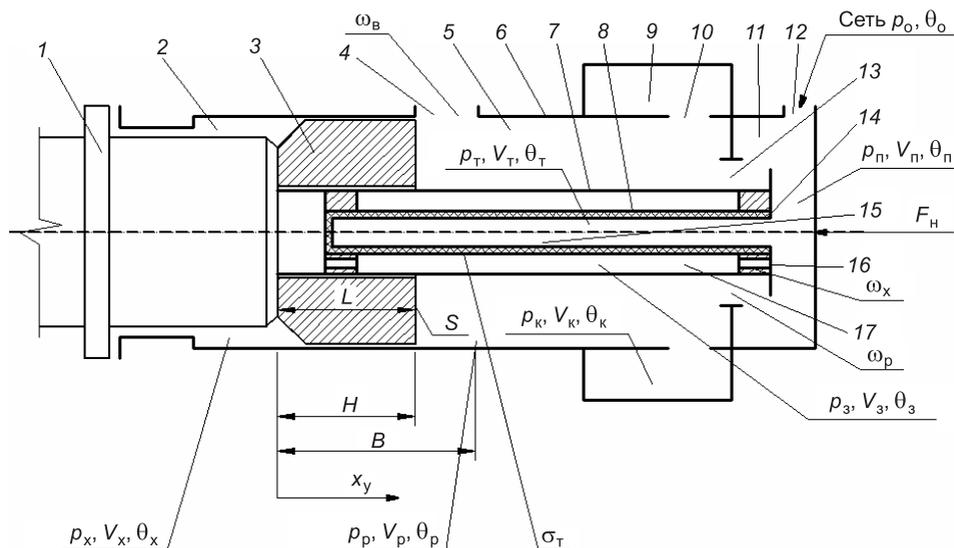
Рассматривается принципиальная схема и физико-математическая модель дроссельного пневмоударного механизма (ДПУМ) с трубкой из эластичного материала.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, ударник, центральная трубка, дополнительная трубка из эластичного материала, камеры рабочего и холостого хода, предкамера, сжатый воздух.

Поиски новых технических решений иногда приводят к принятию диаметрально противоположных предложений и реализаций. Например, замена жестких конструкций на эластичные, но при этом учитываются другие условия функционирования конструкции. Определение условий, при которых будет обеспечиваться надежность и устойчивость работы конструкции, является основной задачей исследований. Появление эластичных конструкций элементов воздухораспределения не ново, однако по ряду причин это направление не завоевало сколько-нибудь прочных позиций в практике создания и эксплуатации, например, пневматических машин ударного действия, наиболее экологичных в сравнении с паровоздушными, электрическими, дизельными, карбюраторными, гидравлическими, пороховыми и им подобными.

Объект исследования. Пневмоударный механизм с дроссельным воздухораспределением [1] изображен на рисунке. При его совершенствовании применена классификация [2].

Воздух из сети поступает по впускному каналу 12 в сетевую камеру 11. Из сетевой камеры 11 он проходит одновременно: по кольцевому дроссельному каналу 13 в камеру 5 рабочего хода и сообщенную с ней постоянно радиальным перепускным каналом 10 кольцевую аккумуляторную камеру 9; по каналу 14 в камеру 15 со стенками из эластичного материала, закрытую торцом со стороны камеры 2 холостого хода; через дроссельный канал 16 посредством кольцевого зазора между центральной трубкой 7 и дополнительной трубкой 8 из эластичного материала и посредством неплотностей прилегания торцов ударника 3 в камеру 2 холостого хода. Поскольку камера 5 рабочего хода сообщена радиальным выпускным каналом 4 с атмосферой, то давление воздуха в камере 5 рабочего хода будет близко к атмосферному, так как проходное сечение радиального выпускного канала 4 существенно больше, в сравнении с проходным сечением кольцевого дроссельного канала 13. За счет давления воздуха эластичные стенки камеры 15 начнут раздвигаться, перекрывая кольцевой зазор 17, и натекаемый воздух в камеру 2 холостого



Дроссельный пневмоударный механизм с эластичными дросселями впуска

L — длина ударника; S — площадь диаметрального сечения ударника; x_y — ход ударника; 1 — рабочий инструмент; 2 — камера холостого хода; 3 — ударник; 4 — радиальный выпускной канал; 5 — камера рабочего хода; 6 — полый цилиндр; 7 — центральная трубка; 8 — дополнительная трубка из эластичного материала; 9 — кольцевая аккумуляционная камера; 10 — радиальный перепускной канал; 11 — сетевая камера; 12 — впускной канал; 13 — кольцевой дроссельный канал; 14 — канал; 15 — камера; 16 — дроссельный канал; 17 — кольцевой зазор

хода создает противодействие, что обуславливает большие силы давления на эластичную стенку дополнительной трубки 7 из эластичного материала со стороны кольцевого зазора 17, поскольку наружная площадь дополнительной трубки из эластичного материала больше ее внутренней площади, под действием которых кольцевой зазор 17 остается открытым для пропуска воздуха из сетевой камеры 11 в камеру 2 холостого хода. Под действием возрастающего давления воздуха со стороны камеры 2 холостого хода ударник 3 начнет свое движение, совершая холостой ход.

Перемещаясь, ударник 3 перекрывает радиальный выпускной канал 4, вследствие чего давление воздуха в камере 5 рабочего хода и сообщенной с ней радиальным перепускным каналом 10 кольцевой аккумуляционной камере 9 будет повышаться за счет сжатия отсеченного в ней воздуха и воздуха, поступающего через кольцевой дроссельный канал 13.

Давление воздуха в камере 2 холостого хода понижается, несмотря на его поступление из сетевой камеры 11 посредством дроссельного канала 16.

При перемещении ударник 3 откроет радиальный выпускной канал 9 и из камеры 2 холостого хода произойдет выпуск отработавшего воздуха в радиальный выпускной канал 4 в атмосферу. Несмотря на поступление воздуха в камеру 2 из сетевой камеры 11, давление воздуха в камере 2 холостого хода установится близким атмосферному. При этом давление воздуха на наружную боковую поверхность дополнительной трубки 8 из эластичного материала снизится и при большем давлении воздуха на внутреннюю боковую поверхность дополнительной трубки 8 из эластичного материала со стороны камеры 15 поперечный кольцевой размер трубки увеличится и перекроет проходное сечение кольцевого зазора 17 между центральной 7 и дополнительной трубкой 8 из эластичного материала, в результате чего поступление воздуха в камеру 2 прекратится.

Ударник 3 под действием импульса, приобретенного со стороны камеры 2 холостого хода, будет продолжать перемещаться, сжимая воздух в камере 5 рабочего хода с одновременным перепуском посредством радиального перепускного канала 10 в кольцевую аккумуляционную камеру 9.

Исчерпав импульс давления холостого хода, ударник остановится и сразу же под действием давления воздуха со стороны камер 5 рабочего хода и кольцевой аккумуляционной камеры 9 начнет перемещение в сторону рабочего инструмента 1, совершая рабочий ход. Давление воздуха в камере 5 рабочего хода будет поддерживаться расчетным благодаря поступлению через кольцевой дроссельный канал 13 из сетевой камеры 11 и его перепуску через радиальный перепускной канал 10 из кольцевой аккумуляционной камеры 9.

Перемещаясь, ударник 3 перекроет радиальный выпускной канал 4 и в камере 2 холостого хода начнется процесс сжатия отсеченного в ней воздуха с повышением давления, которое передается через дроссельный канал 16 в кольцевой зазор 17 между центральной 7 и дополнительной трубкой 8 из эластичного материала.

Продолжая перемещение к рабочему инструменту 1, ударник 3 обеспечивает максимально возможное расчетное давление воздуха в камере 2 холостого хода, которое воздействует на большую наружную поверхность дополнительной трубки 8 из эластичного материала, обеспечивая при этом большую силу давления нежели действующая сила давления на внутреннюю поверхность дополнительной трубки 8 из эластичного материала со стороны камеры 15. Это обуславливает открытие проходного сечения кольцевого зазора 17 между центральной 6 и дополнительной трубкой 8 из эластичного материала, тогда поступление воздуха из сетевой камеры 11 через дроссельный канал 16 в камеру 5 холостого хода прекратится. Ударник 3, преодолев противодействие воздуха со стороны камеры 2 холостого хода, наносит удар по рабочему инструменту 1. Затем описанный процесс будет повторяться с той лишь разницей, что движение ударника при холостом ходе осуществляется за счет приобретенного импульса давления и импульса отскока от хвостовика.

Аналитическое описание рабочего процесса пневмударного механизма. Рассмотрим физико-математическую модель ДПУМ в виде баротермодинамического описания при действии сил, определяемых прочностными свойствами дополнительной трубки из эластичного материала.

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

p_0, p_p, p_x, p_n — давление воздуха соответственно в сети сжатого воздуха, камерах рабочего и холостого ходов, в сетевой камере;

функции сечений каналов:

$\omega_n, \omega_x, \omega_p, \omega_k$ — проходные сечения каналов соответственно в сетевую камеру, из сетевой камеры в камеру холостого и рабочего ходов, из аккумуляционной камеры в рабочую камеру;

$\omega_{ар}, \omega_{ак}$ — проходные сечения каналов выпуска отработавшего воздуха из камеры рабочего и холостого ходов в атмосферу;

$\varphi_{ар}, \varphi_{ак}$ — функции выпуска воздуха из камер рабочего и холостого ходов в атмосферу;

$\varphi_n, \varphi_p, \varphi_x, \varphi_k$ — бародинамические функции каналов впуска в сетевую камеру, из предкамеры в камеры рабочего и холостого ходов, из аккумуляционной камеры в камеру рабочего хода;

V_n, V_p, V_x — объемы соответственно камер сетевой, рабочего и холостого ходов;

$$W = \sqrt{\frac{2kR}{k-1}},$$

где k, R — показатель процесса, газовая постоянная.

Для сетевой камеры 11:

$$\frac{dp_n}{dt} = \frac{k}{V_n} [W(\omega_n \varphi_n - \omega_p(F_i) \varphi_p - \omega_x(F_i) \varphi_x)]. \quad (1)$$

Для камеры 5 рабочего хода:

$$\frac{dp_p}{dt} = \frac{k}{V_p - x_y S_y} \left[W(\omega_p(F_i) \varphi_p + \omega_k(x_y) \varphi_k - \omega_{ap} \varphi_{ap}) + p_p \frac{dx_y}{dt} S_y \right]. \quad (2)$$

Для камеры 2 холостого хода:

$$\frac{dp_x}{dt} = \frac{k}{V_x + x_y S_y} \left[W(\omega_x(F_i) \varphi_x - \omega_{ax} \varphi_{ax}) - p_x \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \quad (3)$$

где t — время;

x_y, S_y — площадь диаметрального сечения и ход ударника;

m_y — масса ударника;

k_y — коэффициент отскока ударника;

$\omega_x(F_i), \omega_p(F_i)$ — функции, зависящие от силы давления со стороны камер холостого и рабочего ходов;

$\omega_k(x_y)$ — функция, зависящая от перемещения ударника.

Уравнения подвижных частей ДПУМ:

$$\frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{S_y(p_x - p_p)}{m_y} \quad \text{при } x_y > 0, \quad (4)$$

$$\left(\frac{dx_y}{dt} \right)_0 = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_y \leq 0. \quad (5)$$

Принимая следующие допущения: $D_n > D_b, L_t \cong \text{const}, D_b = D_n - 2\delta_t$, получим

$$\begin{cases} F_n = p_3 L_t \pi D_n, \\ F_b = p_t L_t \pi D_b, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_n = \sigma_t L_t \pi D_n, \\ F_b = \sigma_t L_t \pi D_b, \end{cases} \quad (7)$$

где D_n, D_b — соответственно наружный и внутренний диаметр дополнительной трубки из эластичного материала;

L_t, δ_t — соответственно длина и толщина дополнительной трубки из эластичного материала;

F_n, F_b — сила, действующая с наружной и внутренней стороны дополнительной трубки из эластичного материала;

p_3, p_t — давление, действующее со стороны зазора и дополнительной трубки из эластичного материала;

σ_t — предел прочности дополнительной трубки из эластичного материала.

Допущения и ограничения для впуска канала камеры холостого хода. Из уравнений (6) и (7) следует, что $p_3 = \sigma_T$ и $p_T = \sigma_T$, т.е. $p_T = p_3 = \sigma_T$:

$$p_H L_T \pi D_H = \sigma_T L_T \pi D_H, \quad \text{следовательно, } p_H = \sigma_T, \quad (8)$$

$$p_B L_T \pi D_B = \sigma_T L_T \pi D_B, \quad \text{следовательно, } p_B = \sigma_T. \quad (9)$$

Отсюда можно сделать вывод, что $p_H \equiv p_B \equiv \sigma_T$, но значение предела прочности имеет значение $\sigma_T = \pm \sigma_T$.

В данном примере рассмотрен случай, когда перекрытие зазора между центральной и дополнительной трубкой из эластичного материала зависит от силы, прикладываемой с разных сторон к дополнительной трубке из эластичного материала с учетом ее прочностных свойств. Также возможны и варианты для рассмотрения, когда перекрытие зазора зависит и от давления, и от перемещения ударника.

$$\omega_x(p_i) = \begin{cases} \omega_x = \max \omega_x & \text{при } p_H > p_B, \\ \max \omega_x > \omega_x > 0 & \text{при } p_H = p_B, \\ \omega_x = 0 & \text{при } p_H < p_B, \end{cases} \quad (10)$$

$$\omega_x(F_i) = \begin{cases} \omega_x = \max \omega_x & \text{при } F_H > F_B, \\ \max \omega_x > \omega_x > 0 & \text{при } F_H = F_B, \\ \omega_x = 0 & \text{при } F_H < F_B, \end{cases} \quad (11)$$

$$\omega_x(x_y) = \begin{cases} \omega_x = 0 & \text{при } x \geq B, F_H < F_B, \\ \omega_x = \max \omega_x & \text{при } x \leq H, F_H > F_B, \\ \max \omega_x > \omega_x > 0 & \text{при } B > x > H, F_H = F_B. \end{cases} \quad (12)$$

Выводы. 1. Проходное сечение канала впуска в камеру холостого хода может быть определено по одной из трех зависимостей: $\omega_x(p_i)$, $\omega_x(F_i)$ и $\omega_x(x_y)$.

2. Предложенные варианты зависимостей для ω_x позволяют выбирать наиболее предпочтительный по расходу воздуха, энергии или частоте ударов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ 2380214. Пневматический молоток с дроссельным воздухораспределением [Текст] / Д.Д. Абраменков, Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Е.В. Иржанский, А.А. Кутумов и др. — Оpubл. 27.01.2010, Бюл. № 3.
2. Абраменков, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные [Текст] : справ. пособие / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.

ЧУБАРОВ П.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ГЛАДЫШЕВ Г.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

АБРАМЕНКОВ Д.Э., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

*АБРАМЕНКОВ Э.А., д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено после доработки 01.11.10

Chubarov P.V., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Gladyshev G.V., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov D.E., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov E.A., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PNEUMATIC HAMMER WITH THROTTLE AIR DISTRIBUTION

In this the basic scheme and physical and mathematical model of the pneumatic shock mechanism with tube of elastic material are considered.

Key words: pneumatic shock mechanism, drummer, central tube, additional tube of elastic material, chambers of operating and idle strokes, prechamber, compressed air.

REFERENCES

1. Patent of Russian Federation 2280214. A pneumatic hammer with throttle air distribution [Text] / D.D. Abramenkov, D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, E.V. Irghancky, A.A. Kutumov and others. — Publ. 27.01.2010, Bul. N 3.
2. **Abramenkov, E.A.** Pneumatic mechanisms of machines of shock action: throttle, jet, unspool, valveless [Text] : reference manual / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk: Publishing house NSU, 1993. — 430 p.

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 711

И.В. КУКИНА

«ИСКУССТВО ВЫЖИВАНИЯ»: НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОНЦЕПЦИИ «ИДЕАЛЬНОГО ГОРОДА» В XXI В. В ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАНАХ

В конце XX — начале XXI в. в ряде зарубежных стран опробованы некоторые «модели» градостроительства, разработанные в прикладных исследованиях, связанных с генеральной глобальной целью градостроительства последних десятилетий — «устойчивого развития». При всем разнообразии зарубежного опыта складывается довольно четкий «собирательный образ» города постиндустриального этапа развития, выраженный в опробованных на практике архитектурно-планировочных концепциях.

Ключевые слова: адаптивное планирование, «совершенный микрорайон», «сообщество сообществ», «буферные зоны», «цементирование» социального сообщества.

«Искусство выживания» — довольно известное в начале XXI в. определение, используемое для группы ландшафтно-градостроительных проектов и сооружений и в трудах критиков архитектурно-градостроительного творчества в зарубежных странах. К процессу думать и творить в одном направлении профессиональные сообщества разных стран привела череда событий мирового уровня, принятие ряда глобальных документов, направленных на разработку «новой модели цивилизации» на Земле и градостроительных доктрин в этой связи. Девиз эпохи — создание биосферосовместимого и развивающего человека города, что характерно и для отечественной цели развития страны [1].

Стало ясно, что теория градостроительства XX в., направленная на совершенствование промышленного города, уже не в состоянии объяснить, каким он должен стать на постиндустриальном этапе становления мирового хозяйства. Начиная с 1973 г. происходит переход от приоритета производства товаров к производству услуг; к интеллектуализации труда; информатизации общества и повышению уровня образования; гуманизации и дематериализации экономики и ее социально-культурной ориентации; к установлению приоритетов малого и среднего бизнеса; сохранению окружающей среды.

В зарубежных странах в конце XX в. очередное проектирование генеральных планов городов было связано с пересмотром целого ряда, казалось бы, незыблемых правил градостроительства и установления новых аксиом.

1. *Составление стратегий развития городов с позиций их «экологического» или как минимум «функционального» отпечатка.* Планы развития городов Большого Ванкувера, Стокгольма как центра региона

Малар, Статистического округа Атланты, региона Эль-де-Франс (Парижа) и др. составляют *только с позиций рассмотрения города в регионе* как части системы поселений, связанных устойчивыми экономическими и транспортными связями. Такой подход строится на утверждении Герберта Гирардета о том, что у человечества нет другого выхода, как изменить метод отношения градосистем к биосфере, поэтому следует рассматривать каждый регион земли как удаленный район, который поставляет необходимые ресурсы Большому Миру, при этом исчерпывая собственные без компенсации. Гирардет подчеркивает, что город имеет свой «физический» метаболизм, превышающий многократно суммарный жителей, живущих в его границах. Учитывая огромное влияние на окружающую среду, города действительно следует признавать суперорганизмами в биосфере.

