

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

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

№ 5 (653)  
Май 2013 г.

Главный редактор В.Г. Себешев  
Редакционная коллегия: А.А. Афанасьев,  
В.Л. Баладинский, Т.И. Баранова, В.А. Воробьев,  
П.А. Дмитриев, В.А. Игнатьев, 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.П. Правдинец, В.Г. Себе-  
шев, 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](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 24.05.13. Формат 70×108 <sup>1</sup>/16.  
Усл. печ. л. 11,2+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 3262.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Адищев В.В., Шмаков Д.С.,  
Шмаков Е.С. Расчет осадки здания на естественном основании в неформализованной постановке ..... 3

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Селяев В.П., Неверов В.А.,  
Куприяшкина Л.И. Фрактальность наноразмерной структуры природных диатомитов ..... 16

Машкин Н.А., Косач А.Ф.,  
Обадьянов А.В. Эффективность раздельной кавитационной активации песка при производстве мелкозернистых бетонов ..... 23

Фомина Е.В., Строкова В.В., Кудеярова Н.П.  
Особенности применения предварительно гашеной извести в ячеистых бетонах автоклавного твердения ... 29

Киселёв В.П., Шевченко В.А., Бугаенко М.Б.,  
Иванова Л.А., Ворончикин В.Д. Использование смолы пиролиза, антиоксидантов и дивинилакрилонитрильного каучука для модификации свойств битума и асфальтобетонных смесей ..... 35

### ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

<b>Болотин С.А., Дадар А.Х., Оолакай З.Х., Чебокчинова Г.С.</b> Методика детализации «новых» норм продолжительности строительства на основе статистики СНиП 1.04.03–85 .....	41
<b>Голубева Д.Н., Титов М.М.</b> Использование технологии отогрева мерзлого грунта при бетонировании конструкций фундаментов .....	48
<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Крюков И.В.</b> Особенности рециркуляции воздуха в перегрузочном желобе с комбинированной байпасной камерой. Сообщение 2. Решение уравнений и результаты расчета .....	54
<b>Кучеренко М.Н., Чиркова Е.В.</b> Применение теории потенциала влажности для расчета переноса влаги через наружные ограждения .....	63
<b>Савельев Е.Г., Рохлецова Т.Л.</b> Использование солнечной энергии в суровых климатических условиях .....	68
<b>Боровицкий А.А., Угорова С.В., Тарасенко В.И.</b> Многофакторное исследование коэффициента улавливания местного вытяжного устройства .....	74
<b>СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ</b>	
<b>Носов С.В.</b> Интенсивная технология уплотнения дорожных асфальтобетонных смесей при изменении их реологических свойств .....	81
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Загороднов Е.И.</b> Малоэтажное домостроение в большом городе .....	90
<b>Бежанова М.В.</b> Композиционно-стилевые особенности архитектурных ансамблей в исторических центрах крупных сибирских городов .....	95
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Закиуллин Р.С.</b> Интеллектуальное окно с угловым селективным светопропусканием .....	101
<b>Иванов В.Н., Трофимова Л.С.</b> Математическая модель формирования и развития систем машин дорожных организаций с учетом требований к качеству выполнения технологических процессов и в соответствии со спросом .....	107
<b>Миренков В.Е., Шутов В.А., Полуэктов В.А.</b> Моделирование процесса деформирования образцов .....	115
<b>В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ</b>	
<b>Пинус Б.И., [Безделев В.В.], Гребенюк Г.И., Созонов П.С.</b> Моделирование физической нелинейности стального стержня при одноосном нагружении с учетом истории деформирования .....	122

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 004.942:624.15

В.В. АДИЩЕВ, Д.С. ШМАКОВ, Е.С. ШМАКОВ

## РАСЧЕТ ОСАДКИ ЗДАНИЯ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ОСНОВАНИИ В НЕФОРМАЛИЗОВАННОЙ ПОСТАНОВКЕ

Продемонстрирован новый подход к решению задачи об определении осадки здания на естественном основании в нечеткой постановке. Он позволяет разрешить проблемы, связанные со значительной степенью неопределенности и неполнотой исходных данных. Для описания не вполне определенных физико-механических характеристик грунтов и границ между слоями применен новый математический аппарат. Реализован алгоритм расчета осадки как нечеткой величины. Результаты показали преимущества нового подхода перед традиционным детерминистическим подходом к решению рассматриваемой задачи, так как коэффициент запаса может быть назначен после выполнения расчета.

**Ключевые слова:** неопределенность, неполнота, функция принадлежности, нечеткие величины, осадка сооружения, естественное основание.