2. *Введение адаптивного планирования.* Чтобы попытаться как-то представить последствия современной жизнедеятельности городов, компания по производству горючесмазочных материалов (International Gas Union) проводит конкурс на проектирование городов на период в 100 лет. Такой временной интервал потребовал понимания глобальных процессов, обычно недооцениваемых в генеральном проектировании на 20–25 лет, таких как изменение климата, рост численности населения, изменение этнико-национального и демографического состава, истощение природных ресурсов, падение геологической стабильности, рост уровней развития технологий. Названные процессы невозможно запланировать с достаточной степенью реальности, «экологический отпечаток» в сотню лет весьма сложно поддается прогнозированию, поэтому возникла идея адаптивного планирования, в дальнейшем с успехом внедренная в ряде перспективных стратегий развития градосистем. Суть проектно-прогнозного метода заключается в постоянной корректировке генерального плана, что как будто бы не ново, но с поправкой на обязательность сверки с предполагаемыми глобальными изменениями, которые обычно в системе любого мониторинга не учитываются.

3. *Понятие город* в определенном смысле подменяется *понятием компактная метрополия*. Удержание процессов урбанизации на определенных территориях, «возврат» в естественные ареалы пригородных земель экстенсивного использования, восстановление нарушенных территорий возможно при установлении режимов более рационального использования территории города и окружающих его населенных мест, природных богатств. Ограничивающим объектом (в прямом смысле «граница») проектируются буферные зоны различного назначения.

4. *«Провалы градостроительной ткани»*¹. Установление режимов рационального использования территории города связано с тщательной инвентаризацией земель и с изучением материально-пространственных причин его сегрегации. Среди проблемных территорий исследователи выделяют четыре группы объектов: «крупные внутренние дыры», неопределенного происхождения, устаревшие промышленные предприятия, оборудование и технологии, старые порты, железнодорожные станции и ареалы их обслуживания [2]. В международной практике появились около сотни крупномасштабных проектов по «заполнению» неких неактивных в развитии территорий — «крупных внутренних дыр» под девизами: «вторичного использования», реабилитации, трансформации пространства. Так, например, программа развития Барселоны базировалась на опре-

¹ Terrain vague (англ.).

делении таких «щелей» в ткани города с тем, чтобы определить дальнейшее развитие сложных пространств. Быстрая замена устаревших производственных технологий привела к потребности переоборудования предприятий, поиск более дешевого и более «мобильного» труда привел к тому, что образцовые в недавнем прошлом предприятия (опора экономики) пришли к ветхости и представляют социальную, экономическую и прочие проблемы. Например, Фиат Лигнотто в Турине, Рено в Париже, Пирелли Биккока в Милане и др. В большинстве случаев это закрытые от городских пространств, ориентированные «вовнутрь» образования. Сломать градостроительный стереотип самодостаточного «места», ввести новые функции задача более чем сложная.

5. Поэтому возникла *идея «консультирования» реконструкции*: на предварительном этапе к участию в поисковых программных проектах пригласить как можно больше участников, чтобы рассмотреть возможные варианты оптимизации реконструкции, найти цену таковой. Метод «консультирования» также включает прорабатывание иницилирующих программ, очерчивающих идеи реорганизации урбанизированной территории и последовательность действий. Идея консультирования процесса реконструкции относится к 1984–1985 гг.

6. *Элементарной планировочной единицей «десегрегированного» города принято считать «усовершенствованный» (завершенный)² микрорайон («комьюнити»)* [3]. В исследованиях, проводимых в разных странах, в настоящее время признается, что идея микрорайона XX в. держалась на жестком функциональном делении территории: на жилую, рекреационную, центральную. Зона приложения труда размещалась за красной линией, но в непосредственной близости к жилой зоне. Последствия конверсии приводят к выводу о том, что жесткая структура микрорайона должна быть пересмотрена в связи с наблюдаемым повсеместно «несанкционированным» развитием в жилой среде общественно-деловой зоны. Модель «быт — труд — отдых» в строго отведенных местах должна быть изменена на смешанное «многофункциональное» жилой среды «усовершенствованного комьюнити».

В зарубежных странах одной из сложнейших проблем стала социальная и имущественная территориальная сегрегация разных семей. Критика жилищной сегрегации представителями «чикагской школы социальной экологии» (Э. Бэрджесс, Р. Парк, Г. Хойт) привела к идее социально смешанных жилых соседств, удовлетворяющих спрос семей, принадлежащих и к разным возрастным группам и имеющим неодинаковый доход. Эти идеи породили архитектурный тип смешанной жилой застройки. Наиболее приемлемой в данной связи считается Шведская модель проектирования микрорайона, когда архитектурным группам находят собственные территории, разделенные внутренними буферами: гребнями, оврагами, долинами ручьев, но связанные зрительно и пешеходной сетью (Веллингбю, Стокгольм). Родственные идеи собственного микрокосма с осознаваемыми границами, системой предупреждающих знаков «Это Мое!» и одновременно с пространственной зрительной связностью с «Большим Миром» разрабатываются в серии проектов, получивших название «Калифорнийский сад» в США. Для России эта проблема становится немаловажной, поскольку угроза деления микрорайонов, разного рода «закрытых» поселков в границах города очевидна, а создание приемлемых социально-планировочных «сочетаний» в

² Complete (англ.).

границах отдельно взятого микрорайона при современной регламентной базе, проектных технологиях не представляется возможной.

Очевидно, при планировании жилых образований становится необходимой «незаконченность проекта», предусматривающая возможность «достроек» по мере возникающих в микрорайоне новых потребностей, волеизъявления развивать тот или иной бизнес, те или иные формы общения. Проект должен иметь многостадийный характер и уточняться в процессе жизнедеятельности жилой среды.

7. В преодолении территориальной сегрегации становится актуальной «доступность» физическая, например, до школы, предприятия и т.д. и социально-экономическая — до комфортного, благоустроенного жилья, объектов образования, культуры. В данной связи важное место отводится созданию общественных пространств, где могли бы проводиться массовые праздники, фестивали, акции и пр.

8. «Сообщество сообществ». Ландшафтно-экологический подход к представлению о современном городе привел в частности к пониманию того, что на территории «сообщества» имеют право на жизнь и другие «сообщества». Не будет неверным утверждение, что ключевой вопрос в данном случае есть вопрос установления границ жизненного пространства разных уровней «сообществ» на общей территории, да так, чтобы во всех границах наблюдалась позитивная динамика развития. Уровни составляют: сообщество социальное — граждане, общественные организации, администрации, фирмы, пр.; планировочное — «сообщество» «сообществ» (микрорайонов), их архитектурная цельность, функционально-планировочная связность; естественные сообщества — преимущественно аборигенные биологические виды.

9. Ядра «урбороста». В ранг достаточно жестких градостроительных регламентов во многих странах возводятся требования не на удержание границ любой ценой, а на стимулирование развития ядра, центра, ключевых объектов для каждого из сообществ. Здесь следует говорить о таком явлении, как «ландшафтный урбанизм» — модель градостроительства по определению В. Каганского, когда интересы проектировщиков смещаются от объектов к процессам [4]. Именно поэтому возникает естественный вопрос о месте — территории «oikos» каждого сообщества. Толерантность толерантностью, а жизненные циклы как любого биологического вида, так и любого сообщества подвержены своим законам и мало совпадают с умозаключениями проектировщиков. Поэтому «проектируется» создание благоприятных условий изменения материально-пространственной среды эволюционным путем, но с заданными характеристиками. Такая противоречивая задача объясняется способностью градообразований к «гибкости саморазвития». П. Смитсон подчеркивает, что данный процесс есть установление отношений «между улицами и зданиями, между строениями, между деревьями, сезонами года, элементами декора и событиями и даже людьми»³, подтверждая незыблемую значимость архитектурной мысли для любого структурного элемента сложнейшей системы «Город».

10. К концу XX в. важной задачей становится «цементирование»⁴ социального сообщества (комьюнити)⁵ на определенной территории с тем, чтобы в процесс планирования городского развития все глубже

³ Palej A. Architecture for, By and with Children: A Way to Teach Livable City. 2000. Conference paper.

⁴ Concretion (англ.).

⁵ Community (англ.).

включалась «основная движущая сила»⁶ — местное население, занятое в малом и среднем бизнесе. Социальная и коммерческая активность граждан должна привести к формированию положительной экономической динамики и устойчивому развитию всего региона. По мнению зарубежных исследователей, в архитектурно-планировочном смысле первый этап развития коммьюнити — осознание территории как «мое» и установление границы, второй этап — их размывание до состояния «пористой губки» и обеспечение сосуществования различных сообществ на общей территории. Именно согласованные волеизъявления индивидуумов составляют в данном случае основу социально-культурной ориентации, гуманизации экономики и установление приоритетов малого и среднего бизнеса.

11. *Метод неформального планирования.* Наиболее полно, эффективно, но и наиболее сложно с точки зрения управления развитием населенных мест учесть чаяния сограждан возможно при использовании метода планирования «снизу — вверх», который занимает начальную ступень проектного процесса — формулирование задания на проектирование «по потребности» населения и конечную — принятие проектного решения к воплощению. Начальная стадия (формулирование проектной задачи) осуществляется на собраниях совета микрорайонов со свободным доступом всех желающих жителей микрорайона при постоянном консультировании и координировании действий специалиста отдела по вопросам градостроительства администрации города.

12. *Гибкость и вариативность, контролируемая системой налогообложения.* Проектное решение и «доведенность» его до понимания граждан в североамериканских странах, например, проверяется более чем прагматичной сущностью человека — готовностью оплатить строительство запроектированного объекта через возрастание суммы налогов. Гибкость, многовариантность сценариев развития градообразований в то же время может значительно тормозить, а зачастую и делает невозможным строительство очевидно значимых объектов.

13. Поэтому особенно актуальной становится «образовательная» плоскость работы с гражданами города. Она включает популяризацию общенаучных и мировоззренческих основ современного градостроительства через социальную и волонтерскую профессиональную работу как подготовку к диалогу с административными органами и проектировщиками. Особенную значимость приобретают четко сформулированные прикладные концепции, кратко и исчерпывающе раскрывающие преимущества той или иной идеальной модели. В последние двадцать лет постепенно сформулированы приемлемые для гражданского общества понятия, составляющие градостроительный «язык» общения с профессиональными кругами и контроля за их деятельностью. В России в практику некоего управления жилыми объектами и территориями вошли ТСЖ, однако суть их организации, области деятельности и полномочий иная.

14. *Создание коммуникативной материальной среды.* Второй стороной «образовательной» плоскости работы с гражданами города является язык «ландшафтных решений», использующий в «диалоге» с обывателями композицию открытых пространств и философское мировоззрение «глубокой экологии». Портфолио ландшафтных проектных фирм содер-

⁶ Определение «главной движущей силы развития населенного места — сообщества, проживающих на данной территории» дано в Стратегическом плане развития Большого Ванкувера 1996 г.

жат в своих арсеналах блестяще воплощенные, легко читаемые парки и сады, прагматичные по задачам проектирования, сложнейшие, но понятные по несомой информации, как, например, парк деревни Йорквилль в форме филигранной выставочной шкатулки, заполненной географическими зонами Каскадных гор для «изучения» любым желающим (архит. Кен Смит); парки-«мемориалы»-напоминания-уроки прошедшей промышленной эпохи — Гэзворк (архит. Р. Хааг) и др. Главное — создать такую среду обитания, чтобы у подрастающего поколения воспитывалось чувство особенности «места, где я живу», гордости за него, модель поведения «только в сообществе», толерантности ко всему живому, гуманистические ориентиры в самых высоких смыслах, стойкие поведенческие ориентиры «по другому нельзя» и т.д.

15. *Буферные зоны как метод толерантного градорегулирования*, трактуемые и рассчитываемые не только и не столько на погашение разного рода территориально-планировочных конфликтов, сколько на «связывание» сегрегированных ареалов современного города. Их проектируют на всех уровнях градостроительства от регионального до ландшафтного дизайна дворовых пространств. Наиболее проблематичными считается восстановление естественных режимов русел речных систем на урбанизированных территориях, океанических и морских побережий и очистки воздушного бассейна. Принцип — восстановление ареалов естественных сообществ. Поэтому буферные водоохранные зоны регламентируются из расчета самовосстановления речных долин и характерных для них биологических видов и назначаются для каждого типа хозяйственной деятельности вдоль долины реки индивидуально, подвергаются мониторингу и корректировке. Для сравнения: водоохранные зоны в Российской Федерации устанавливаются строго в 50 м от линии воды. Естественные миграции животных, насекомых, птиц никак не совпадают с жизнедеятельностью человека на земле, поэтому для них проектируются специальные «зеленые пути» в разных уровнях с транспортными и пешеходными потоками человека.

Кратко перечисленные изменяемые концепции градостроительного проектирования, вошедшие в зарубежных странах в практику в последние 10–15 лет, базируются во многом на адаптированных научных исследованиях в области естественных, социальных, философских, точных наук, объединенных идеями «ландшафтного урбанизма», в то же время представляют в сумме достаточно приемлемый аппарат проектирования постиндустриального «города XXI в.».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильичев, В.А. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека [Текст] / В.А. Ильичев // Градостроительство. — 2009. — № 3. — С. 20–30.
2. Кукина, И.В. Концептуальное осмысление структуры «агломерации» в зарубежных странах [Текст] / И.В. Кукина // Проблемы развития агломераций России: сб. науч. тр. РААСН / URSS. — М., 2009. — С. 83–106.
3. Кукина, И.В. Развитие научных концепций элементарных жилых образований в конце XX — начале XXI века [Текст] / И.В. Кукина, И.Г. Позднякова // Жилищное строительство. — 2010. — № 11. — С. 42–48.
4. Беседы о ландшафте: на вопросы ПР отвечают Евгений Асс и Владимир Каганский // Проект Россия. — № 54. — С. 98–116.

*КУКИНА И.В., канд. архит., доц.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

Получено 19.01.11

Kukina I.V., candidate of architecture, assistant professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**«ART OF SURVIVAL»: FEW ASPECTS OF THE «IDEAL CITY»
CONCEPT IN XXI CENTURY IN FOREIGN COUNTRIES**

At the end of XX – beginning XXI century some city structure «concepts» were tried out in the few countries, which were elaborated in the applied science associated with the main global goal of the city planning and design of the last decades – «sustainable development». In spite of the diversity of the foreign experience very exact «generalized character» of the postindustrial city are appeared, which expressed in architectural and planning and design concepts.

Key words: adopting planning, «complete community», «community of communities», «buffer zones», civil society «concretion».

REFERENCES

1. Ilichev, V.A. The principles of the transformation of the city into compatible with biosphere and developing human beings [Text] / V.A. Ilichev // Gradostroitelstvo. — 2009. — N 3. — P. 20–30.
2. Kukina, I.V. Conceptual rethinking of the «agglomeration» structure in the foreing countries [Text] / I.V. Kukina // The problems of the agglomeration development in Russia: collection of the scientific papers of RAASN / URSS. — M., 2009. — P. 83–106.
3. Kukina, I.V. Scientific concepts developing of the elementary dwelling units at the end of XX – beginning XXI century [Text] / I.V. Kukina, I.G. Pozdnyakova // Zhilishnoe stroitelstvo. — 2010. — N 11. — P. 42–48.
4. Conversations about landscape : Eugeny Ass and Vladimir Kagansky are answering to the questions of PR // Project Russia. — N 54. — P. 98–116.

УДК 725.182(571.1/:5)

Д.Я. РЕЗУН, И.П. КАМЕНЕЦКИЙ

**ФОРТИФИКАЦИОННЫЕ СООРУЖЕНИЯ КУЗНЕЦКА
И ЕГО АДМИНИСТРАТИВНОЙ ТЕРРИТОРИИ В XVII–XVIII вв.**

Показан процесс формирования военно-оборонительных укреплений сибирского фронтального города, его административной территории, выявлены основные этапы в их возведении, отражены изменения в русском крепостном строительстве в конце XVII — начале XVIII в.

Ключевые слова: сибирский город-крепость, оборонительные сооружения, основные этапы крепостного строительства и его эволюция.

Задача настоящей статьи — воссоздать облик сибирского фронтального города, определить роль и значение оборонительных укреплений в его градостроительной системе и административной территории, выявить основные этапы в развитии фортификационного строительства Южной Сибири.

Объект изучения — город-крепость Кузнецк, самый южный форпост Западной Сибири, который дольше других городов сохранял свое военно-оборонное и стратегическое значение в системе сибирского фронта и имел самые значительные военно-оборонные укрепления.

Возникнув в 1618 г. в верховьях Томи среди немирных народов, Кузнецкий острог, получивший статус города в 1622 г., представлял собой типичное деревянное укрепление в форме четырехугольника с двумя «глухими» и одной проезжей (воротной) рублеными башнями протяженностью около 200 саженей. Дополнительные укрепления — земляной вал и «острожек» — защищали город и возникшее под острогом «государево поле». Вскоре к острогу примкнул посад, укрепленный четырьмя башнями и крепостной стеной [1]. В 1648 г. в трех верстах от города в степи был возведен Крестовоздвиженский мужской монастырь, выполнявший роль сторожевого форпоста.

В 1658 г. Кузнецкий острог подвергся пожару, но вскоре его восстановили и даже расширили. Вдоль Иванцевской протоки продолжили крепостную стену, где возник крепостной посад с одноименной улицей [2]. Согласно городской росписи 1661 г., основу крепостных сооружений Кузнецка по-прежнему составлял деревянный острог с тремя башнями. На них размещался значительный «огненный наряд». На воротной башне находилось 8 «затинных» пищалей различного веса, на угловой башне напротив «колмацкого торговища» имелись 4 пищали и на третьей — 3. Государево поле и служилые пашни, прилегающие к городу, были обнесены стеной из бревен с бойницами, их также защищал небольшой острожек. По-видимому, в 1670-е гг. в Кузнецке были построены дополнительные укрепления, поскольку городская роспись 1680 г. наряду с указанными башнями упоминает Спасские ворота с колокольней, в верхнем и нижнем ряду которых имелось 5 пищалей с ядрами¹. Схожие оборонительные со-

¹ РГАДА, ф. 214, кн. 716, л. 399.