**Введение.** Известно, что одной из главных причин возникновения трещин в ограждающих и несущих конструкциях сооружений является неравномерность их осадок. При проектировании вновь строящихся сооружений наиболее высокой степенью неопределенности обладают исходные данные, порой неполные, на основании которых выбираются типы оснований и фундаментов, их конструктивные решения. Физико-механические свойства грунтов основания сооружения определяются с помощью стандартных методов статистической обработки экспериментальных данных, полученных в лабораторных или полевых условиях. При этом, как правило, в процессе эксплуатации по различным причинам (техногенное подтопление и т.п.) геологические условия, а следовательно, и свойства грунтов могут изменяться. Появляется необходимость использования нечеткой меры, свободной от ограничений вероятностной меры. Неприменимость вероятностной меры более или менее очевидна, так как геологическая обстановка конкретной строительной площадки уникальна и не может оцениваться вероятностными характеристиками. Задача определения характеристик деформативности основания (например, грунтового или свайного) относится к типичным (по нескольким признакам) неформализованным задачам по Ньюэллу: имеются достаточно грубые приближенные алгоритмы, но полную информацию об исходных данных получить невозможно [1].

Физико-механические характеристики грунтов и геометрические характеристики грунтовых напластований устанавливаются следующими

способами: с использованием нормативных документов; по результатам экспериментов; на основе сведений, полученных от экспертов.

Строительные нормы и правила содержат данные, пригодные для построения многомерных функций принадлежности [2]<sup>1</sup>, определяющих физико-механические свойства грунта. В механике грунтов широко используются термины, которые вполне могут трактоваться как лингвистические переменные [3]. Это названия типов грунтов: скальные, скальные магматические, скальные метаморфические ... крупнообломочные, песчаные, пылевато-глинистые ... мерзлые. В свою очередь каждый тип грунтов подразделяется по плотности или пористости, сжимаемости, водонасыщению и другим параметрам. Если имеется возможность идентификации грунтов реальной строительной площадки с материалами в нормативной базе, данные нормативных документов можно представить в виде нечетких чисел, правил и отношений, отражающих сезонные и техногенные изменения характеристик грунтов. При этом сезонные и техногенные изменения определяются экспериментально или на основе данных эксперта. Но экспериментальные данные в любом случае имеют значительную степень неопределенности и требуют интерпретации эксперта.

**Представление исходных данных для решения задачи определения осадки в нечеткой постановке.** Под действием передаваемых сооружением усилий и собственного веса в массиве основания возникают напряжения, приводящие к деформации грунтов. В расчетах используются механические характеристики грунтов, определяющие их деформативность и структурную прочность. Такими характеристиками являются: модуль деформации  $E$ , коэффициент поперечного расширения  $\nu$ , угол внутреннего трения  $\phi$  и удельное сцепление  $c$ . Эти параметры определяются экспериментально в лабораторных или полевых условиях. При этом применяются статистические методы обработки опытных данных в предположении, что все рассматриваемые случайные величины распределены по нормальному закону Гаусса.

Характерной величиной для оценки эксплуатационной пригодности сооружения является его осадка. Используется расчетная модель, предполагающая, что границы грунтовых слоев плоскопараллельные. В действительности толщина слоев в пределах строительной площадки может существенно изменяться, но в практических расчетах [4] эта особенность игнорируется, мощности слоев определяются как некоторые «средние».

Все реальные исходные данные по грунтовым напластованиям не являются детерминированными, тем не менее, в расчетах используются как детерминированные. Набор стандартных вероятностных понятий и методов оказывается неадекватным для описания рассматриваемых ситуаций. Это связано с трудностью получения необходимых статистических характеристик параметров, их существенной нестационарностью. Выходом из сложившейся ситуации служит применение нового математического аппарата для задач, в которых проблема представления неопределенности исходных данных является основной и в то же время и наименее изученной.

---

<sup>1</sup> Адищев В.В., Шмаков Д.С. Определение момента образования трещины как нечеткой величины по экспериментальным данным // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 5. С. 3–13.

Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  количественно определяет степень принадлежности элементов  $x$  нечеткому множеству  $\tilde{A}$ . Равенство нулю значений  $\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_3)$  означает, что элементы  $x_1, x_3$  не включены в нечеткое множество,  $\mu_{\tilde{A}}(x_2)=1$  соответствует полностью включенному элементу. Значения между 0 и 1 характеризуют элементы, включенные с некоторой степенью неопределенности.