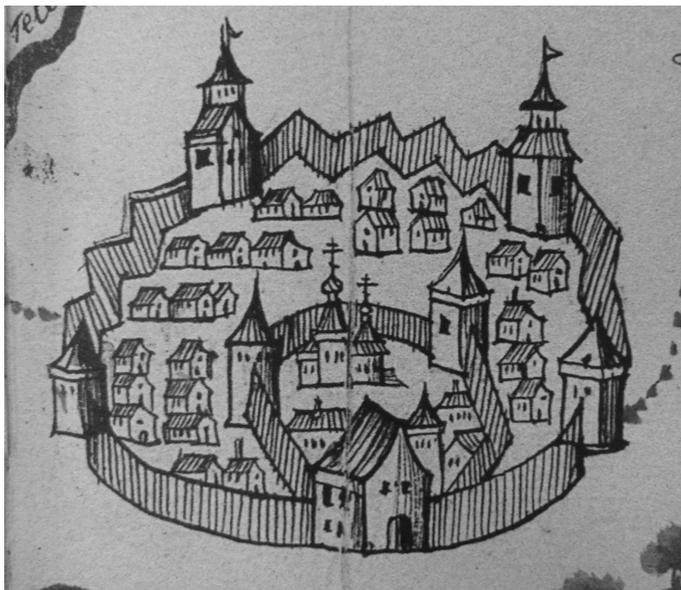


Рис. 1. Кузнецкий острог. Фрагмент «Чертежной книги Сибири» С.У. Ремезова. Нач. XVIII в. Репринт

оружения имели в XVII в. все сибирские города. Частая осада города телеутскими и джунгарскими правителями побуждала местную и центральную власть постоянно заботиться об его укреплении (рис. 1).

Значительные изменения в оборонительной системе города произошли в 1687 г. после падения Албазина. При осаде его китайским войском впервые использовались деревянно-земляные укрепления, возведенные в соответствии с требованиями европейского фортификационного искусства. Руководил их строительством находившийся на русской службе англичанин Афанасий Бейтон [3]. После этого события кузнецкий воевода И.М. Конищев получил правительственное предписание укрепить город и предместье. В результате выполнения инженерно-строительных работ новыми укреплениями города стали земляной вал высотой 2 м, ров длиной 791 сажень; наверху вала по предложению служилых людей поставили «туры», в местах пересечения вала дорогами, ведущими в Томск и в «колмаки», устроили земляные «городки» с башнями.

Построенная за валом стена из бревен (обруб) длиной 4250 м защищала прилегающие к городу пашни. Для ведения стрельбы в ней сделали «бойницы». Общая длина вала и рва составила 1684 м. Кроме того, часть посада на берегу Иванцевской протоки огородили надолбами длиной 533 м. Вся протяженность городской укрепленной черты равнялась 2450 м². Возведение этих укреплений во многом было инициировано служилыми людьми, осуществлялось без правительственных проектов и их строительство в значительной мере продолжало традиции старого крепостного зодчества, берущего свое начало еще в XV–XVI вв. Но уже на рубеже XVII–XVIII вв. в связи с нарастанием военных угроз наместились новые элементы в сооружении крепостных сооружений. Наиболее зримо они проявились в первые десятилетия XVIII в.

18 сентября 1700 г. Кузнецк подвергся тяжелой недельной осаде джунгарами и енисейскими киргизами, сопровождающейся большими людскими и материальными потерями. В ходе осады погибло много защитников, был сожжен Крестовоздвиженский монастырь и разорены подгородние деревни. Выдержать жителям осаду помогла своевременно

возведенная линия обороны и стойкость защитников. Для предотвращения и отражения новых вторжений усилили крепостную стену протяженностью 1050 сажень с пятью башнями. На ее башнях и стенах сосредоточили значительный «наряд», состоящий из 14 пушек, 3 пищалей «затинных» с большим боезапасом.

Согласно «городовой росписи» 1705 г., градообразующим ядром Кузнецка по-прежнему являлся трехбашенный «малый» острог, в котором размещались административные здания: воеводский двор, приказная изба, церковь, тюрьма, пороховой погреб, амбары с продовольствием и пушниной². Основное население проживало за стенами внешнего укрепления — «большом городе» — остроге с пятью башнями «мерю 1050 сажень по стенам». В нем насчитывалось 290 жилых дворов и необходимая городская инфраструктура: гостиный и кружечный дворы, торговые ряды, кузницы, пивоварня и другие строения, находившиеся под защитой уже указанных земельно-деревянных укреплений. На подступах к Кузнецку также имелась значительная линия обороны. По указу Петра I все пригородные деревни были укреплены надолбами и рогатками, протяженность которых зависела от количества дворов. Самые большие укрепления имело село Ильинское, в нем рядом с церковью находились острожек «мерю 100 сажень» и надолбы протяженностью 660 сажень³. Но и этих сооружений было недостаточно. Летом 1709 г. большое войско джунгар и телеутов вновь осадило Кузнецк. Нападение было отбито, но при отступлении кочевники сожгли несколько подгородних деревень. В следующем году джунгары осадили и сожгли только что отстроенный кузнецанами Бикатунский острог⁴. В 1715 г. они разгромили отряд Бухгольца в осажденной Ямышевской крепости.

Под влиянием этих событий и новых угроз правительство Петра I потребовало от сибирских властей развернуть фортификационные работы, которые наряду с усилением существующих укреплений (стен, башен) включали в себя и строительство новых крепостных сооружений, выполненных в соответствии с инженерно-строительными требованиями петровского времени [4]. Используя уже испытанную тактику «мирного наступления крепостями» экспедициями из Кузнецка, Тары и Тобольска, за короткий период смогли возвести сеть новых фронтальных укреплений: Бердский острог, Омская и Белоярская крепости (1717 г.), Бийская, Долонская и Семипалатинская (1718 г.), Усть-Каменогорская и Кольванская (1720 г.) крепости. С возведением этих крепостей и началом строительства демидовских заводов на Алтае Кузнецк начинает утрачивать былое стратегическое значение, но сохраняет статус крупного военно-административного центра.

В официальных документах он упоминается как «укрепленный город», к ведомству которого, согласно переписи 1719 г., относились Белоярская, Бийская крепости, Бердский острог, Малышева слобода, Мунгацкий станец, 150 сельских населенных пунктов⁵. В отличие от крепостей Иртышской линии, выстроенных по принципу бастионной системы, кузнецкие крепости во многом сохраняли черты старых оборонительных конструкций.

Будучи в 1734 г. в Бийской крепости, выдающийся исследователь Сибири Г.Ф. Миллер отметил: «Сооружение крепости состоит из положен-

² РГАДА, ф. 214, ст. 1052, л. 251–252.

³ РГАДА, ф. 214, кн. 1425, л. 143об. — 144; ст. 1052, л. 251–252.

⁴ ААН, ф. 21, оп. 5, д. 152, л. 137.

⁵ РГАДА, ф. 214, кн. 1611, л. 1–191.

ных поперек друг на друга бревен и вбитых между ними кольев и имеет вид продолговатого четырехугольника. Его длина вдоль реки составляет 24 сажени, а ширина 20 сажень. На четырех углах построены башни для стрельбы. Еще одна башня находится под воротами, которые ведут в крепость со стороны противоположной реки... Вдоль крепости есть еще ров с поставленными вокруг рогатками и надолбами»⁶.

Преобладание традиционных оборонительных структур при строительстве новых приобских крепостей и других укреплений, очевидно, объяснялось тем, что они возводились местными служилыми людьми и крестьянами, которые были слабо знакомы с военно-инженерными новшествами. В отличие от них иртышские крепости сооружались уже силами регулярной армии под командованием опытных военных инженеров. Так, Ямышевская, Омская и Семипалатинская бастионные крепости строили солдаты под руководством артиллерии поручика шведа И. Каландера. Конструктивные особенности этих крепостей нашли свое отражение в последующей реконструкции Кузнецкой крепости, осуществленной в конце 20-х — начале 30-х гг.

Г.Ф. Миллер, посетивший Кузнецк в 1734 г., отметил наличие в городе развитой оборонительной системы, содержащей в себе разные типы укреплений, обеспечивавших надежную защиту жителей и городских строений от вражеских нашествий. В своем «Описании Кузнецкого уезда» он сообщал: «Острог все еще находится в центре города. Для его большей защиты от нападений киргизов и калмыков в 1717 г. на самом верху берега Томи, севернее острога основана еще одна цитадель, связанная посредством деревянной стены с городом. Острог возведен на средней высоте берега четырехугольным палисадом длиной по окружности 194 сажени. В ней находится соборная церковь Преображения Господня, дом воеводы, канцелярия, различные магазины и амбары...

Вне острога находится до пятисот домов горожан..., которые расположены частично в нижней части берега и частично на его средней высоте и которые имеют приходскую церковь, посвященную Св. Одигитрии Богородице. Здесь еще есть часовня..., а вся окружность по обводной стороне со стороны суши, построенной из положенных друг на друга бревен и вбитых между ними кольев и имеющих 8 ворот, составляет 2 версты 284 сажени. В эту окружность также заключена цитадель, которую соорудили по структуре тамошнего гористого берега из насыпанных четырехугольником валов с бастионами на углах и двумя воротами, под которыми стоят деревянные башни, длиной 188 сажений и шириной в 38 сажений. В ней, кроме часовни, не находится больше никаких зданий. А ворота как этой цитадели, так и нижнего города защищены пушками, которых в общей сложности имеется: 1 железная четырехфунтовая, 4 медные и 4 железные трехфунтовые, 2 медные и 2 железные двухфунтовые и 1 медная и 1 железная, треснувшие вместе с относящейся к ним амуницией»⁷.

Приведенное Миллером обозрение свидетельствует, что Кузнецк представлял собой крупную военную крепость со значительным военно-оборонным и наступательным потенциалом, игравшую важную роль в становлении русского господства на юге Западной Сибири. Являясь главной опорной базой России в регионе, она как никакой другой сибирский форпост отвечала геополитическим замыслам и планам Петра I, стремившегося прочно утвердиться в Южной Сибири путем строительства в ней

⁶ РГАДА, ф. 199, порт. 526, ч. 2, д. 1, л. 15–15об.

⁷ РГАДА, ф. 199, порт. 526, ч. 2, д. 1, л. 11–12об.

новых укрепленных пунктов и устранения притязаний Джунгарии и Китая на неосвоенную территорию Алтая и Верхнего Прииртышья. Строительство новых оборонительных структур и демидовских заводов в самом центре Алтая привело к ухудшению и без того напряженных отношений с правительствами Джунгарии, неоднократно требовавшими срыть все крепости, построенные русскими в верховьях Оби и Иртыша. Но в условиях активизации враждебных действий джунгар разбросанные на значительном расстоянии, слабо связанные между собой русские крепости не способны были в полной мере противостоять им и защитить все возрастающий приток русских колонистов. Отсутствие фиксированной демаркации границ с Джунгарией, а затем и с Китаем также создавало в Южной Сибири большие трудности в защите новых российских владений. Учитывая эти обстоятельства, правительство Анны Иоанновны предпринимает очередные шаги по созданию более совершенной системы обороны и пограничной линии на своих новых рубежах.

Перед сибирской администрацией встала сложная задача — объединить существующие крепости и остроги в единую линейную систему, усилить ее дополнительными укреплениями и тем самым превратить в государственную границу, способную защитить весь Южносибирский регион. Новая граница по замыслу правительства должна обеспечивать надежную охрану Колывано-Воскресенских заводов, порубежных русских поселений и ясачных двоеданческих волостей от внешних угроз, повысить значение удаленных друг от друга острожно-крепостных сооружений и, главное, обозначить официальные пределы российских владений в условиях неопределенности и подвижности южносибирского фронта.

В 1733 г. Сибирской губернской канцелярией был получен сенатский указ об осмотре «мест, где надлежит быть границе с Красноярскими пограничными волостями с землями калмыцкого владельца, всего Кузнецкого ведомства, по которым урочищам или рекам и прочим признакам описание учинить и чертежи приготовить»⁸. После выполнения съемок местности Верхнего Приобья, составления ландкарт, осуществленных опытным геодезистом В. Шишковым и его учеником П. Сомовым, и многочисленных консультаций военной и гражданской администрации Сибири с Сенатом в апреле 1736 г. был разработан план строительства новой системы обороны, получивший название Колывано-Воскресенской линии. В ходе ее осуществления (1746–1769 гг.) создана новая укрепленная линия от Кузнецка до Усть-Каменогорска протяженностью 581 верста. В нее вошли 5 крепостей: Кузнецкая, Бийская, Катунская, Ануйская, Усть-Каменогорская, 6 форпостов, 6 защит, 3 редута, 16 маяков и полумаяков, станец⁸. Строительство новых и укрепление старых сооружений осуществлялись уже по унифицированным типовым проектам с учетом стратегической целесообразности, характера местности и их функциональных особенностей. Большинство линейных укреплений имело форму четырехугольников с бастionsами и пушками по углам, сторожевые маяки, каланчи, валы, палисады, надолбы, рогатки и другие защитные конструкции. Наряду с ними на линии строились почтовые и постоялые дворы, конюшни, казармы, жилье для военнослужащих и другие жизненно важные объекты. При строительстве учитывалось также наличие на линии лесов, плодородных земель, водных и сухопутных путей сообщения и других необходимых условий,

⁸ Старкова В.Е. Формирование системы охраны Верхнего Приобья в XVIII–XX вв. // История Алтайского края XVIII–XX вв. Науч. и докум. материалы. Барнаул, 2005. С. 72, 73.

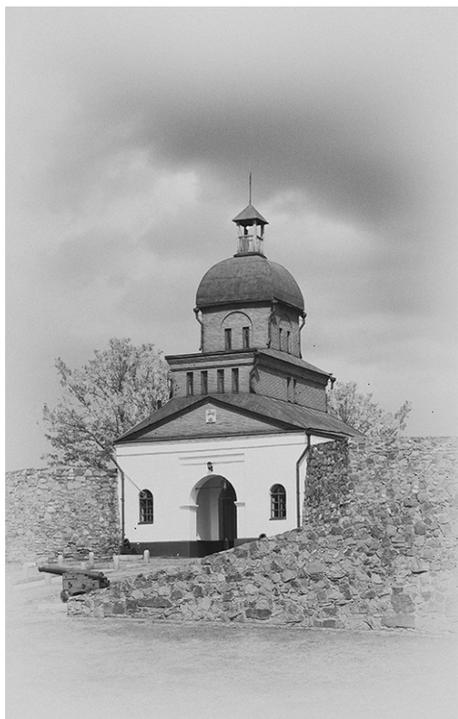


Рис. 2. Кузнецкая крепость в начале XX в.



Рис. 3. Разрушенная крепость. Нач. 1990-х гг.

способствующих росту приграничного населения, хозяйственному освоению края, развитию торговых связей с соседними народами и государствами.

Следующим этапом военно-инженерного строительства, завершившим эволюцию оборонного деревоземляного зодчества сибирских городов, стало возведение в Кузнецке на рубеже XVIII–XIX вв. единственной в Сибири каменной крепости-цитадели на горе Вознесенской. Новая крепость вобрала в себя все достижения фортификационного искусства своего времени. За высокой каменной стеной разместились трехэтажная башня, казарма, офицерский дом, арсенал, госпиталь и прочие здания. Все крепостные сооружения были обнесены валом с полубастионами, рентами, сортириями и другими новейшими конструкциями⁹. Однако эта хорошо укрепленная цитадель не имела практического военного значения. Возведенная в связи с мнимой военной угрозой, она вскоре прекратила свое существование и превратилась в своеобразный символ военной мощи и господства России в Южной Сибири (рис. 2).

Таким образом, в защите Кузнецка и его административной территории большую роль играли фортификационные оборонительные сооружения (рис. 3, 4). В их строительстве можно выделить ряд этапов. На первом этапе (1618–1687 гг.) преобладала традиционная башенная система укреплений. В последующий период до основания первых верхнеиртышских крепостей получила распространение смешанная (деревоземляная) система оборонительных укреплений. На третьем этапе (1715–1760-е гг.) в связи со строительством новых крепостей и созданием Кольвано-Воскресенской линии наблюдается переход от смешанной к линейной бастионной системе укреплений. Высшим этапом военно-инженерного зодче-

⁹ Прибыткова А.М. Кузнецкая крепость // История СССР. 1975. С. 135.



Рис. 4. Кузнецкая крепость после реконструкции. 2007 г.

ства стало строительство каменной крепости-цитадели на горе Вознесенской. В возведении указанных систем ярко отразились изменения в сибирском крепостном строительстве, в котором органично сочетались черты древнерусской (народной) оборонной архитектуры с достижениями европейского военно-инженерного искусства XVIII в.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сергеев, В.И. Город мастеров огненного дела [Текст] / В.И. Сергеев // Вопр. истории. — 1969. — 204 с.
2. Кочадамов, В.И. Первые русские города Сибири [Текст] / В.И. Кочадамов. — М., 1978. — 104 с.
3. Александров, В.А. Россия на дальневосточных рубежах (Вторая половина XVII в.) [Текст] / В.А. Александров. — М., 1969. — 137 с.
4. Огурцов, А.В. Типологическая классификация русских укреплений в конце XVII—середине XVIII в. [Текст] / А.В. Огурцов // Проблемы охраны и освоения культурно-исторических ландшафтов Сибири. — Новосибирск, 1986. — С. 132–133.

РЕЗУН Д.Я., д-р ист. наук

Институт истории СО РАН, г. Новосибирск

КАМЕНЕЦКИЙ И.П., канд. ист. наук, доц.

Омский институт (филиал) Российского государственного торгово-экономического университета

Получено 12.07.10

Rezun D.Ya., doctor of historical sciences, Institute of History of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

Kamenetsky I.P., candidate of historical sciences, assistant professor, Omsk Institute (Branch) of the Russian University of Trade and Economics

FORTIFICATION CONSTRUCTIONS OF KUZNETSK AND ITS ADMINISTRATIVE TERRITORY IN XVII–XVIII CENTURIES

The article presents the process of formation of military-defensive fortifications and administrative territory of the Siberian frontier city. The basic stages in their erection and changes in Russian fortification construction in the end of XVII — the beginning of XVIII centuries are revealed and considered.

Key words: the siberian city-fortress, defensive fortifications, basic stages of fortification construction and its evolution.

REFERENCES

1. Sergeev, V.I. The city of fireworkers [Text] / V.I. Sergeev // The Questions of History. — 1969. — 204 p.
 2. Kochedamov, V.I. First russian cities in Siberia [Text] / V.I. Kochedamov. — M., 1978. — 104 p.
 3. Aleksandrov, V.A. Russia on the Far East frontier (The second half XVII century) [Text] / V.A. Aleksandrov. — M., 1969. — 137 p.
 4. Ogurtsov, A.V. Typological classification of russian fortifications in the end of XVII — middle XVIII century [Text] / A.V. Ogurtsov // The problem of preservation and use of the cultural and historical landscapes Siberia. — Novosibirsk, 1986. — P. 132–133.
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.014.2

А.А. КИКОТЬ, Е.В. МУРЗИН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГИБОВ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Разработаны алгоритм и компьютерная программа определения прогибов изгибаемых элементов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей. Учитывается изменение эффективного сечения по длине элемента, вызванное потерей местной устойчивости и потерей устойчивости формы сечения. Приведены некоторые результаты численного исследования влияния геометрических параметров сечения С-профиля на прогиб. Показаны области предпочтительного применения программы.

Ключевые слова: стальные тонкостенные холодногнутые профили, изгиб, расчет прогибов.

В последние годы в России интенсивно развивается область металлостроительства, связанная с применением стальных тонкостенных холодногнутых профилей из оцинкованной стали. Такие конструкции применяются при малоэтажном жилищном строительстве, при надстройке над существующими зданиями дополнительных этажей, в том числе мансардных. Из таких профилей выполняются легкие каркасы небольших пролетов зданий различного назначения (производственные, складские, торговые, спортивные, здания, предназначенные для нужд малого бизнеса, и т.д.). Наконец, такие профили, чаще Z-образного сечения, широко применяются в качестве прогонов в покрытии.

Одна из основных особенностей рассматриваемых профилей — их тонкостенность. В С-, Z- и Σ -образных холодногнутых профилях из оцинкованной стали отношение ширины плоской части пояса к толщине b_e/t может достигать 70, а отношение плоской части стенки к толщине h_e/t — 200. Как следствие, существенной особенностью работы конструкций из таких профилей является высокая степень вероятности потери местной устойчивости сжатых участков пластин, составляющих профиль уже на ранних стадиях нагружения. Потеря местной устойчивости характеризуется выпучиванием отдельных участков пластин под действием сжимающих нормальных и/или касательных напряжений без смещения линий сопряжения пластин (линий гиба). Известно, что потерявшая устойчивость пластинка способна воспринимать возрастающую нагрузку¹. Иными словами, она и, следовательно, профиль обладают за критической несущей способностью, причем зачастую довольно значительной.

¹ Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. М.-Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1946. 532 с.

Кроме того, открытые тонкостенные профили подвержены такому явлению, как потеря устойчивости формы сечения. В данном случае поперечные деформации охватывают две смежные пластины сечения и смещение линиигиба, например, между сжатыми поясом и отгибом, что приводит к изменению формы сечения². Профиль, в котором произошла потеря устойчивости формы сечения, также может воспринимать дополнительную нагрузку, хотя и меньшую, чем при местной потере устойчивости³. Характер деформаций в изгибаемом профиле С-образного сечения при упомянутых формах потери устойчивости представлен на рис. 1.

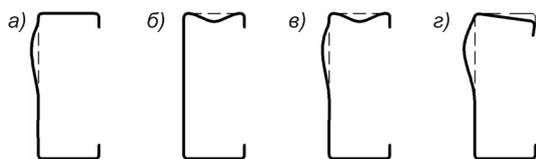


Рис. 1. Формы потери устойчивости изгибаемого тонкостенного профиля С-образного сечения
a — местная потеря устойчивости стенки; *б* — местная потеря устойчивости пояса; *в* — местная потеря устойчивости пояса и стенки; *г* — потеря устойчивости формы сечения

Расчет строительных конструкций по предельным состояниям предполагает в том числе и проверку прогибов балочных конструкций.

В дальнейшем будем считать, что потеря общей устойчивости изгибаемого элемента исключена конструктивными мероприятиями, например, надежным креплением стального профилированного настила, который при определенных условиях можно считать достаточной опорой в горизонтальном направлении для сжатого пояса изгибаемого элемента [1–3]. Также конструктивно обеспечена устойчивость стенки на опоре.

Проследим работу изгибаемого элемента из стального тонкостенного холодногнутого профиля, например, С-образного сечения при пошаговом увеличении нагрузки. При относительно низких уровнях нагружения, когда местная устойчивость компонентов профиля (пояс, стенка, отгиб) обеспечена, прогибы элемента определяются обычным способом с учетом геометрических характеристик полного сечения.

На некотором этапе работы в наиболее нагруженном сечении или сечениях может произойти потеря местной устойчивости пояса или стенки, или же отгиба. С нарастанием нагрузки зоны выпучивания в потерявших устойчивость компонентах профиля будут расширяться как по сечению, так и охватывать все новые поперечные сечения по длине элемента. Кроме того, могут потерять устойчивость до сих пор устойчивые компоненты. На рис. 2 представлен изгибаемый элемент после потери местной устойчивости верхнего сжатого пояса и стенки, тем не менее продолжающий воспринимать возрастающую нагрузку. В практике расчетов предполагается, что потерявшие устойчивость участки профиля уже не воспринимают нагрузку и их исключают из работы (см. рис. 2, *г*). Ширина таких участков и, следовательно, размеры оставшегося рабочего (эффективного) сечения зависят от степени нагруженности сечения, которая по длине стержня различна. Таким образом, расчетный изгибаемый стержень будет иметь переменное по длине сечение, изменяющееся с нарастанием нагрузки. Пошаговое увеличение нагрузки продолжается до такого уровня, при котором необходимо определить прогиб конструкции.

Описанная выше работа изгибаемого элемента формализована, получен алгоритм, на основе которого разработана компьютерная программа.

² Adany S. Buckling mode classification of members with open thin-walled cross-section by using Finite Strip Method. Research Report. Johns Hopkins University, 2004. 99 p.

³ Там же.

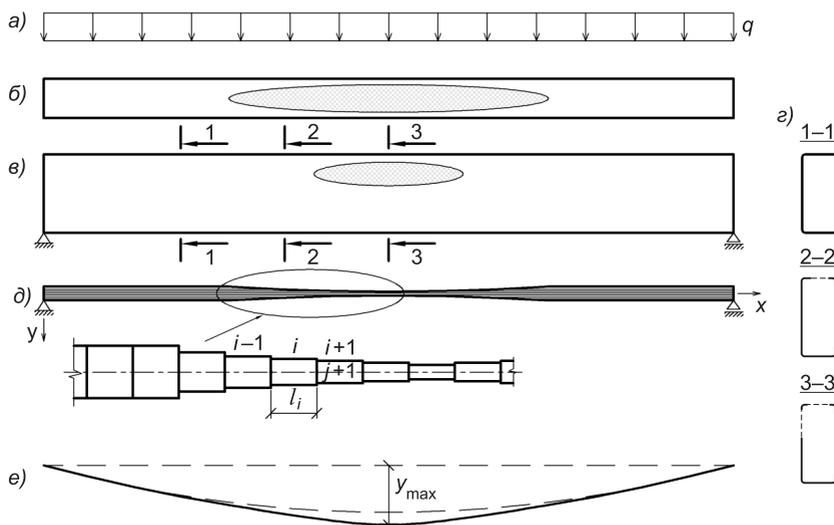


Рис. 2. Изгибаемый элемент

a — равномерно распределенная нагрузка; *б* — вид сверху; *в* — вид сбоку; *г* — расчетные сечения; *д* — расчетная схема; *е* — линия прогибов

Конструкция разбивается n узлами на m стержневых конечных элементов (см. рис. 2, *д*). При фиксированном уровне нагрузки выполняется ее статический расчет, для чего в программе предусмотрен модуль, реализующий метод конечных элементов (МКЭ). Данный модуль позволяет рассчитывать большинство расчетных схем изгибаемых элементов, встречающихся в практике строительства (одно-, двух- и многопролетные системы; шарнирно-подвижные и неподвижные опоры, заделки). Предусмотрены различные варианты нагрузок: сосредоточенные силы, распределенные по трапеции нагрузки, сосредоточенные моменты. В результате работы модуля в середине каждого КЭ определяется изгибающий момент M_i и поперечная сила Q_i , а в каждом узле — угол поворота и линейные перемещения x_j и y_j .

Для каждого КЭ изгибающий момент M_i передается в модуль определения геометрических характеристик сечения, который в зависимости от уровня напряженного состояния данного КЭ вычисляет характеристики либо полного сечения, либо эффективного сечения (редуцированные характеристики) с учетом потери местной устойчивости и потери устойчивости формы сечения в соответствии с Eurocode 3 [1].

В общем случае в статически неопределимых системах значения усилий и деформаций зависят от распределения жесткостных характеристик составляющих стержней, которые в данном случае изменяются. Поэтому снова выполняется статический расчет, но уже с новыми редуцированными геометрическими характеристиками сечений КЭ. Процесс повторяется до тех пор, пока максимальная разница между соответствующими перемещениями узлов по вертикальной оси на предыдущей и на текущей итерации не будет меньше заранее заданного значения. Максимальное значение перемещения y на последней итерации и есть искомый прогиб изгибаемого элемента при фиксированном уровне нагрузки.

Приведенный выше алгоритм повторяется на более высоких ступенях нагружения. Таким образом, может быть построен график зависимости прогиба от нагрузки в каждом узле разбиения конструкции. Кроме того, появляется возможность для определенного уровня нагрузки по-

строить деформированную ось стержня при поперечном изгибе, которая представляет собой совокупность значений y_j .

Разработанная программа была верифицирована по результатам экспериментальных исследований, проведенных в Сиднейском университете (Австралия) [4]. Эксперименты проводились на С-образных холодногну-тых оцинкованных профилях $150 \times 65 \times 16$ мм и $200 \times 75 \times 17$ мм толщиной 1,5 и 1,9 мм. Предел текучести стали от 485 до 541 МПа. Схема, по которой выполнялись испытания, показана на рис. 3, а. Проводились две серии испытаний: в первой из них в зоне наибольших изгибающих моментов были предусмотрены конструктивные мероприятия, исключающие потерю устойчивости формы сечения; во второй серии таковые отсутствовали и профиль мог терять устойчивость формы сечения.

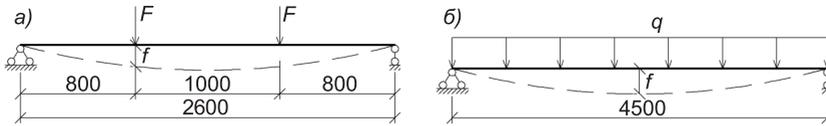


Рис. 3. Схемы

а — испытаний [4]; б — расчетная схема свободно опертой балки

На рис. 4 показаны графики прогибов в месте приложения нагрузки (см. рис. 3, а) для С150, полученные экспериментально [4] и вычисленные по программе. Из их совместного рассмотрения видно, что расчетные графики с достаточной для инженерных расчетов точностью описывают прогибы экспериментальных конструкций. Расхождение при нагрузках, составляющих 80 % от расчетных, не превышает 11 %.

Заметим, что в случае исключения потери устойчивости формы сечения первоначально линейные расчетные зависимости после потери местной устойчивости пояса и/или стенки перестают быть линейными и прогибы начинают расти быстрее, что закономерно и связано с нелинейным снижением момента инерции редуцированного сечения I_{eff} . Такой характер расчетных зависимостей соответствует нелинейному характеру экспериментальных кривых. В тех случаях, когда не исключается потеря устойчивости формы сечения, редуцирование сечения, связанное с этим

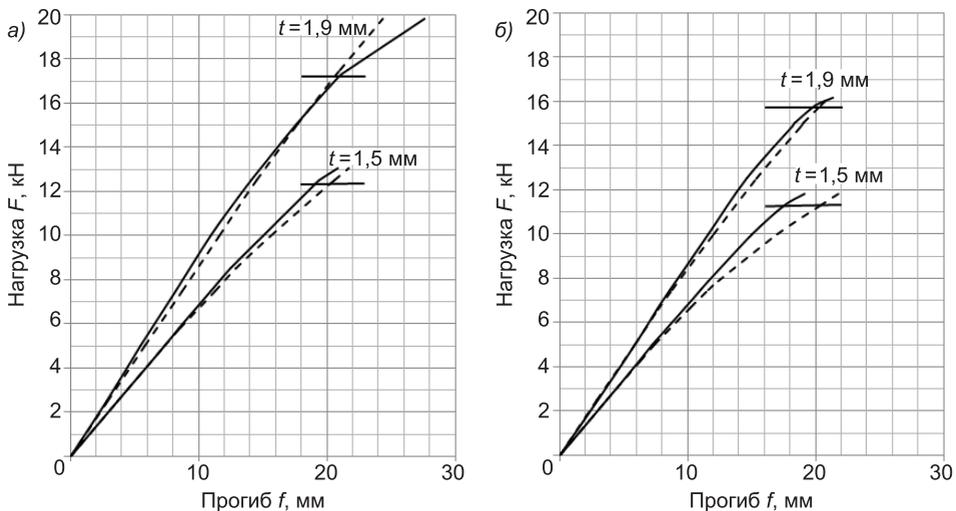


Рис. 4. Зависимости «нагрузка — прогиб» для С150×65×16

а — без учета потери устойчивости формы сечения; б — с учетом потери устойчивости формы сечения; — эксперимент; - - - программа

явлением [1], начинается значительно раньше и, следовательно, появляется нелинейность в расчетных графиках, которая в дальнейшем увеличивается за счет дополнительной редукции в результате потери местной устойчивости пояса и/или стенки.

На экспериментальных зависимостях можно заметить резкое нарастание прогибов после достижения в наиболее нагруженных сечениях напряжений, соответствующих пределу текучести. Уровень расчетных нагрузок, который соответствует этому состоянию, показан на рис. 4 горизонтальными отрезками. Обычно такие нагрузки принимают за расчетные по несущей способности элемента [1]. Теоретические графики прогибов не учитывают этого явления. Расчет по второй группе предельных состояний, к которому относится проверка прогибов изгибаемых элементов, выполняется на нормативные значения нагрузок, которые заметно меньше расчетных и в большинстве случаев конструкция работает в пределах упругих деформаций.

В Eurocode 3 [1] допускается определение прогибов изгибаемых элементов, принимая в расчет постоянный по длине пролета фиктивный момент инерции сечения:

$$I_{fic} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{\sigma} (I_{gr} - I_{(\sigma)eff}), \quad (1)$$

где I_{gr} — момент инерции полного сечения;

σ_{gr} — максимальное сжимающее напряжение при изгибе, вычисляемое от нормативных нагрузок для полного поперечного сечения (в формуле положительное);

$I_{(\sigma)eff}$ — момент инерции с учетом местной потери устойчивости, вычисляемый при максимальных напряжениях $\sigma \geq \sigma_{gr}$ (σ — абсолютное значение максимального напряжения в пределах рассматриваемой длины).

Ниже приводятся результаты сравнения прогибов, определенных с применением формулы (1) и вычисленных по разработанной программе.

Рассмотрена однопролетная свободно опертая балка из профиля С-образного сечения, загруженная равномерно распределенной нагрузкой (см. рис. 3, б). По длине балка разбивалась на 45 конечных элементов по 10 см каждый. Варьировались следующие параметры профиля: высота сечения h (150, 200 и 300 мм); толщина листа исходной заготовки t (0,8; 1; 1,2; 1,5 и 2 мм). Ширина пояса $b = 65$ мм. Для высоты $h = 200$ мм дополнительно выполнены расчеты для $b = 50$ мм. Величина отгиба во всех случаях $c = 22$ мм. Нагрузка прикладывалась ступенями до уровня, который соответствует максимальным напряжениям в наиболее нагруженном среднем сечении, равным 450 МПа. Выбор такого уровня напряжений обусловлен мировой тенденцией к изготовлению стальных холодногнутых профилей из все более прочной стали [4].

В зависимости от геометрических параметров настила, опирающегося на верхний пояс балочного элемента, и способа его крепления [3] потеря устойчивости формы сечения тонкостенного профиля может быть либо реализована, либо затруднена, либо исключена. Поэтому все расчеты выполнялись в двух вариантах: в предположении, что потеря устойчивости формы сечения исключена (учитывалась только потеря местной устойчивости компонентов сечения) и с учетом таковой (учитывалась потеря местной устойчивости и потеря устойчивости формы сечения). Кроме того, расчетом определялись нагрузки, при которых происходила потеря местной устойчивости пояса, стенки и отгиба.

На рис. 5 показаны зависимости прогиба от нагрузки, полученные по формуле (1) и по разработанной программе для С-образного профиля 200×65×22 мм. Относительно тонкостенные (из рассматриваемых) профили

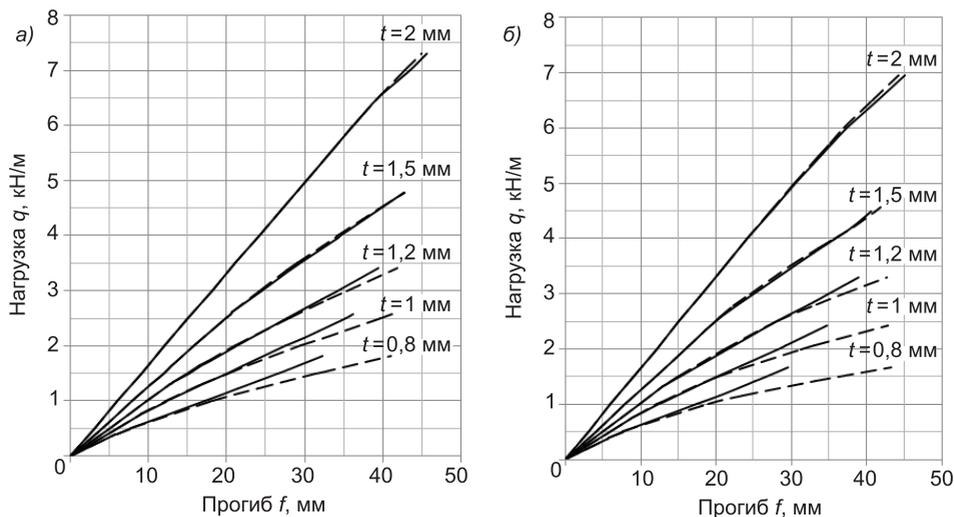


Рис. 5. Расчетные зависимости «нагрузка–прогиб» для С200×65×22

а — без учета потери устойчивости формы сечения; б — с учетом потери устойчивости формы сечения; — по формуле (1); - - - по программе

довольно рано теряют местную устойчивость компонентов сечения. Так, при $t = 0,8$ мм пояс и стенка практически одновременно теряют устойчивость при нагрузке $q_f = q_w = 0,4$ кН/м; затем следует потеря устойчивости отгиба при $q_l = 0,51$ кН/м. Это составляет 32 и 41 % от расчетной нагрузки для профиля из стали с пределом текучести 250 МПа и 26 и 33 % для стали с $\sigma_y = 350$ МПа. После чего нарастание прогибов, вычисляемых по программе, происходит заметно интенсивнее, чем по (1). Для нагрузки, соответствующей равенству максимальных напряжений в среднем сечении σ_{\max} пределу текучести 250 МПа, расхождение составляет 11 %; при $\sigma_{\max} = \sigma_y = 350$ МПа расхождение 19 %; при $\sigma_{\max} = \sigma_y = 450$ МПа — 27 %. Если в расчетах учитывается потеря устойчивости формы сечения, то в связи с тем, что редуцированный момент инерции сечения относительно его горизонтальной оси I_{eff} дополнительно уменьшается из-за редукции толщины ребра жесткости [1], расхождение увеличивается (табл. 1).