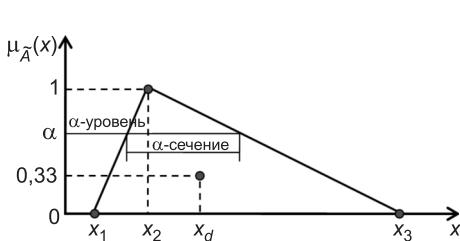


Рис. 1. Треугольная функция принадлежности и ее дефазифицированное значение

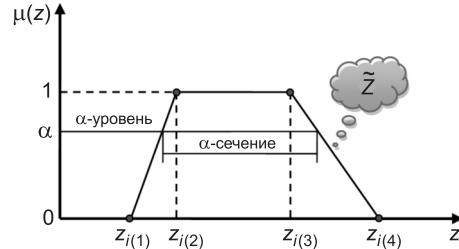


Рис. 2. Трапецидальная функция принадлежности

«Треугольное» нечеткое число  $\tilde{A} = ((x_1, 0); (x_2, 1); (x_3, 0))$  (рис. 1) будем обозначать формально тройкой чисел  $\tilde{A} = (x_1; x_2; x_3)$  или объединением значимых  $\alpha$ -уровней  $\tilde{A} = [x_1; x_3]_0 \cup [x_2; x_2]_1$ , где  $\alpha$ -сечение или  $\alpha$ -уровень нечеткого множества выделяет четкое подмножество, элементы которого имеют степени принадлежности, большие или равные  $\alpha$  [3]. Нечеткое множество, соответствующее слою грунта с размытыми границами, может быть задано «трапецидальной» функцией принадлежности (рис. 2), которая может быть описана четверкой чисел  $\tilde{Z} = (z_{i(1)}; z_{i(2)}; z_{i(3)}; z_{i(4)})$ , определяющих абсциссы вершин трапеции, или объединением интервалов на двух  $\alpha$ -уровнях  $\tilde{Z} = [z_{i(1)}; z_{i(4)}]_0 \cup [z_{i(2)}; z_{i(3)}]_1$ .

По данным табл. 1 для  $i$ -го слоя,  $i = \overline{1, 4}$ , строится трапецидальная функция принадлежности (см. рис. 2):

$$\mu(z) = \begin{cases} \frac{z - z_{i(1)}}{z_{i(2)} - z_{i(1)}} & \text{при } z_{i(1)} \leq z \leq z_{i(2)}; \\ 1 & \text{при } z_{i(2)} \leq z \leq z_{i(3)}; \\ \frac{z - z_{i(4)}}{z_{i(3)} - z_{i(4)}} & \text{при } z_{i(3)} \leq z \leq z_{i(4)}. \end{cases}$$

Координаты  $z_{i(1)}, z_{i(2)}, z_{i(3)}, z_{i(4)}$  определяются по формулам:

$$z_{i(1)} = \min_j \{z_{ji-1}\}; \quad z_{i(2)} = \max_j \{z_{ji-1}\};$$

$$z_{i(3)} = \min_j \{z_{ji}\}; \quad z_{i(4)} = \max_j \{z_{ji}\}.$$

При этом должно соблюдаться условие последовательной упорядоченной вложенности носителей функции принадлежности на различных  $\alpha$ -уровнях

Таблица 1  
Исходные данные для границ слоев грунта строительной площадки по всем скважинам на одном строительном объекте

Скважина	Слой	ИГЭ	$z, м$
1	1	ИГЭ-1	0,3-1,8
	2	ИГЭ-2	1,8-2,8
	3	ИГЭ-3	2,8-6,3
	4	ИГЭ-4	6,3-9,3
2	1	ИГЭ-1	0,4-4,0
	2	ИГЭ-2	4,0-6,0
	3	ИГЭ-3	6,0-11,0
	4	ИГЭ-4	11,0-15,0
3	1	ИГЭ-1	0,4-3,0
	2	ИГЭ-2	3,0-4,5
	3	ИГЭ-3	4,5-9,3
	4	ИГЭ-4	9,3-12,6

Примечание. ИГЭ — инженерно-геологический элемент.

(показателях порядка):  $z_{i(1)} \leq z_{i(2)} \leq z_{i(3)} \leq z_{i(4)}$ . Если  $z_{i(2)} > z_{i(3)}$ , то  $z_{i(2)} = \min_j \{z_{ji}\}$ , а  $z_{i(3)} = \max_j \{z_{ji-1}\}$ .

По данным из табл. 1 в результате имитационного моделирования были получены следующие нечеткие значения для геометрических характеристик грунтовых напластований в виде трапецидальных функций принадлежности (рис. 3, а) с двумя значимыми  $\alpha$ -носителями ( $\alpha=0$  и  $\alpha=1$ ):

$$\tilde{z}_1 = [0,3; 4,0]_0 \cup [0,5; 1,8]_1 = (0,3; 0,5; 1,8; 4,0),$$

$$\tilde{z}_2 = [1,8; 6,0]_0 \cup [2,8; 4,0]_1 = (1,8; 2,8; 4,0; 6,0),$$

$$\tilde{z}_3 = [2,8; 11,0]_0 \cup [6,0; 6,3]_1 = (2,8; 6,0; 6,3; 11,0),$$

$$\tilde{z}_4 = [6,3; 15,0]_0 \cup [9,3; 11,0]_1 = (6,3; 9,3; 11,0; 15,0).$$

Расчетные границы определяются двумя способами.

Первый способ состоит в следующем. Для каждого проекта в расчет закладывается набор геометрических характеристик  $z_j$  для списка  $\bar{z}$  (расчетных границ),  $j=1, m+1$  (рис. 3, б). На рис. 3, б для всех  $j=2, m$ :  $z_j$  находится по формуле (1). При этом для  $j=1$ :  $z_1 = z_1^1$ ; для  $j=m+1$ :  $z_{m+1} = z_m^4$  определяются как абсциссы вершин трапецидальной функции принадлежности.

$$z = z_j = \frac{z_i^1 (z_{i-1}^3 - z_{i-1}^4) - z_{i-1}^4 (z_i^2 - z_i^1)}{z_{i-1}^3 - z_{i-1}^4 + z_i^1 - z_i^2}. \quad (1)$$

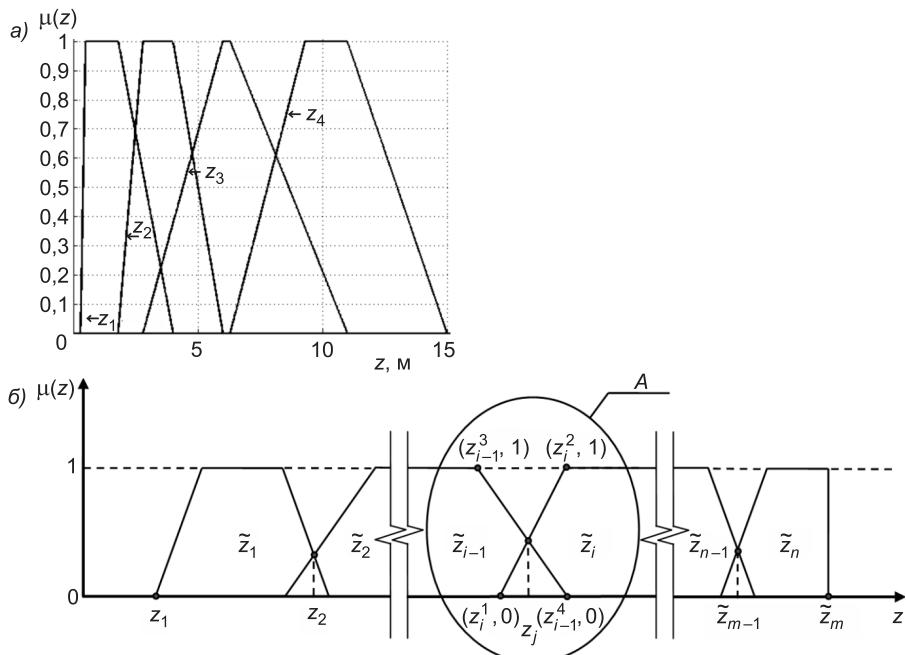


Рис. 3. Трапецидальные функции принадлежности четырех грунтовых напластований с нечеткими границами (а) и произвольный набор исходных характеристик, определяющих расчетные границы грунтовых напластований в детерминированной постановке и их геометрию (б)

Далее формируется список  $\bar{z}$  исходных величин, соответствующих границам грунтов, для расчетов в детерминированной постановке по всем найденным  $\tilde{z}_j$ ,  $j=1,5$ :  $\bar{z}=(0,300; 2,488; 4,769; 8,131; 15,000)$ .

Первое значение в списке соответствует начальной вершине первой функции принадлежности. Последнее назначается по последней вершине последней функции принадлежности. Промежуточные значения в списке соответствуют абсциссам точек пересечения боковых сторон трапецидальных функций принадлежности.

Алгебра нечетких чисел позволяет все классические алгоритмы реализовать в нечеткой постановке с применением нечетких операций<sup>2</sup>. При этом операции производятся уже с нечеткими данными, описанными выше. В табл. 2  $\tilde{\gamma}^{(j)} = \mu_{\tilde{\gamma}}^{(j)}(u) = (z_1; z_2; z_3)$ ,  $\tilde{E}^{(j)} = \mu_{\tilde{E}}^{(j)}(u) = (q_1; q_2; q_3)$ , где  $u \in U$ ,  $j=1, k$  ( $k$  — количество инженерно-геологических элементов), а  $\{z_i, q_i\} \in \mathbf{R}$  ( $i = \{1, 2, 3\}$ ). Параметры  $\tilde{\gamma}^{(j)}$ ,  $\tilde{E}^{(j)}$  представляют собой треугольные функции принадлежности, имеющие дополнительный формат в виде списка  $(R_1; R_2; R_3)$ . Список формируется по значениям показателей, полученным после статистической обработки:  $(\underline{x}; X_n; \bar{x}) = [\underline{x}; \bar{x}]_0 \cup [X_n; X_n]_1$ . Осуществляемая операция по данному описанию представляет собой фазификацию исходных данных (переход к нечетким величинам). В качестве носителя нечеткого множества выбирается доверительный интервал, соответствующий выбранному значению коэффициента вариации  $\kappa$  (рис. 4),  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение,  $X_n$  — выборочное среднее.