Таблица 1

Значения прогибов по формуле (1) и по программе для С200×65×22

Толщина t , мм	Максимальные напряжения сжатия в наиболее нагруженном сечении σ_{\max} , МПа	Без учета потери устойчивости формы сечения			С учетом потери устойчивости формы сечения		
		значение прогиба по формуле (1), мм	значение прогиба по программе, мм	расхождение, %	значение прогиба по формуле (1), мм	значение прогиба по программе, мм	расхождение, %
0,8	250	21,8	24,3	11	22,3	26,5	19
	350	26,8	32,0	19	27,2	33,2	22
	450	32,3	41,0	27	33,6	43,2	29
1,0	250	22,1	22,7	3	23,5	25,1	7
	350	29,9	32,4	8	30,1	33,2	10
	450	36,2	41,2	14	34,7	42,7	22
1,2	250	23,6	23,6	0	24,1	24,1	0
	350	32,1	32,9	2	32,3	33,3	3
	450	39,4	41,8	6	39,9	42,6	7
1,5	Для 250, 350, 450 МПа практическое совпадение значений прогибов						
2,0							

При увеличении толщины профиля относительный уровень нагрузок, соответствующих потере местной устойчивости, возрастает, а расхождение между результатами расчета прогибов разными способами уменьшается.

При $t = 1$ мм $q_f = q_w = 0,76$ кН/м — 46 %, $q_l = 0,99$ кН/м — 60 % для $\sigma_y = 250$ МПа; 35 и 46 % для $\sigma_y = 350$ МПа.

При $t = 1,2$ мм $q_f = q_w = 1,32$ кН/м — 60 %, $q_l = 78$ — 60 % для $\sigma_y = 250$ МПа; 46 и 60 % для $\sigma_y = 350$ МПа.

При увеличении толщины до 1,5 мм напряжения потери местной устойчивости пояса и стенки еще более высокие: 19,9 и 20,1 МПа соответственно. Хотя они не превосходят предполагаемых расчетных значений, при которых происходит исчерпание несущей способности сечения ($\sigma_y = 250, 350, 450$ МПа), тем не менее довольно высоки, и прогибы, вычисленные разными способами, практически совпадают.

В профиле толщиной 2 мм потеря устойчивости пояса и стенки происходит при уровне напряжений 360 МПа, что больше $\sigma_y = 250$ и 350 МПа. Потеря устойчивости отгиба не происходит вплоть до $\sigma_{\max} = 450$ МПа. Соответственно и прогибы по (1) и по программе в практической области напряжений одинаковы.

При уменьшении ширины пояса до 50 мм уровень нагрузок, соответствующих моменту потери местной устойчивости пояса, повышается на 35–40 %. Повышение устойчивости пояса повлекло за собой и повышение устойчивости отгиба на 14 % для $t = 0,8$ –1,5 мм. При толщине 2 мм отгиб, как и пояс, не теряют устойчивость. А вот стенка, наоборот, теряет устойчивость немного раньше — на 14–16 %. Прогибы увеличиваются, но неравномерно. При невысоких нагрузках, когда профили полностью устойчивы, снижение для всех толщин составляет 15 %. При повышении нагрузок и потере местной устойчивости компонентов профиля разница постепенно уменьшается до 6 % при $t = 0,8$ мм и нагрузках, вызывающих $\sigma_{\max} = 450$ МПа.

С уменьшением высоты профиля до 150 мм (при ширине пояса 65 мм) разница между прогибами по (1) и программе уменьшается. Например, при $t = 1$ мм и $\sigma_{\max} = 250$ МПа расхождение отсутствует, при $\sigma_{\max} = 350$ МПа оно составляет 4,6 % (7 %), при $\sigma_{\max} = 450$ МПа — 8,6 % (14,2 %). Начиная с $t = 1,2$ мм и более графики прогибов практически совпадают при всех значениях нагрузок до уровня, вызывающего максимальные нормальные напряжения $\sigma_{\max} = 350$ МПа; лишь при $\sigma_{\max} = 450$ МПа прогибы, вычисленные программно, превышают прогибы по (1) на 3 % (4,6 %). В скобках указаны значения с учетом потери устойчивости формы сечения.

Напротив, при увеличении высоты профиля до 300 мм (рис. 6) наблюдается увеличение расхождения в значениях прогибов по разным методикам, что наглядно показано в табл. 2.

Из приведенных данных видно, что в некоторых случаях прогибы, определяемые по формуле (1) и по разработанной программе, практически совпадают, а в других — различаются весьма значительно. Это зависит от сочетания геометрических параметров сечения в профиле (толщина, высота, ширина пояса) и уровня напряжений.

С целью обобщения полученных результатов и определения областей параметров с одинаковыми/различными значениями прогибов по сравнимым методикам построены графики зависимости расхождений прогибов от условных гибкостей пояса $\bar{\lambda}_f$ и стенки $\bar{\lambda}_w$ для разных сталей (рис. 7). По этим зависимостям можно количественно обосновать приме-

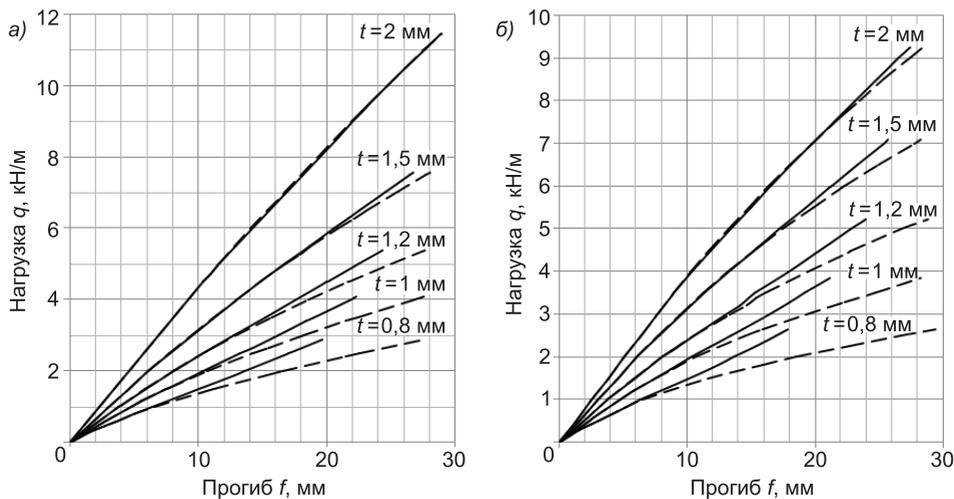


Рис. 6. Расчетные зависимости «нагрузка-прогиб» для С300×65×22

а — без учета потери устойчивости формы сечения; б — с учетом потери устойчивости формы сечения; — по формуле (1); - - - по программе

Таблица 2

Значения прогибов по формуле (1) и по программе для С300×65×22

Толщина t , мм	Максимальные напряжения сжатия в наиболее нагруженном сечении σ_{\max} , МПа	Без учета потери устойчивости формы сечения			С учетом потери устойчивости формы сечения		
		значение прогиба по формуле (1), мм	значение прогиба по программе, мм	расхождение, %	значение прогиба по формуле (1), мм	значение прогиба по программе, мм	расхождение, %
0,8	250	12,8	15,3	19	12,9	16,4	27
	350	16,5	21,4	30	16,8	23,4	38
	450	19,7	27,6	40	17,9	29,4	63
1,0	250	14,2	15,5	9	14,3	15,9	11
	350	18,5	21,5	16	18,1	22,4	24
	450	22,3	27,6	24	21,2	29,0	37
1,2	250	15,2	15,7	3	14,8	15,4	4
	350	20	21,7	9	20,1	22,6	12
	450	24,4	27,6	13	24	28,8	20
1,5	250	16,1	16,1	0	15,9	16	0
	350	21,7	22,1	2	21,1	22,1	5
	450	26,7	28,1	5	25,7	28,3	10
2,0	Для 250, 350, 450 МПа практическое совпадение значений прогибов						

нение той или иной методики расчета прогибов. Так, например, для С200 × 65 × 22 при требуемой точности расчетов прогибов 3–5 % обе методики дают одинаковые результаты при $\bar{\lambda}_f \leq 2,1$ и $\bar{\lambda}_w \leq 7$. При больших параметрах происходит резкое увеличение расхождения и прогибы рекомендуется рассчитывать по разработанной программе. При уменьшении ширины пояса до 50 мм граничные значения условной гибкости пояса снижаются ($\bar{\lambda}_f = 1,75$), а соответствующее значение условной гибкости стенки зависит от учета/неучета в расчете потери устойчивости формы сечения. В первом случае $\bar{\lambda}_w = 8,3$; во втором — $\bar{\lambda}_w = 7,4$ –8,2.

При снижении высоты профиля до 150 мм пороговые значения условной гибкости стенки снижаются ($\bar{\lambda}_w = 5,5$ –6,0) при $\bar{\lambda}_f = 2,2$ –2,5. При увеличении высоты профиля до 300 мм, напротив, происходит повыше-

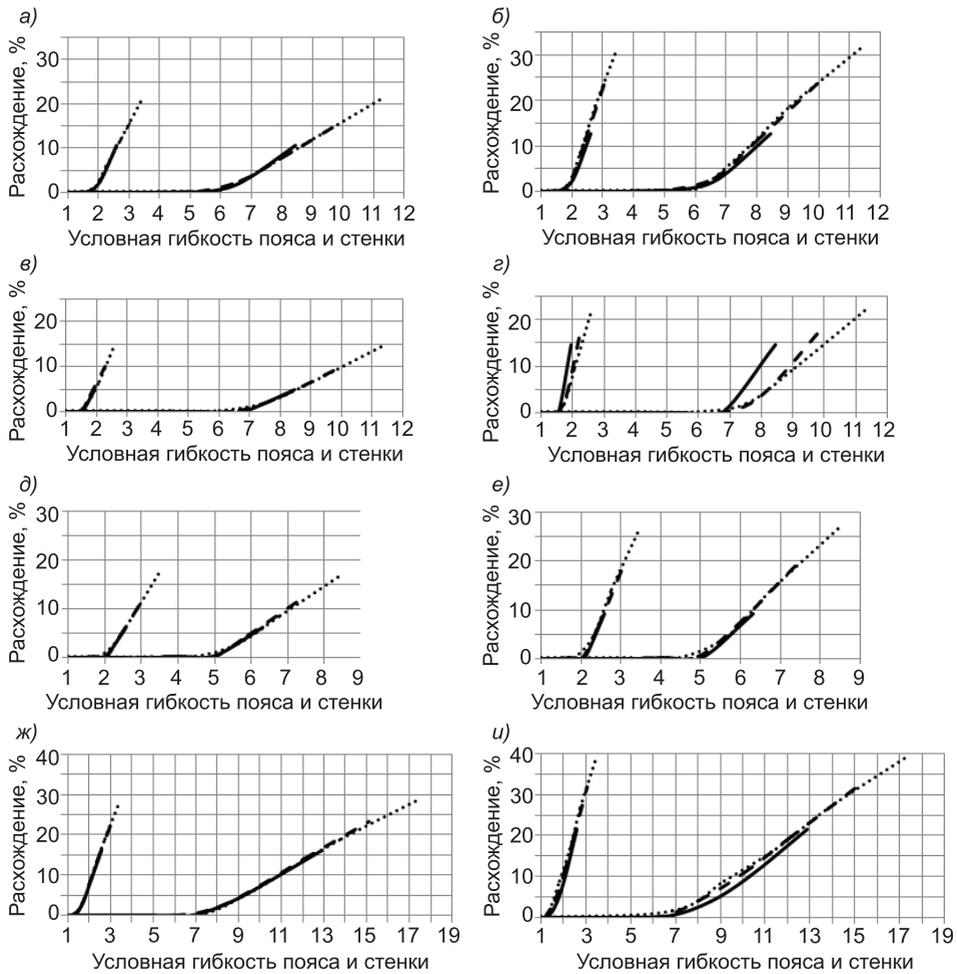


Рис. 7. Расхождение между прогибами по сравниваемым методикам в зависимости от условной гибкости пояса и стенки

а — С200×65×22; в — С200×50×22; д — С150×65×22; ж — С300×65×22 без учета потери устойчивости формы сечения; б — С200×65×22; г — С200×50×22; е — С150×65×22; и — С300×65×22 с учетом потери устойчивости формы сечения; — $\sigma_y = 250$ МПа, - - - $\sigma_y = 350$ МПа, $\sigma_y = 450$ МПа

ние соответствующего значения условной гибкости стенки до 8,5–9,0 при снижении $\bar{\lambda}_f$ до значений 1,6–1,8.

Таким образом, разработан алгоритм определения прогибов изгибаемых элементов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей, отличающийся тем, что учитывает изменение редуцированных характеристик эффективного сечения по длине конструкции, вызванное местной потерей устойчивости и потерей устойчивости формы сечения. Основанная на нем компьютерная программа с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает прогибы изгибаемых элементов. Получены значения основных параметров, характеризующих тонкостенность С-образного профиля, в пределах которых в зависимости от прочности стали предлагаемая методика и методика ЕСЗ, основанная на применении постоянного по длине элемента сечения с уменьшенным фиктивным моментом инерции I_{fic} , дают сходные результаты. Показано, что при превышении данных параметров расхождение результатов, полученных по двум методикам, увеличивается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. EN 1993-1-3:2004 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting [Text] / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2004. — 125 p.
2. Айрумян, Э.Л. Исследования действительной работы тонкостенных холодногну-тых прогонов из оцинкованной стали [Текст] / Э.Л. Айрумян, В.Г. Галстян // Про-мышленное и гражданское строительство. — 2002. — № 6. — С. 31–34.
3. Yu, C. Local buckling tests on cold-formed steel beams [Text] / C. Yu, B.W. Schafer // 16th International Specialty Conference Cold-Formed Steel Structures. — Orlando, FL, 2002. — P. 23–51.
4. Hung, C. Experimental Investigation of High Strength Cold-Formed C-Section in Combined Bending and Shear [Text] / C. Hung, G.J. Hancock. — University of Sydney, 2009. — 42 p.

КИКОТЬ А.А., канд. техн. наук, доц.; E-mail: deltaing@mail.ru

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

МУРЗИН Е.В., инж.; E-mail: jekamur@mail.ru

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

Получено после доработки 11.01.11

Kikot A.A., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: deltaing@mail.ru, Altai Polzunov State Technical University, Barnaul, Russia

Murzin E.V., engineer; E-mail: jekamur@mail.ru, Altai Polzunov State Technical University, Barnaul, Russia

CALCULATION OF DEFLECTION OF COLD-FORMED STEEL BENDING MEMBERS

Algorithm and computing program for calculation of deflection for cold-formed bending members developed. Change of effective cross-section along member caused by local buckling and distortional buckling taken into account. Some results of numerical research describing influence of geometrical parameters of C-section on deflection have been resulted. Range of preferable application of program indicated.

Key words: cold-formed steel profiles, bending, calculation of deflection.

REFERENCES

1. EN 1993-1-3:2004 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting [Text] / European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2004. — 125 p.
2. Airumyan, E.L. Investigations of actual behavior of light-gauge cold-formed galvanized steel purlins [Text] / E.L. Airumyan, V.G. Galstyan // Industrial and civil construction. — 2002. — N 6. — P. 31–34.
3. Yu, C. Local buckling tests on cold-formed steel beams [Text] / C. Yu, B.W. Schafer // 16th International Specialty Conference Cold-Formed Steel Structures. — Orlando, FL, 2002. — P. 23–51.
4. Hung, C. Experimental Investigation of High Strength Cold-Formed C-Section in Combined Bending and Shear [Text] / C. Hung, G.J. Hancock. // University of Sydney, 2009. — 42 p.

УДК 624.011.1

Г.А. СТОЛПОВСКИЙ, В.И. ЖАДАНОВ, В.С. ГАРИПОВ

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА
ПРИ ПОИСКЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВИНТОВОГО СТЕРЖНЯ, ВЛИЯЮЩИХ НА УСИЛИЕ
ЕГО ВЫДЕРГИВАНИЯ ИЗ МАССИВА ДРЕВЕСИНЫ**

Приведены результаты исследования оптимальных параметров винтового стержня крестообразного поперечного сечения, работающего на выдергивание, полученные с использованием методов планирования эксперимента. Исследовано влияние глубины забивки, диаметра и шага навивки стального стержня на его несущую способность.

К л ю ч е в ы е с л о в а : древесина, винтовой стержень, работа на выдергивание, планирование эксперимента.

Результаты «пилотных» опытов со стальными винтовыми стержнями крестообразного поперечного сечения, работающими на выдергивание в соединениях деревянных элементов [1], показали авторам целесообразность проведения дальнейших экспериментальных исследований в этом направлении. Неоспоримым является тот факт, что на несущую способность и эксплуатационную надежность узлов, выполненных с помощью винтовых стержней, влияет множество факторов, таких как глубина забивки, диаметр, шаг навивки, толщина ребра, угол заточки острия, шероховатость поверхности, марка стали, использованной для изготовления стержня, и способ ее обработки, а также инструмент, использованный для внедрения стержня в массив древесины. В связи с этим для комплексной оценки влияния вышечисленных факторов на надежность как отдельных конструкций, так и возводимого сооружения в целом требуется проведение многочисленных экспериментов, которые должны не только подтвердить или отвергнуть выдвинутые авторами гипотезы и предположения, но и получить адекватные формулы для расчета предложенного способа соединения деревянных элементов.