В детерминированных алгоритмах естественно использование величин, полученных из нечетких методом центра тяжести [3]. Например, для модуля деформаций имеем список  $\bar{E} = (12,4; 6,7; 4,7; 11,5)$ , полученный по дефазифицированным значениям модуля деформации из табл. 3.

Нечеткое число с треугольной функцией принадлежности по принятому алгоритму на основных  $\alpha$ -уровнях имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{X} &= [\underline{x}^{(0)}; \bar{x}^{(0)}]_0 \cup [x^{(1)}; \bar{x}^{(1)}]_1 = (X_n - \kappa\sigma; X_n; X_n + \kappa\sigma) = \\ &= [X_n - \kappa\sigma; X_n + \kappa\sigma]_0 \cup [X_n; X_n]_1. \end{aligned} \quad (2)$$

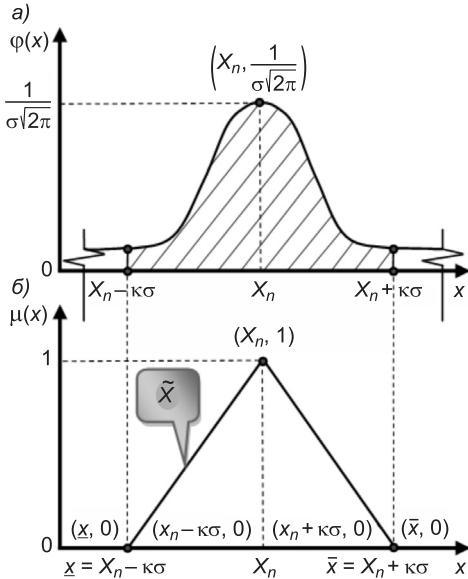


Рис. 4. Кривая нормального распределения случайной величины — показателя физико-механических свойств грунтов (а) и треугольная функция принадлежности нечеткой величины с носителем, равным доверительному интервалу (б)

<sup>2</sup> Ибрагимов В.А. Элементы нечеткой математики. Баку: М-во образования Азерб. Респ.; Азерб. гос. нефт. акад., 2010. 394 с.

Таблица 2

Исходные данные для инженерно-геологических элементов на строительной площадке							ИГЭ-1			ИГЭ-2		
Показатель	ИГЭ-1			ИГЭ-2			ИГЭ-3			ИГЭ-4		
Статистический	$X_n^{(1)}$	$S^{(1)}$	$V^{(1)}$	$X_n^{(2)}$	$S^{(2)}$	$V^{(2)}$	$X_n^{(3)}$	$S^{(3)}$	$V^{(3)}$	$X_n^{(4)}$	$S^{(4)}$	$V^{(4)}$
Удельный вес грунта $\gamma$ , Н/м <sup>3</sup>	19600	600	0,03	18900	500	0,03	19100	300	0,03	20000	700	0,03
Модуль деформации $E$ , МПа	12,4	3,43	0,28	6,7	2,07	0,31	3	1,71	0,36	11,5	3,61	0,32

Примечание. Коэффициент вариации  $\kappa = 1,64$ .

Фазифицированные исходные данные с применением назначенней треугольной функции принадлежности  
для инженерно-геологических элементов на строительной площадке

Показатель	ИГЭ-1	ИГЭ-2	ИГЭ-3	ИГЭ-4
Удельный вес грунта $\gamma$ , Н/м <sup>3</sup>	(18616; 19600; 20584)	(18080; 18900; 19720)	(18608; 19100; 19592)	(18852; 20000; 21148)
Модуль деформации $E$ , МПа	(6,77; 12,40; 18,02)	(3,30; 6,70; 10,09)	(1,89; 4,70; 7,50)	(5,57; 11,50; 17,42)

Расчетные границы слоев по второму способу формируются по соответствующим вершинам функций принадлежности на нулевом  $\alpha$ -уровне, из набора нечетких значений величин  $\tilde{z}_i^R$ ,  $i=1,2m-1$ , по изложенному ниже алгоритму.

Исходя из свойства вложенности  $\alpha$ -носителей (интервалов) с соответствующими границами для произвольного нечеткого числа  $\tilde{F}$ , определим двухместный функциональный предикат  $P(layer, position)$ , который возвращает значение определенной границы  $\tilde{F}$  на заданном  $\alpha$ -уровне, где  $position = \{left \equiv L, right \equiv R\}$ ,  $layer \in [0; 1]$ .