Для изучения фактического напряженно-деформированного состояния узлов деревянных конструкций, в которых соединительный элемент работает на выдергивание, уменьшения объема проводимых опытов без снижения объективности полученных результатов использован метод моделирования сложных систем [2].

Задача построения математической модели сопряжения деревянных элементов на винтовых стержнях с помощью методов планирования эксперимента требует количественной формулировки цели исследования. Такой количественной характеристикой является параметр оптимизации, представляющий реакцию от воздействия изучаемых факторов на исследуемый процесс. В качестве таких параметров могут быть: усилие выдергивания стержня из массива древесины; усилие, необходимое для забивки стержня; деформация стержня и соединяемых деталей при забивке; материалоемкость или трудоемкость изготовления соединения и др. При

анализе требований, предъявляемых к параметру оптимизации, наиболее оптимально — усилие выдергивания стержня из древесины $F_{\text{выд}}$.

На начальной стадии экспериментальной работы, когда из большого числа факторов нужно было выделить наиболее важные для дальнейшего изучения и отсеять остальные, использован метод априорного ранжирования факторов. На основании комплексного анализа узлов деревянных конструкций с соединительными элементами, работающими на выдергивание или вдавливание (научно-техническая и нормативная литература, мнение ведущих специалистов в области деревянных конструкций), отобраны 10 факторов, которые определяют качество и прочность соединения: $X_1 (h_3)$ — глубина забивки стержня, мм; $X_2 (d_{\text{ст}})$ — диаметр стержня, мм; $X_3 (S_{\text{нав}})$ — шаг навивки стержня, мм; $X_4 (\delta_{\text{реб}})$ — толщина ребра стержня, мм; $X_5 (\gamma_{\text{зат}})$ — угол заточки острия стержня, град.; $X_6 (R_a)$ — шероховатость поверхности стержня, мкм; $X_7 (\text{Ст})$ — материал стержня; $X_8 (\text{Др})$ — порода древесины пробиваемых деталей; $X_9 (\text{Сз})$ — способ забивки стержня; $X_{10} (\text{То})$ — термообработка металла стержня.

Особенность метода априорного ранжирования факторов заключается в том, что факторы, которые согласно априорной информации могут иметь существенное влияние, ранжируются в порядке убывания вносимого ими вклада. На базе проведенного комплексного анализа аналогичных соединений и мнений специалистов разработана матрица рангов (табл. 1), включающая 10 факторов, которые ранжировались каждым экспертом в соответствии с их влиянием на параметр оптимизации. В ранжировании отобранных факторов приняли участие 7 экспертов-специалистов в области деревянных конструкций из различных научных и учебных учреждений (ЦНИИСК им. Кучеренко — 1, СамГАСА, г. Самара — 2, СФУ, г. Красноярск — 2, ИрГТУ, г. Иркутск — 1, ОГАСА, г. Одесса — 1).

Важным моментом составления ранжированного перечня является оценка согласованности и достоверности полученной информации. Существующие способы определения достоверности обзорных данных основаны на предположении, что в случае согласованности сведений из нескольких источников достоверность оценок гарантируется. Наиболее

Таблица 1

Матрица рангов значимости рассматриваемых факторов на изучаемый процесс

Экспертные данные ($m = 7$)	Факторы $R = 10$									
	h_3 , мм	$d_{\text{ст}}$, мм	$S_{\text{нав}}$, мм	$\delta_{\text{реб}}$, мм	$\gamma_{\text{зат}}$, град.	R_a , мкм	Ст	Др	Сз	То
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
1	3	2	1	4	5	7	6	9	8	10
2	2	3	1	6	4	5	8	7	9	10
3	3	2	1	6	4	5	8	7	9	10
4	1	2	3	4	7	6	5	8	9	10
5	1	2	4	5	6	3	8	7	10	9
6	2	1	3	6	5	4	8	7	9	10
7	2	3	1	4	6	5	8	7	9	10
$\sum_{j=1}^m a_{ij}$	14	15	14	35	37	35	51	52	63	69
Δ_i	-25,5	-24,5	-25,5	-4,5	-2,5	-4,5	11,5	12,5	23,5	29,5
$(\Delta_i)^2$	650,25	600,25	650,25	20,25	6,25	20,25	132,25	156,25	552,25	870,25

часто для этих целей используют коэффициент конкордации (согласия), величина которого позволяет судить о степени согласованности различных мнений и, как следствие, достоверности их оценок.

Величина коэффициента конкордации может изменяться в пределах от 0 до 1. При $W = 0$ согласованности нет, т.е. связь между оценками из различных источников отсутствует. При $W = 1$ — согласованность полученной информации полная. Для принятия решения об использовании полученных оценок необходимо, чтобы коэффициент конкордации был больше заданного (нормативного) значения W_n ($W > W_n$). Можно принять $W_n = 0,5$. Считается, что при $W > 0,5$ информация из различных источников в большей степени согласована, чем не согласована. Математическая обработка результатов ранжирования проводилась по формулам [2]. Средняя сумма рангов:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k}, \quad (1)$$

где m — число источников;

a_{ij} — ранг i -го фактора в j -м ряду;

k — количество факторов.

Разность между суммой рангов i -го фактора и средней суммой рангов:

$$\Delta_i = \sum_{i=1}^m a_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k} = \sum_{i=1}^m a_{ij} - T. \quad (2)$$

Сумма квадратов разностей:

$$S = \sum_{i=1}^k (\Delta_i)^2. \quad (3)$$

Коэффициент конкордации:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k) - m \sum_{j=1}^m T_j}, \quad (4)$$

где $T_j = \Sigma(t_j^3 - t_j) = 0$;

t_j — число одинаковых рангов в j -м ранжировании.

С учетом полученной информации $T = 39,5$; $S = 3658,5$; $W = 0,905$.

Величина коэффициента конкордации существенно отличается от нуля, больше нормативного и меньше единицы, что свидетельствует о неодинаковом ранжировании факторов. Учитывая субъективность предварительной оценки, значимость коэффициента конкордации оценивалась по критерию соответствия (Пирсона) χ^2 . Расчетное значение χ^2 определялось по формуле

$$\chi^2 = \frac{12S}{mk(k+1) - \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^m T_j}. \quad (5)$$

Тогда $\chi^2 = 57$. При заданном числе степеней свободы $f = k - 1$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение $\chi^2_{\alpha, f}$ должно быть меньше расчетного. Табличные значения: $f = 9$; $\alpha = 0,05$; $\chi^2_{\alpha, f} = 18,3$. $\chi^2_{\alpha, f} = 18,3 < \chi^2 = 57$, т.е. можно с 95 %-й доверительной вероятностью

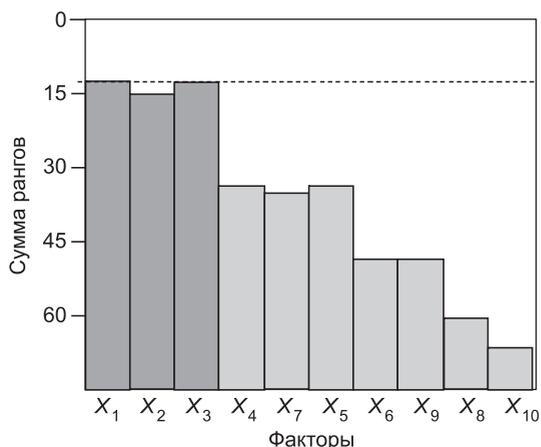


Рис. 1. Диаграмма рангов

утверждать, что степень влияния факторов на параметр оптимизации согласуется с коэффициентом конкордации $W = 0,905$. По полученным результатам на рис. 1 приведена диаграмма рангов. Из приведенной диаграммы следует, что распределение факторов соответствует экспоненциальному убыванию. Поэтому незначимые факторы можно исключить. Значимыми факторами, оказывающими наибольшее влияние на прочность соединения, являются X_1, X_2, X_3 . Выбранные факторы

в полной мере удовлетворяют основным требованиям, таким как управляемость, однозначность, совместимость и отсутствие линейной корреляции.

Остальные факторы, такие как $\delta_{\text{реб}}, R_a, \text{Ст}, T_o$, главным образом влияют на прочность самого стержня, а не соединения в целом. Угол заточки острия и шероховатость поверхности стержня влияют на плотность гнезда и варьировать этими факторами нежелательно. Влияние породы древесины на несущую способность соединений достаточно хорошо изучено и отражено в нормативных документах.

Следующий этап подготовки к проведению эксперимента — это выбор модели. Главное требование к модели — это способность предсказывать направление дальнейших опытов. Исходя из этого выбираем полином первой степени. Данная модель содержит информацию о направлении градиента, с другой стороны, в нем минимально возможное число коэффициентов при данном числе факторов.

При использовании моделирования для сложных систем при числе факторов, равном трем, выбираем полный факторный эксперимент типа 2^k , в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов. Так как нет полной гарантии, что в выбранном интервале варьирования факторов процесс описывается линейной моделью, то необходимо количественно оценить эффекты взаимодействия. Для этого к матрице планирования добавляем еще четыре столбца. Построенная матрица планирования приведена в табл. 2. Статистическая обработка результатов испытаний проводилась по формулам [2].

Уравнение регрессии имеет вид

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (6)$$

Для обеспечения фиксированной величины глубины забивки витые стержни с разными геометрическими параметрами задавливались в древесину с одинаковой скоростью (20 мм/мин) при помощи гидравлического пресса. Затем универсальной разрывной машиной ИР 5047-50-10 с применением соответствующих приспособлений витые стержни выдергивались из брусков со скоростью 0,4 мм/мин, при этом фиксировалась максимальная нагрузка выдергивания с точностью $\pm 1\text{Н}$. Испытания проведены с соблюдением требований [3]. Для исключения влияния система-

Матрица планирования полного факторного эксперимента

Факторы	Среднее арифметическое значение			Эффекты двойного взаимодействия	Эффект тройного взаимодействия	Усилие выдергивания стержня из образца	Дисперсия опытов	Усилие задавливания стержня в брус	Усилие выдергивания, рассчитанное по модели					
	Глубина забивки стержня	Диаметр стержня	Шаг навивки стержня											
Обозначение	h_3 , мм	$d_{ст}$, мм	$S_{нав}$, мм											
Основной уровень (0)	125	16	$20d$											
Предел варьирования	10	2	$5d$											
Верхний уровень (+)	135	18	$25d$											
Нижний уровень (-)	115	14	$15d$											
Опыт	Код				X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	$F_{выр}, H$			$S^2 \times 10^5$	F_3, H	$F_{выр}, H$ $\bar{Y}_{мод}$
	X_0	X_1	X_2	X_3					Y_1	Y_2	\bar{Y}			
1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	7660	7117	7389	1,47	4000	7477
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	7105	6150	6628	4,56	3000	6829
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	7160	6456	6808	2,48	5500	6458
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	10470	9475	9973	4,95	7000	9737
5	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	6744	6233	6489	1,3	2750	6402
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	8540	7674	8107	3,75	3000	7905
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	6888	7480	7184	1,75	6500	7533
8	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	7950	8900	8425	4,51	7500	8661
9	0	0	0	0	0	0	0	0	11142	9520	10331	13,15	7500	—

тических ошибок, вызванных внешними условиями, значения Y_1 и Y_2 , приведенные в табл. 2, определяли по результатам пяти дублирующих опытов как среднеарифметическое значение.

После проведения эксперимента рассчитывали коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N X_0 Y_U}{N}; \quad (7)$$

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N X_{iU} Y_U}{N}; \quad (8)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{U=1}^N X_{iU} X_{jU} Y_U}{N}; \quad (9)$$

$$b_{ijz} = \frac{\sum_{U=1}^N X_{iU} X_{jU} X_{zU} Y_U}{N}, \quad (10)$$

где X_{iU} — значение i -го фактора в U -м опыте;
 X_{jU} — значение j -го фактора в U -м опыте;

X_{zU} — значение z -го фактора в U -м опыте;

$N = 8$ — число опытов.

После расчета коэффициентов получили уравнение регрессии:

$$Y = 7625,4 + 657,9h_3 + 472,1d_{\text{ст}} + 537,9S_{\text{нав}} + 444h_3d_{\text{ст}} + \\ + 218,9h_3S_{\text{нав}} - 56,9d_{\text{ст}}S_{\text{нав}} + 74,1h_3d_{\text{ст}}S_{\text{нав}}.$$

Проверяли гипотезу об однородности дисперсий с помощью G -критерия. Для этого рассчитывали построчно дисперсии S_i^2 , выбирали среди S_i^2 наибольшее значение и определяли критерий Кохрена:

$$G^3 = S_{i_{\text{max}}}^2 / \Sigma S_i^2, \quad G^3 = 4,95 / 24,77 = 0,2. \quad (11)$$

Табличное значение G -критерия при $\alpha = 0,05$ будет $G_{N=8}^{\tau} = 0,679$. Так как $G^3 = 0,2 < G_{N=8}^{\tau} = 0,679$, то с доверительной вероятностью 95 % можно утверждать, что дисперсии однородны.

Определяли дисперсию воспроизводимости:

$$S_y^2 = \Sigma S_i^2 / N(n-1)n, \quad S_y^2 = 2477000 / 16 = 154812,5. \quad (12)$$

Находили дисперсию коэффициентов регрессии и среднеквадратичную ошибку:

$$S_{bi}^2 = S_y^2 / N, \quad S_{bi}^2 = 154812,5 / 8 = 19351,6. \quad (13)$$

$$S_{bi} = (S_{bi}^2)^{1/2}, \quad S_{bi} = 293,15. \quad (14)$$

Тогда доверительный интервал для коэффициентов регрессии при $\alpha = 0,05$:

$$\Delta b_i = \pm t^{\text{таб}} \times S_{bi}, \quad \Delta b_i = \pm 2,119 \times 293,15 = \pm 620,8, \quad (15)$$

где $t^{\text{таб}}$ — табличное значение при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = N(n-1)n = 16$.

Уравнение регрессии, состоящее только из значимых коэффициентов, имеет вид

$$Y = 7625,4 + 657,9h_3 + 472,1d_{\text{ст}} + 537,9S_{\text{нав}} + 444h_3d_{\text{ст}}.$$

Для проверки адекватности этого уравнения рассчитывали дисперсию адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = n \times \Sigma (\Delta y)^2 / f_{\text{ад}}, \quad S_{\text{ад}}^2 = 2 \times 452211 / 4 = 226105,5, \quad (16)$$

где $f_{\text{ад}} = N - L = 8 - 4 = 4$;

L — число значимых коэффициентов.

Тогда F -критерий:

$$F^3 = S_{\text{ад}}^2 / S_y^2, \quad F^3 = 226105,5 / 154812,5 = 1,46. \quad (17)$$

Табличное значение F -критерия при $f_1 = f_{\text{ад}} = 4$, $f_2 = f_y = 16$ будет $F^{\tau} = 3,01$.

Так как $F^3 = 1,46 < F^{\tau} = 3,01$, то с доверительной вероятностью 95 % можно утверждать, что модель адекватно описывает эффект воздействия трех факторов на параметр оптимизации, причем наиболее сильное влияние оказывает глубина забивки стержня в деревянный брус (рис. 2).

Адекватную модель использовали для быстрого приближения к такому сочетанию факторов, которое обеспечивает максимальное усилие выдергивания стержня из деревянного бруса. Для этого изготовили стержень с геометрическими размерами согласно модели и поставили ряд опытов око-

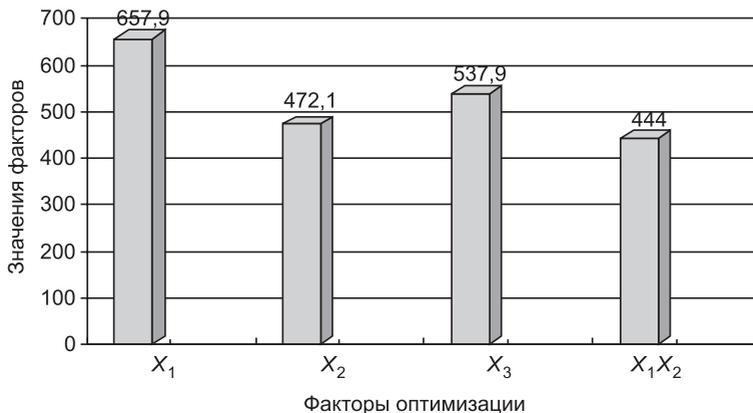


Рис. 2. Влияние факторов на параметр оптимизации

ло наилучшего значения Y с варьированием глубины забивки стержня X_1 и шага навивки X_3 , которые позволили установить следующее:

- с увеличением глубины забивки до $20d$ наблюдается прямо пропорциональное увеличение несущей способности стержня, при увеличении глубины забивки более $20d$ рост несущей способности замедляется, что хорошо согласуется с данными, полученными для вклеенных поперек волокон стальных стержней, работающих на выдергивание [4];

- при постоянных значениях X_1 , X_2 и со значением $X_3 = 30d$ полученное усилие выдергивания оказалось ниже, чем Y_{\min} из матрицы планирования, при этом лучший результат получился при $X_3 = 20d$.

Увеличение диаметра стержня больше 22 мм нежелательно, т.к. в этом случае наблюдается раскалывание древесины в зоне забивки, особенно при толщине пробиваемого элемента менее 70 мм.

По результатам проведенных экспериментов было выявлено, что при оптимальных значениях параметров стержня (табл. 3) максимальное усилие выдергивания Y составит 45000Н. Данные параметры могут применяться в дальнейшем для соединения деревянных элементов винтовыми стальными стержнями в случаях, когда необходимо обеспечить максимальную несущую способность соединения. В каждом конкретном случае для получения расчетной несущей способности соединения можно уменьшать глубину забивки и диаметр стержня, при этом шаг навивки рекомендуется принимать постоянным и равным $20d$.

Выводы. 1. Применение методов планирования эксперимента при исследовании соединений деревянных конструкций с многочисленными варьируемыми параметрами позволяет уменьшить объем проводимых опытов без снижения объективности полученных результатов.

2. Использование метода априорного ранжирования позволяет отобрать наиболее значимые факторы, которые определяют качество и прочность исследуемых соединений.