Ниже приведены этапы алгоритма формирования нечетких значений величин  $\tilde{z}_i^R$  и  $\tilde{E}_i^R$ ,  $i=1,2m-1$ , представленного на рис. 5, в зависимости от фактического состояния слоев, когда их число больше 1:

*Шаг 1.* Задаются значения для 1-го фиктивного слоя:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1^R &= \tilde{E}_1; \\ \tilde{z}_1^t &= [\tilde{z}_1.P(0, L); \tilde{z}_1.P(1, L)]_0 \cup \\ &\cup [\tilde{z}_1.P(1, L); \\ &\tilde{z}_1.P(1, L)]_1; \\ z_1^l &= \tilde{z}_1^t.P(0, R) - \tilde{z}_1^t.P(0, L); \\ z_1^{IC} &= \tilde{z}_1^t.P(0, R) - \tilde{z}_1^t.Center(); \\ \tilde{z}_1^R &= [\tilde{z}_1^t.Center(); \tilde{z}_1^t.P(0, R)]_0 \cup \\ &\cup [\tilde{z}_1^t.P(1, L); \\ &\tilde{z}_1^t.P(1, R)]_1. \end{aligned}$$

*Шаг 2.* Для следующего, реального, слоя имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_2^R &= \tilde{E}_1; \\ \tilde{z}_2^R &= [\tilde{z}_1.P(1, L); \tilde{z}_1.P(1, R)]_0 \cup \\ &\cup [\tilde{z}_1.P(1, L); \\ &\tilde{z}_1.P(1, R)]_1. \end{aligned}$$

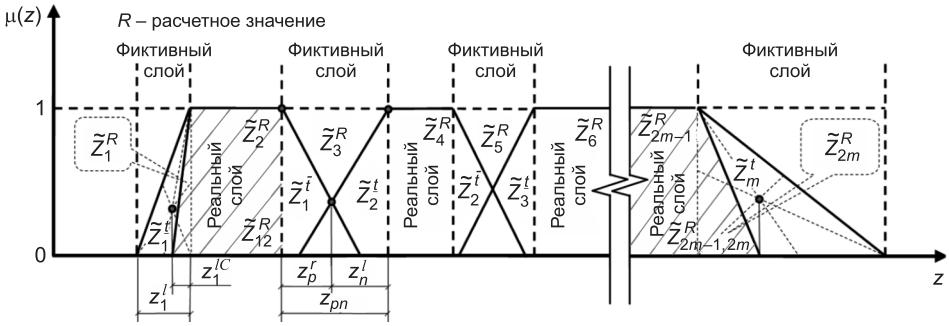


Рис. 5. Визуализация результата введения фиктивных слоев и выделения реальных слоев (формирование нечетких расчетных значений)

Объединяются 1-й и 2-й расчетные слои с одинаковым модулем деформации:

$$\tilde{E}_{12}^R = \tilde{E}_1^R \cup \tilde{E}_2^R = \tilde{E}_1; \quad \tilde{z}_{12}^R = \tilde{z}_1^R \cup \tilde{z}_2^R = [\tilde{z}_1^t.Center(); \tilde{z}_1.P(1,R)]_0 \cup [\tilde{z}_1.P(1,L); \tilde{z}_1.P(1,R)]_1.$$

*Шаг 3.* Выполняется операция взвешенного осреднения для индексированных расчетных слоев с порядковыми номерами  $j=3,2m-1$ . Для этого вводится функция  $VO(\tilde{z}_p, \tilde{z}_n, \tilde{E}_p, \tilde{E}_n)$ :

$$z_p^r = I(\tilde{z}_p, \tilde{z}_n) - \tilde{z}_p.P(1,R); \quad z_n^l = \tilde{z}_n.P(1,L) - I(\tilde{z}_p, \tilde{z}_n);$$

$$z_{pn} = \tilde{z}_n.P(1,L) - \tilde{z}_p.P(1,R) = z_p^r + z_n^l;$$

$$\tilde{z}_{VO}^R = [\tilde{z}_p.P(1,R); \tilde{z}_n.P(1,L)]_0 \cup [\tilde{z}_p.P(1,R); \tilde{z}_n.P(1,L)]_1;$$

$$\tilde{E}_{VO}^R = \tilde{E}_p \left[ \left[ \frac{z_p^r}{z_{pn}}, \frac{z_p^r}{z_{pn}} \right]_0 \cup \left[ \frac{z_p^r}{z_{pn}}, \frac{z_p^r}{z_{pn}} \right]_1 \right] + \tilde{E}_n \left[ \left[ \frac{z_n^l}{z_{pn}}, \frac{z_n^l}{z_{pn}} \right]_0 \cup \left[ \frac{z_n^l}{z_{pn}}, \frac{z_n^l}{z_{pn}} \right]_1 \right].$$

$$\text{Здесь } I(\tilde{z}_p, \tilde{z}_n) = \frac{\tilde{z}_n.P(0,L)(\tilde{z}_p.P(1,R) - \tilde{z}_p.P(0,R))}{\tilde{z}_p.P(1,R) - \tilde{z}_p.P(0,R) + \tilde{z}_n.P(0,L) - \tilde{z}_n.P(1,L)} -$$

$$-\frac{\tilde{z}_p.P(0,R)(\tilde{z}_n.P(1,L) - \tilde{z}_n.P(0,L))}{\tilde{z}_p.P(1,R) - \tilde{z}_p.P(0,R) + \tilde{z}_n.P(0,L) - \tilde{z}_n.P(1,L)}.$$