Таблица 3

Оптимальные параметры стержня и глубины забивки, соответствующие максимальной несущей способности на выдергивание

Наименование фактора оптимизации	Код	Обозначение	Оптимальная область значений
Глубина забивки стержня	X_1	h_3 , мм	440 ($20d_{ст}$)
Диаметр стержня	X_2	$d_{ст}$, мм	22
Шаг навивки стержня	X_3	$S_{нав}$	$20d$

3. Для практических расчетов соединений деревянных элементов со стальными винтовыми стержнями крестообразного поперечного сечения, работающими на выдергивание, целесообразно разработать инженерную методику расчета, позволяющую учитывать в исходной формуле различные факторы путем введения поправочных коэффициентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дмитриев, П.А. Соединения элементов деревянных конструкций на стальных винтовых крестообразных стержнях, работающих на выдергивание [Текст] / П.А. Дмитриев, В.И. Жаданов, Г.А. Столповский // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 4. — С. 133–137.
2. Рыбин, Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов [Текст] / Ю.И. Рыбин. — СПб. : Наука, 2004. — 644 с.
3. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций [Текст] / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. — М. : Стройиздат, 1980. — 40 с.
4. Колпаков, С.В. Исследование несущей способности стальных штырей, вклеенных в древесину поперек волокон [Текст] / С.В. Колпаков, Ю.В. Халтурин // Экспресс-информация. Сер. 8. Строительные конструкции. — 1984. — № 4. — С. 14–18.

СТОЛПОВСКИЙ Г.А., асп.; E-mail: stolpovskij@mail.ru

Оренбургский государственный университет

ЖАДАНОВ В.И., д-р техн. наук, доц.; E-mail: organ-2003@bk.ru

Оренбургский государственный университет

ГАРИПОВ В.С., канд. техн. наук, доц.; E-mail: vladimir.garipov@mail.ru

Оренбургский государственный университет

Получено после доработки 26.01.11

Stolpovsky G.A., post-graduate student; E-mail: stolpovskij@mail.ru, Orenburg State University, Russia

Zhadanov V.I., doctor of technical sciences, assistant professor; E-mail: organ-2003@bk.ru, Orenburg State University, Russia

Garipov V.S., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: vladimir.garipov@mail.ru, Orenburg State University, Russia

THE APPLICATION OF DESIGN OF EXPERIMENTS BY OPTIMUM CONDITIONS FOR EFFORT OF THE DRAWING OF SPIRAL ROD FROM THE WOOD

There are results of researches of optimizing effort of the drawing of spiral rod from the wood. The method of design of experiments have been used. We researched the influence of main parameters such as a driving depth, a diameter and a winding pitch of a steel spiral cross-shaped rod to its bearing capacity.

Key words: wood, spiral rod, drawing, design of experiments.

REFERENCES

1. Dmitriev, P.A. Wooden junction of building constructions on the steel spiral cross-shaped rods working to an extraction [Text] / P.A. Dmitriev, V.I. Zhadanov, G.A. Stolpovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 4. — P. 133–137.
2. Rybin, Yu.I. Mathematical modeling and prognostication of metal working flows [Text] / Yu.I. Rybin. — SPb. : Nauka, 2004. — 644 p.
3. The recommendation of the examination of wooden constructions joints [Text] / TSNIISK named after V.A. Koucherenko. — M. : Stroyizdat, 1980. — 40 p.
4. Kolpakov, S.V. Bearing capacity researches of steel dowels pasted-in wood across the grain [Text] / S.V. Kolpakov, Yu.V. Khalturin // Ecross information. Article 8. Building constructions. — 1984. — N 4. — P. 14–18.

УДК 539.215

А.Н. ХАРХАРДИН

МОДЕЛИ ПОТЕНЦИАЛОВ И СИЛ ПАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Получен общий вид и частные выражения для потенциалов и сил парного межмолекулярного взаимодействия атомов простых веществ, микро- и наночастиц дисперсного минерального сырья, а также зависимости для их координационного числа. Дается анализ кинетики сухого и мокрого способов измельчения минерального сырья.

Ключевые слова: измельчение, микро- и наночастицы, межмолекулярное взаимодействие, потенциалы и силы, координационное число.

Механохимическое измельчение минерального сырья со спуском вниз к ультра- и нанодисперсности его частиц и особенность их поведения в слабощелочных средах является наиболее целесообразным методом технологического направления «сверху — вниз» в строительной индустрии. Знания межмолекулярного взаимодействия микро- и наночастиц необходимы для развития теории синтеза и практики использования геоматериалов — безобжиговых минеральных вяжущих веществ и продуктов механохимической активации силикатного и алюмосиликатного сырья.

Силы взаимодействия атомов металлов и других простых веществ, а также микро- и наночастиц дисперсных материалов в потенциалах парного межмолекулярного взаимодействия обратно пропорциональны расстоянию между ними. Обычно потенциал общего вида записывают следующим образом [1]:

$$\varphi = a/r^m - b/r^n, \quad (1)$$

где a, b — параметры потенциала, определенные для пары молекул данного типа ($a, b > 0$) и $m > n$ (принято автором).

Выразим параметры a и b потенциала через величину ε , глубину потенциальной ямы на кривой $\varphi(r)$ и параметр d_0 , определяющий положение минимума на потенциальной кривой (рис. 1). Для этого выполняются равенства $\varphi(d_0) = -\varepsilon$ и $d\varphi/dr = 0$ при $r = d$. Так как

$$d\varphi/dr = -m \frac{a}{r^{m+1}} + n \frac{b}{r^{n+1}},$$

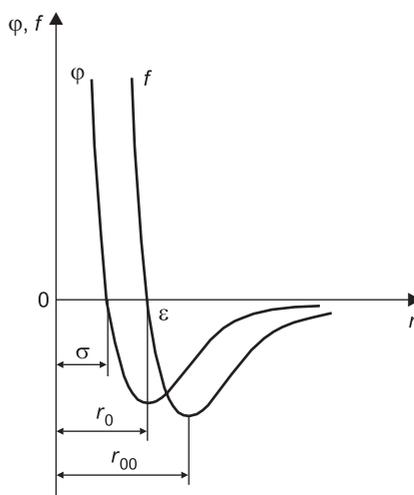


Рис. 1. Зависимость потенциальной энергии φ и сил межмолекулярного взаимодействия $f(r)$ от расстояния между молекулами (микро- и наночастицами); ε — глубина потенциальной ямы и так называемый нулевой диаметр молекул (средний диаметр микро- или наночастиц)

то условия этих равенств могут быть представлены в виде

$$\varphi = \frac{a}{d_0^m} - \frac{b}{d_0^n} = -\varepsilon, \quad -m \frac{a}{d_0^m} + n \frac{b}{d_0^n} = 0.$$

Решение этой системы уравнений относительно a и b дает

$$a = \varepsilon \frac{n}{m-n} d_0^m, \quad b = \varepsilon \frac{m}{m-n} d_0^n.$$

После подстановки найденных значений в исходную формулу (1) получим

$$\varphi = \frac{n\varepsilon}{m-n} \left[\left(\frac{d_0}{r} \right)^m - \frac{m}{n} \left(\frac{d_0}{r} \right)^n \right]. \quad (2)$$

Особенность взаимодействия микро- и наночастиц дисперсных материалов заключается в том, что с уменьшением их размера в процессе измельчения минерального зернистого сырья возрастают как силы отталкивания между ними — дисперсный слой становится все более рыхлым и с меньшей плотностью их упаковки, так и силы притяжения, что определяется агрегированием микро- и наночастиц. Взаимодействие микро- и наночастиц в измельченных материалах наилучшим образом описывается потенциалом 2–4, так как хорошо выполняются пределы по критическим плотностям их упаковки. Плотность упаковки частиц в дисперсном слое в точке начала их агрегирования характеризуется критической величиной η_c . Она зависит от плотности упаковки η_1 зерен измельчаемого зернистого материала в виде [2]: $\eta_c \leq \eta_1^{3 \dots 10/3}$ — начало взаимодействия и агрегирования частиц и $\eta_c \leq \eta_1^{5 \dots 16/3}$ — предельное ее значение при сухом способе измельчения зернистых горных пород и материалов. Так, при $\eta_1 = 0,6403$ получим $\eta_c = 0,2625 \dots 0,22625$, при $\eta_1 = 0,634053$ имеем $\eta_c = 0,2549 \dots 0,2190$, а при $\eta_1 = 0,60$ $\eta_c = 0,216 \dots 0,182$. Так как плотность упаковки молекул газов, наночастиц пыли, пудры и тумана составляет $\eta \leq 0,1$, то для многих дисперсных систем можно ограничиться показателем степени $m = 5$ в искомым потенциалах парного взаимодействия дисперсных материалов, поскольку величина $\eta \leq 0,1$ при взаимодействии микро- и наночастиц достигается при $\eta_c = \eta_1^5 \dots \eta_1^{16/3} = 0,6403^{5 \dots 16/3} = 0,1072 \dots 0,093$ [2].

Потенциал 2 – 4 парного взаимодействия микро- и наночастиц в дисперсном слое в соответствии с показателями степени 3 и 5 при η_1 в выражениях для критических плотностей упаковки, а также согласно выражению (2) имеет вид

$$\varphi = \varepsilon \left[\left(\frac{d_0}{r} \right)^4 - 2 \left(\frac{d_0}{r} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Вместо пары параметров ε и d_0 для задания потенциала любой модели часто используют параметры ε и σ , где σ определен условием $\varphi(\sigma) = 0$ (σ есть сумма ван-дер-ваальсовых радиусов взаимодействующих молекул или средний диаметр монодисперсных частиц).

Из выражения (3) при $r = \sigma$ находим $\left(\frac{d_0}{\sigma}\right)^4 - 2\left(\frac{d_0}{\sigma}\right)^2 = 0$, откуда

$$d_0 = 2^{1/2}\sigma.$$

Подстановка полученного значения $d_0 = 2^{1/2}\sigma$ в (3) определяет потенциал 2–4 через параметры ε и σ , а также его можно выразить через параметр плотности упаковки частиц η . Так как $\eta = (\sigma/r)^3$, то

$$\varphi = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^4 - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^2 \right] \quad \text{либо} \quad \varphi = 4\varepsilon (\eta^{4/3} - 2\eta^{2/3}). \quad (4)$$

Силы электростатического и электрического взаимодействия микро- и наночастиц определяются производной $f = d\varphi/dr$ (знак — опущен). Из потенциала 2–4 получим

$$f(r) = 8\varepsilon \left(\frac{\sigma_0^2}{r^3} - 2\frac{\sigma_0^4}{r^5} \right) \quad \text{и} \quad f(r) = 8\varepsilon \left(\frac{\eta}{\sigma} - 2\frac{\eta^{5/3}}{\sigma} \right) = 8\varepsilon \frac{\eta}{\sigma} (1 - 2\eta^{2/3}). \quad (5)$$

Из равенства нулю выражений (5), т.е. $f(r) = d\varphi/dr = 0$, найдем $r_0 = 2^{1/2}\sigma = \sqrt{2}\sigma$ и $\eta = (1/2)^{3/2}$. Тогда $\eta_c = 0,64029/2^{3/2} \leq 0,2264$ и $\eta = (1/2)^{3/2} = 0,3536$, а $\eta_c = 0,64029 \cdot 0,3536 = 0,2264$. Силы притяжения минимальны, а силы отталкивания микро- и наночастиц в дисперсном слое максимальны при $r = r_{00}$ и $df/dr = d^2\varphi/dr^2 = 0$. Из выражения (5)

$$df/dr = 8\varepsilon \left(10\frac{\sigma_0^4}{r^6} - 3\frac{\sigma_0^2}{r^4} \right),$$

$$df/dr = 8\varepsilon \left(10\frac{\eta^2}{\sigma^2} - 3\frac{\eta^{4/3}}{\sigma^2} \right) = 8\varepsilon \frac{\eta^{4/3}}{\sigma} (10\eta^{2/3} - 3). \quad (6)$$

Из первого выражения (6) при $df/dr = 0$ получим $r_{00} = (10/3)^{1/2}\sigma = 1,826\sigma$. При этом критическая плотность упаковки микро- частиц в дисперсном слое $\eta_c = 0,64029/(10/3)^{3/2} \leq 0,1052$. Если из второго выражения (6) $(10\eta^{2/3} - 3) = 0$, то $\eta = 0,3^{3/2} = 0,1643$, $\eta_c = 0,64029 \cdot 0,1643 \leq 0,1052$. Отсюда среднее значение $\eta_1 = 0,1052^{1/5} = 0,63716$ вычисляют как $\eta_1 = (0,64029 \cdot 0,634053)^{1/2} = 0,63716$.

Потенциал 4–3, подходящий для дисперсных смесей, получаемых сухим способом их измельчения, где $r_0 = 4/3$, $\eta_c = 0,64029/(4/3)^3 = 0,2701$, а $\eta = 0,2701/0,64029 = 0,4219$; $r_{00} = 5/3$, $\eta_c = 0,64029/(5/3)^3 = 0,1383$, а $\eta = 0,1383/0,64029 = 0,216$.

Координационное число микро- и наночастиц в дисперсном слое равно: $Z \leq 8,8/(0,64029/0,2264) \leq 3,11$, $Z \geq 8,5/(0,634053/0,1052) \geq 1,41$. Столь низкие значения $\eta_c = 0,1052$ и $Z = 1,41$ для сухого способа выполнимы при длительном измельчении материала либо при введении в измельчаемую зернистую смесь ПАВ. Например, введение в измельчаемый цементный клинкер триэтанолamina приводит к пылевидному (взвешенному в воздушной среде) его состоянию. Так, плотность упаковки

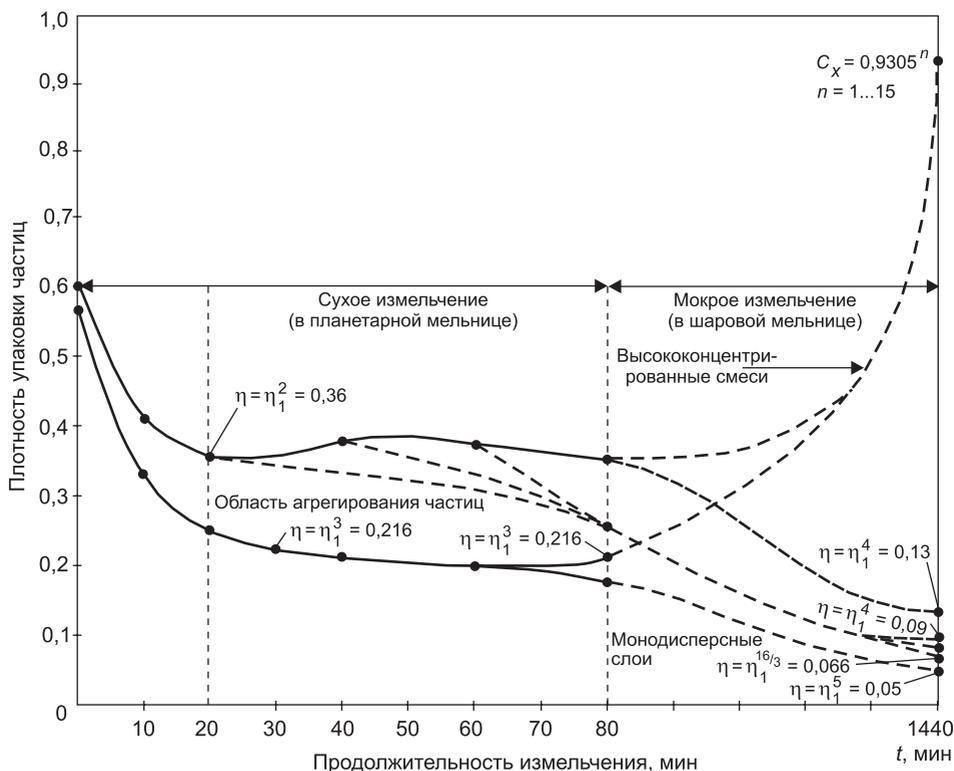


Рис. 2. Изменение плотности упаковки частиц кварцевого песка ($d_1 = 0,5 - 0,3$ мм) от времени измельчения сухим и мокрым способом

частиц при измельчении зернистого материала с плотностью упаковки его зерен $\eta_1 = 0,6$ будет меняться в пределах: $\eta = \eta_1^2 = 0,36$; $\eta = \eta_1^3 = 0,216$; $\eta = \eta_1^4 = 0,13$; $\eta = \eta_1^5 = 0,08$ и $\eta = \eta_1^6 = 0,05$, а при наибольшем значении $\eta_1 = 0,64$ имеем $\eta = \eta_1^5 = 0,11$; $\eta = \eta_1^{5,33} = 0,09$. На рис. 2 верхняя кривая — для рыхлого дисперсного слоя, нижняя — для уплотненного утряской плотного слоя. Концы пологих отрезков кривых характеризуются плотностью упаковки частиц в начале агрегирования и частиц предельного размера при сухом способе измельчения. В процессе сухого механического измельчения материалов и горных пород наступает момент, когда уменьшение размера частиц приостанавливается. Часть механической энергии измельчения идет на разрушение агрегаций микрочастиц. Полученные величины критических плотностей упаковки и координационные числа микрочастиц в дисперсном слое и в агрегациях соответствуют критическому состоянию вещества:

$$Z = \frac{Z_{кр}}{\eta_1} \cdot \eta = \frac{8,8}{0,64029} (0,2625 \dots 0,22625) \leq 3,6 \dots 3,1,$$

$$Z = \frac{Z_{кр}}{\eta_1} \cdot \eta = \frac{8,5}{0,63405} (0,2549 \dots 0,219) \leq 3,42 \dots 2,49,$$

где $Z_{кр} = 8,8$ и $Z_{кр} = 8,5$ — координационные числа, соответствующие наибольшим значениям плотности случайной упаковки сферических зерен $\eta_1 = 0,64029$ и $\eta_1 = 0,634053$ соответственно.

При мокром способе механического измельчения материалов и горных пород размер и плотность упаковки микрочастиц уменьшаются по сравнению с сухим способом. Плотность упаковки монодисперсных микро- или наночастиц в тонкодисперсном слое согласно индексу ее амплитуды может достигать второй критической величины $\eta_c \leq 0,1$:

$$C_3 = \eta_c \leq 0,2549 \cdot \eta_1^2 \leq 0,2549 \cdot 0,634053^2 \leq 0,1025 \text{ и}$$

$$C_3 = \eta_c \leq \eta_1^5 \leq 0,64029^5 \leq 0,1076.$$

Мокрый способ измельчения, помимо ускорения процесса помола, позволяет при очередных дозировках исходного зернистого сырья получать высокоплотный полидисперсный состав с высокой концентрацией твердой фазы (см. рис. 2 — восходящая пунктирная кривая), в том числе и золь-гель компоненту. Это важно при получении безобжиговых высококонцентрированных вяжущих суспензий и алюмосиликатных геоматериалов.