Для всех  $i=\overline{1,m-2}$ :

$$\tilde{z}_{2i+1}^R = VO(\tilde{z}_i, \tilde{z}_{i+1}, \tilde{E}_i, \tilde{E}_{i+1}).\tilde{z}_{VO}^R;$$

$$\tilde{E}_{2i+1}^R = VO(\tilde{z}_i, \tilde{z}_{i+1}, \tilde{E}_i, \tilde{E}_{i+1}).\tilde{E}_{VO}^R;$$

$$\tilde{z}_{2i+2}^R = [\tilde{z}_{i+1}.P(1,L); \tilde{z}_{i+1}.P(1,R)]_0 \cup [\tilde{z}_{i+1}.P(1,L); \tilde{z}_{i+1}.P(1,R)]_1;$$

$$\tilde{E}_{2i+2} = \tilde{E}_{i+1};$$

$$\tilde{z}_{2m-1}^R = VO(\tilde{z}_{m-1}, \tilde{z}_m, \tilde{E}_{m-1}, \tilde{E}_m).\tilde{z}_{VO}^R;$$

$$\tilde{E}_{2m-1}^R = VO(\tilde{z}_{m-1}, \tilde{z}_m, \tilde{E}_{m-1}, \tilde{E}_m).\tilde{E}_{VO}^R.$$

*Шаг 4.* Заключительный этап состоит в формировании нечетких величин  $\tilde{z}_{2m-1,2m}^R$  и  $\tilde{E}_{2m-1,2m}^R$ .

$$\begin{aligned}\tilde{z}_m^{\bar{t}} &= [\tilde{z}_m \cdot P(1, R); \tilde{z}_m \cdot P(0, R)]_0 \bigcup [\tilde{z}_m \cdot P(1, R); \tilde{z}_m \cdot P(1, R)]_1; \\ \tilde{z}_{2m}^R &= [\tilde{z}_m \cdot P(1, R); \tilde{z}_m^{\bar{t}} \cdot Center()]_0 \bigcup [\tilde{z}_m \cdot P(1, R); \tilde{z}_m \cdot P(1, R)]_1; \\ \tilde{z}_{2m-1,2m}^R &= \tilde{z}_{2m-1}^R \bigcup \tilde{z}_{2m}^R = \\ &= [\tilde{z}_m \cdot P(1, L); \tilde{z}_m^{\bar{t}} \cdot Center()]_0 \bigcup [\tilde{z}_m \cdot P(1, L); \tilde{z}_m \cdot P(1, L)]_1; \\ \tilde{E}_{2m-1,2m}^R &= \tilde{E}_{2m-1}^R \bigcup \tilde{E}_{2m}^R = \tilde{E}_{2m-1}^R = \tilde{E}_{2m}^R = \tilde{E}_m.\end{aligned}$$

В качестве примера расчета осадки сооружения выберем конкретный строительный объект со следующими данными: вес здания  $Q = 10,0$  МН; длина здания  $l = 20,0$  м; ширина здания  $b = 12,0$  м; площадь подошвы фундамента  $F = 240,0$  м<sup>2</sup>; среднее давление на фундамент  $P = 0,042$  МПа; глубина заложения фундамента от уровня поверхности природного рельефа  $d_n = 1,0$  м; удельный вес грунта, расположенного выше подошвы фундамента ( $\gamma'$ ):  $X_n = 19600,0$  Н/м<sup>3</sup>,  $\sigma = 600$  Н/м<sup>3</sup>,  $\kappa = 1,64$ . Исходные данные для границ слоев грунта строительной площадки по всем скважинам на строительном объекте представлены в табл. 1, для инженерно-геологических элементов на строительной площадке — в табл. 2.

**Расчет осадки в нечеткой постановке.** Деформативность системы «основание — фундамент» характеризуется величиной осадки ( $s$ ). Среднее давление на фундамент определяется формулой:

$$p = \frac{Q}{F},$$

где  $Q$  — вес здания,  $F$  — площадь подошвы фундамента.