Обе величины 0,2549 и 0,1 критической плотности упаковки микро- и наночастиц при сухом и мокром механическом измельчении материалов вытекают непосредственно из общей закономерности структурной топологии, преобразованной к виду [2]:

$$\eta \leq \frac{1}{10(\sqrt{3}-1)^p}. \quad (7)$$

Так, при $p = 3$ и $p = 0$ из выражения (7) получают соответственно величины $\eta_c \leq 0,2549$ и $\eta_c \leq 0,1$ а при $p = 1$ и $p = 2$ характерные: $\eta_c = 0,1366$ и $\eta_c = 0,1866$.

Основная причина образования устойчивых коллоидных и высокомолекулярных структур — наличие дальнедействующих сил притяжения между частицами. Установлено [3], что поле межмолекулярного притяжения между частицами, состоящими из многих молекул, является дальнедействующим. Такие силы обратно пропорциональны кубу расстояния между частицами. Притяжение между коллоидными частицами ощутимо на расстоянии до нескольких сотен нанометров. Однако при сближении частиц на меньшее расстояние сказываются более короткодействующие силы отталкивания. Они обусловлены перекрытием двойных электрических слоев этих частиц. В результате наблюдается закрепление частиц на некотором расстоянии друг от друга, зависящем от заряда и природы частиц, концентрации электролитов в системе и пр. При дальнейшем сближении частиц притяжение между ними усиливается и вновь начинает преобладать над отталкиванием, жидкая прослойка разрывается, частицы слипаются, коагулируют. Взаимодействие глобул и микрочастиц в коллоидных, в золь-гель и в других дисперсных системах согласно (2) хорошо описывается потенциалами 2–5 и 3–5 соответственно:

$$\varphi(r) = \frac{2}{3} \cdot \varepsilon \left[\left(\frac{d_0}{r} \right)^5 - \frac{5}{2} \left(\frac{d_0}{r} \right)^2 \right], \quad \varphi(r) = \frac{3}{2} \cdot \varepsilon \left[\left(\frac{d_0}{r} \right)^5 - \frac{5}{3} \left(\frac{d_0}{r} \right)^3 \right]. \quad (8)$$

После преобразования этих потенциалов через параметры ε и σ найдем:

$$\varphi(r) = \frac{2}{3} \left(\frac{5}{2}\right)^{5/3} \cdot \varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^5 - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^2 \right], \quad \varphi(r) = \frac{3}{2} \left(\frac{5}{3}\right)^{5/2} \cdot \varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^5 - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^3 \right]. \quad (9)$$

Выражения для сил взаимодействия частиц как $f(r) = d\varphi/dr$ имеют вид:

$$f(r) = \frac{2}{3} \left(\frac{5}{2}\right)^{5/3} \cdot \varepsilon \left[2 \frac{\sigma^2}{r^3} - 5 \frac{\sigma^5}{r^6} \right], \quad f(r) = \frac{3}{2} \left(\frac{5}{3}\right)^{5/2} \cdot \varepsilon \left[3 \frac{\sigma^3}{r^4} - 5 \frac{\sigma^5}{r^6} \right]. \quad (10)$$

Из выражений (10) легко получить вторую производную $d\varphi/dr$:

$$df/dr = 4 \left(\frac{5}{2}\right)^{5/3} \cdot \varepsilon \left[5 \frac{\sigma^5}{r^7} - \frac{\sigma^2}{r^4} \right], \quad df/dr = 9 \left(\frac{5}{3}\right)^{5/2} \cdot \varepsilon \left[5 \frac{\sigma^5}{r^7} - 2 \frac{\sigma^3}{r^5} \right]. \quad (11)$$

Если $d\varphi/dr = 0$, то $r_0 = \sqrt[3]{5/2\sigma}$ и $r_0 = \sqrt{5/3\sigma}$, а из выражений (11) при $df/dr = 0$ получают $r_{00} = (5/3)^{1/3}\sigma$ и $r_{00} = (5/2)^{1/2}\sigma$. Критическая плотность упаковки взаимодействующих элементов структуры находится в пределах:

$$\eta_c \leq 0,64029 / [(5/2)^{1/3} \dots (5/3)^{1/3}]^3 \leq 0,256 \dots 0,384,$$

$$\eta_c \leq 0,64029 / [(5/3)^{1/2} \dots (5/2)^{1/2}]^3 \leq 0,298 \dots 0,162.$$

Полимерные студни и силикатные гели имеют $\eta_1 = 0,6981 - 0,71$, величины η_c при этом пропорционально возрастают: $0,279 \geq \eta_c \geq 0,140$, $0,324 \geq \eta_c \geq 0,127$ и $0,284 \geq \eta_c \geq 0,142$, $0,330 \geq \eta_c \geq 0,180$ соответственно.

Формулы для получения различных моделей потенциалов и сил парного межмолекулярного взаимодействия и необходимых вычислений можно записать в общем виде. Приведем полученные выражения для потенциалов и сил взаимодействия, записанных через параметры ε и σ в общем виде:

$$\varphi = \frac{n\varepsilon}{m-n} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{m-n}} \left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^m - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^n \right], \quad (12)$$

$$d\varphi/dr = \frac{n\varepsilon}{m-n} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{m-n}} \left(n \frac{\sigma^n}{r^{n+1}} - m \frac{\sigma^m}{r^{m+1}} \right). \quad (13)$$

Приравняем выражение (13) нулю, т.е. $d\varphi/dr = 0$, из которого

$$r_0 = \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{1}{m-n}} \cdot \sigma; \quad \eta_c = \eta_1 / (r_0/\sigma)^3,$$

а экспериментальное значение

$$r_0 = (\eta_1 / \eta_c)^{1/3} \cdot \sigma. \quad (13a)$$

Запишем выражение в общем виде для наибольших сил отталкивания взаимодействующих элементов дискретности:

$$d^2\varphi / dr^2 = \frac{n\varepsilon}{m-n} \left(\frac{m}{n}\right)^{m/m-n} \cdot n(n+1) \left[\frac{m(m+1)}{n(n+1)} \frac{\sigma^m}{r^{m+2}} - \frac{\sigma^n}{r^{n+2}} \right]. \quad (14)$$

Из равенства выражения (14) нулю, т.е. $d^2\varphi / dr^2 = 0$, получим

$$r_{00} = \left[\frac{m(m+1)}{n(n+1)} \right]^{1/m-n} \cdot \sigma; \quad \eta_c = \eta_1 / (r_{00} / \sigma)^3,$$

экспериментальное

$$r_{00} = (\eta_1 / \eta_c)^{1/3} \sigma. \quad (14a)$$

Обратно пропорциональную зависимость потенциальной энергии и сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния между элементами структуры (атомов, молекул, глобул, микро- и наночастиц и др.) можно преобразовать к прямо пропорциональной зависимости от плотности их упаковки. Влияние этих сил на координационное число элементов структуры будем учитывать (в его выражениях) как произведение первой производной от соответствующих членов в потенциалах парного взаимодействия и кулоновской силы, пропорциональной η^2 . Так, из потенциалов 6–12 и 3–9 влияние этих сил на координационное число атомов определяется изменением плотности их упаковки и вычисляется так: $(\eta^6)' \cdot \eta^2 = 6\eta^7$, $(\eta^3)' \cdot \eta^2 = 3\eta^4$ — для сил притяжения и $(\eta^{12})' \cdot \eta^2 = 12\eta^{13}$, $(\eta^9)' \cdot \eta^2 = 9\eta^{10}$ — для сил отталкивания. Эти выражения можно записать в общем виде: $n\eta^{n+1}$ — для сил притяжения и $m\eta^{m+1}$ — для сил отталкивания, где m, n — показатели степени в потенциалах парного взаимодействия; принято, что $m > n$. Плотность упаковки микро- и наночастиц при измельчении материалов понижается, а силы притяжения и отталкивания с уменьшением их размера возрастают: $(1 - n\eta^{n+1})$ и $(1 - m\eta^{m+1})$ соответственно. Силы притяжения атомов или молекул простых веществ (металлов) изменяются при изменении плотности их упаковки пропорционально $(n\eta^{n+1})$. Уточненные выражения для координационного числа по сравнению с ранее опубликованным вариантом [4] можно записать в общем виде:

$$Z = \frac{Z_{кр}}{\eta_{кр}} \eta - \frac{1 - 2\eta^{m/n}}{2 \frac{m}{n} (1 - \eta)^{n/m}} + n\eta^{n+1} - (1 - m\eta^{m+1}), \quad (15)$$

$$Z = \frac{Z_{кр}}{\eta_{кр}} \eta - \frac{1 - 2\eta^{m/n}}{2 \frac{m}{n} (1 - \eta)^{n/m}} + (1 - n\eta^{n+1}) - (1 - m\eta^{m+1}), \quad (16)$$

где $Z_{кр}$, $\eta_{кр}$, η — координационное число и плотности упаковки элементов структуры при кристаллическом, твердом или псевдотвердом (зернистом) состоянии вещества и переменная изменения плотности упаковки элементов структуры при нагревании или при измельчении вещества соответственно.

Так, при $\eta = \eta_{кр} = 0,74048$ и $Z_{кр} = 12$ из выражения (15) с использованием показателей степени потенциалов 6–12 и 3–9 получим:

$$Z = 16,2\eta - \frac{1-2\eta^2}{4(1-\eta)^{1/2}} + 6\eta^7 - (1-12\eta^{13}) = 12, \quad (17)$$

$$Z = 16,2\eta - \frac{1-2\eta^3}{6(1-\eta)^{1/3}} + 3\eta^4 - (1-3\eta^{10}) = 12. \quad (18)$$

Выражение для координационного числа микрочастиц продуктов механического измельчения горных пород и материалов с использованием показателей степени потенциала 2–4 согласно (16) имеет вид

$$Z = 13,744\eta - \frac{1-2\eta^2}{4(1-\eta)^{1/2}} + (1-2\eta^3) - (1-4\eta^5). \quad (19)$$

Подставляя в (19) $\eta = 0,64029$, находим $Z = 8,63$, что меньше 8,8. Поэтому коэффициент в последнем члене выражений для Z уточняется при $\eta = \eta_1$ и сумме последних трех членов равных нулю. Так, выражение (19) при использовании $\eta_1 = \eta_{кр} \leq 0,64029$ принимает вид

$$Z = 13,744\eta - \frac{1-2\eta^2}{4(1-\eta)^{1/2}} + (1-2\eta^3) - (1-5,576\eta^5). \quad (20)$$

Из выражения (20) при $\eta = 0,60; 0,59; 0,574; 0,41; 0,2625$ получим соответственно $Z = 8,14; 8,00; 7,73; 5,35; 3,33$, тогда как из выражения (19) — несколько заниженные результаты: $Z = 8,02; 7,87; 7,63; 5,33; 3,32$. Экспериментальный результат при данных значениях η : $Z = 8,16; 8,00; 7,78; 5,35; 3,33$ [2].

Выражения для координационных чисел, вытекающие из потенциалов 2–5 и 3–5, согласно (16) при использовании $\eta = \eta_{кр} \leq 0,64029$ имеют вид:

$$Z = 13,744\eta - \frac{1-2\eta^{5/2}}{5(1-\eta)^{2/5}} + (1-2\eta^3) - (1-5\eta^6) = 8,52, \quad (21)$$

$$Z = 13,744\eta - \frac{1-2\eta^{5/3}}{\frac{10}{3}(1-\eta)^{3/5}} + (1-3\eta^4) - (1-5\eta^6) = 8,61. \quad (22)$$

Выражения (21) и (22) с учетом поправочных коэффициентов в последнем члене принимают вид:

$$Z = 13,744\eta - \frac{1-2\eta^{5/2}}{5(1-\eta)^{2/5}} + (1-2\eta^3) - (1-9,12\eta^6), \quad (23)$$

$$Z = 13,744\eta - \frac{1-2\eta^{5/3}}{\frac{10}{3}(1-\eta)^{3/5}} + (1-3\eta^4) - (1-7,71\eta^6). \quad (24)$$

Подставляя в выражения (23) и (24) $\eta = 0,6$, получим: $Z = 8,11$ и $Z = 8,14$.

Из потенциала 1-5 — для повышенных сил взаимодействия элементов структуры вещества (где $0,195 \geq \eta_c \geq 0,084$) по сравнению с кулоновской силой отталкивания частиц с использованием $\eta_{кр} \leq 0,64029$ следует

$$Z = 13,744\eta - \frac{1-2\eta^5}{10(1-\eta)^{1/5}} + (1-\eta^2) - (1-5\eta^6) = 8,64. \quad (25)$$

Запишем выражение (25) с учетом поправочного коэффициента в последнем члене с использованием $\eta = \eta_{кр} \leq 0,64029$

$$Z = 13,744\eta - \frac{1-2\eta^5}{10(1-\eta)^{1/5}} + (1-\eta^2) - (1-7,35\eta^6). \quad (26)$$

Подставляя в выражения (25, 26) $\eta = 0,60 - 0,2549$, получим $Z = 8,02 - 3,33$ и $Z = 8,13 - 3,33$, что также хорошо соответствует эксперименту.

Из выражений (15-26) следует, что с увеличением показателей степени в последних членах в них необходимо возрастают и коэффициенты. С уменьшением плотности упаковки элементов структуры в дискретных (дисперсных) системах величины этих членов стремятся к единице, а величина второго члена стремится к критической плотности их упаковки.

Следовательно,

$$Z_c = 16,2\eta_c - \eta_c = 15,2\eta_c, \text{ где } \eta_c = \eta_1^5, \text{ а } \eta_1 \leq 0,74048;$$

$$Z_c = 13,774\eta_c - \eta_c = 12,774\eta_c, \text{ где } \eta_c = \eta_1^{3 \dots 10/3}, \text{ а } \eta_1 \leq 0,64029.$$

При подстановке в выражения (15 - 26) $\eta \leq 0,1$ получим $Z \leq 1,1-2,4$, что характерно для газового состояния вещества (дисперсной системы).

Выводы. 1. Для различных неупорядоченных дискретных систем и уровней их дискретности можно подобрать с использованием программного обеспечения ЭВМ соответствующий вид выражений для потенциала и сил межмолекулярного взаимодействия элементов структуры (дискретности) вещества из сочетания парных чисел от 1 до 12.

2. Вид потенциала, сил взаимодействия и среднее расстояние между частицами (13а) и (14а) можно определить по плотности упаковки и размеру частиц в дисперсной системе.

3. Увеличение интервала между парными числами и величины большего показателя степени в потенциале дает повышение критической плотности упаковки и плотности упаковки элементов структуры в дисперсной системе предельного измельчения в результате уменьшения размера частиц и увеличения сил взаимодействия между ними.

4. Каждый вид выражения для потенциала парного взаимодействия приводит в расчетах к определенной минимальной (предельной) плотности упаковки частиц в дисперсной системе при максимальной силе их отталкивания.

5. Даже высокая свободная поверхностная энергия частиц не приводит в их консолидации к прочности минерального монолитного тела — необходима химическая связь между ними, т.е. активный посредник образования химической связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнова, Н.А. Методы статистической термодинамики в физической химии [Текст] / Н.А. Смирнова. — М. : Высш. шк., 1973. — С. 303–319.
2. Хархардин, А.Н. Топологические свойства микро- и нанодispersных материалов [Текст] / А.Н. Хархардин, В.В. Кашибадзе // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 5. — С. 109–113.
3. Кокотов, Ю.А. Иониты и ионный обмен [Текст] / Ю.А. Кокотов. — Л. : Химия, 1980. — 20 с.
4. Хархардин, А.Н. Потенциалы и силы парного межмолекулярного взаимодействия атомов, микро- и наночастиц [Текст] / А.Н. Хархардин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 109–116.

*ХАРХАРДИН А.Н., д-р техн. наук, проф.; E-mail: s-nsm@intbel.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова*

Получено 11.10.10

Kharkhardin A.N., doctor of technical sciences, professor; E-mail: s-nsm @ intbel.ru, Belgorod State Shukhov Technological University, Russia

MODEL POTENTIALS AND FORCES THE PAIR INTERACTION MICRO-AND NANOPARTICLES IN DISPERSE SYSTEMS

The findings of the public and private expressions for potentials and forces the pair interaction of micro-and nanoparticles in the products of crushing rocks and materials, as well as the coordination number depending on the density of their packing in disperse.

Key words: crushing, micro- and nanoparticles, intermolecular interaction, potentials and forces, coordination number.

REFERENCES

1. Smirnova, N.A. Methods of statistical thermodynamics in physical chemistry [Text] / N.A. Smirnova. — M. : Higher school, 1973. — P. 303–319.
 2. Kharkhardin, A.N. Topological properties of micro- and nanopowder materials [Text] / A.N. Kharkhardin, V.V. Kashibadze // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 5. — P. 109–113.
 3. Kokotov, Yu.A. Ion exchangers, and ion exchange [Text] / Yu.A. Kokotov. — L., 1980. — 20 p.
 4. Kharkhardin, A.N. The potentials and forces of paired of interaction of atoms and micro- and nanoparticles [Text] / A.N. Kharkhardin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 109–116.
-

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") или дискете 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 не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: *фамилии, инициалы, ученые степени, звания* (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и *английском языках*;

— почтовые адреса, телефоны и *e-mail авторов*;

— *название статьи на английском языке*;

— *аннотацию на английском языке*;

— *ключевые слова на английском языке*;

— *библиографический список на английском языке*.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *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 2011 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины и их обозначения, соответствующие стандарту СТ. СЭВ 1052–78 (СН 528–80).

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

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.

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 1-е полугодие 2011 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений
Строительные материалы и изделия
Экономика и организация строительства
Автоматизация и технология строительного производства
Гидротехническое строительство
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов
Строительные и дорожные машины
Научные проблемы архитектуры и экологии
Научно-методический
В лабораториях вузов
Внедрение научных достижений в производство
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 1200 р.

Цена отдельного номера — 200 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 2 (626) 2011

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Т.П. Петроченко*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*