Если среднее давление не превышает несущей способности верхнего слоя основания, то в качестве фундамента используется сплошная плита. При этом осадка  $s$  определяется методом послойного суммирования по формуле [1]:

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{\sigma_{zp}(z)}{E_i} dz, \quad (3)$$

где  $z_i$  — нижняя граница  $i$ -го слоя грунта,  $\beta = 0,8$ , или с использованием безразмерной координаты  $\zeta = \frac{2z}{b}$ :

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \int_{\zeta_{i-1}}^{\zeta_i} \frac{\sigma_{zp}(\zeta)}{E_i} d\zeta. \quad (4)$$

$z_n = H_c$  — координата нижней границы так называемой сжимаемой толщи.

Распределение вертикальных нормальных напряжений, возникающих при действии дополнительного давления, рассчитывается по формуле [5]:

$$\sigma_{zp} = \frac{2p_0}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{\eta}{\zeta \sqrt{1+\zeta^2 + \eta^2}} + \frac{\zeta \eta}{(\zeta^2 + \eta^2)(1+\zeta^2) \sqrt{1+\zeta^2 + \eta^2}} \right], \quad (5)$$

где  $l$ ,  $b$  — длина и ширина прямоугольного фундамента в плане;  
 $p_0 = p - \sigma_{zg,0}$  — дополнительное вертикальное давление на основание;  
 $p$  — среднее давление под подошвой фундамента;  
 $\sigma_{zg,0}$  — вертикальное напряжение от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента;

$$\eta = \frac{l}{b}; \quad \zeta = \frac{2\zeta}{b}.$$

В данной работе реализованы два алгоритма расчета осадки сооружения: как детерминированной и как нечеткой величины. Алгоритмы представлены блок-схемами (рис. 6 и 7).

В пределах строительной площадки границы между слоями грунтов устанавливаются по результатам разведочного бурения с высокой степенью неопределенности. Поэтому используется нечеткое представление межслойных границ (см. рис. 3, а, б). Для определения интервалов интегрирования в формуле (3) вводятся фиктивные слои и выделяются реальные слои (см. рис. 5). По формулам (4), (5) с применением исходных фазифицированных данных по модулям деформаций устанавливается осадка.

Значение осадки как нечеткой величины определяется по следующему алгоритму:

*Шаг 1.* Находится нормирующий множитель для всех  $i = \overline{1, n}$ :

$$\bar{E} = E_{\max} = \max(\underline{E}_i^{(0)}, \bar{E}_i^{(0)}, \underline{E}_i^{(1)}, \bar{E}_i^{(1)}).$$

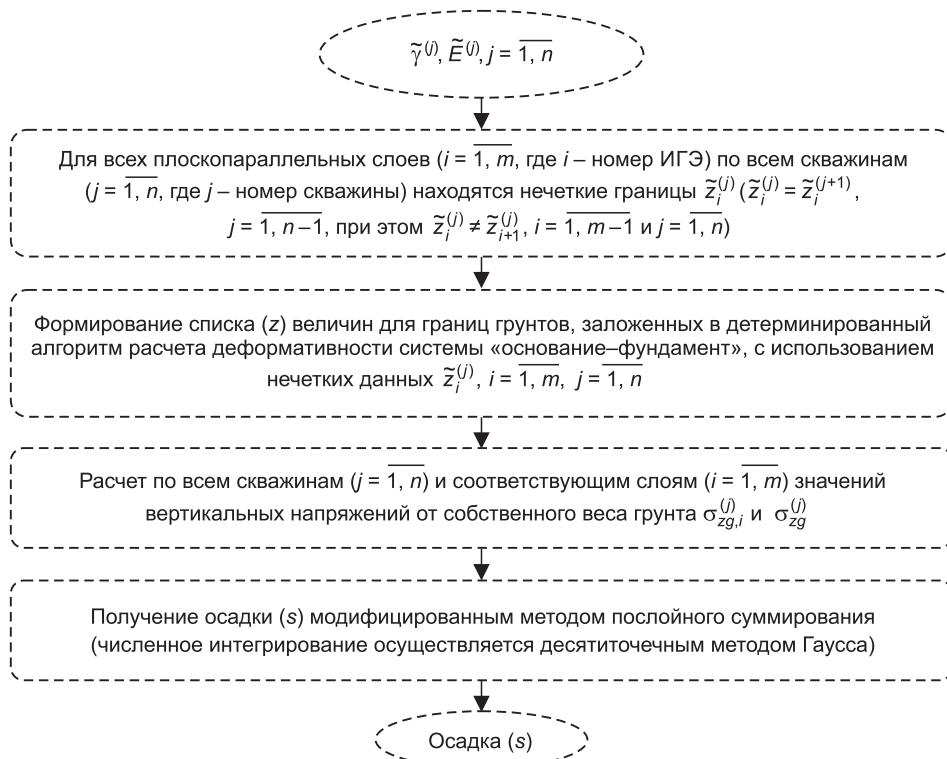


Рис. 6. Блок-схема детерминированного алгоритма расчета осадки ( $s$ )

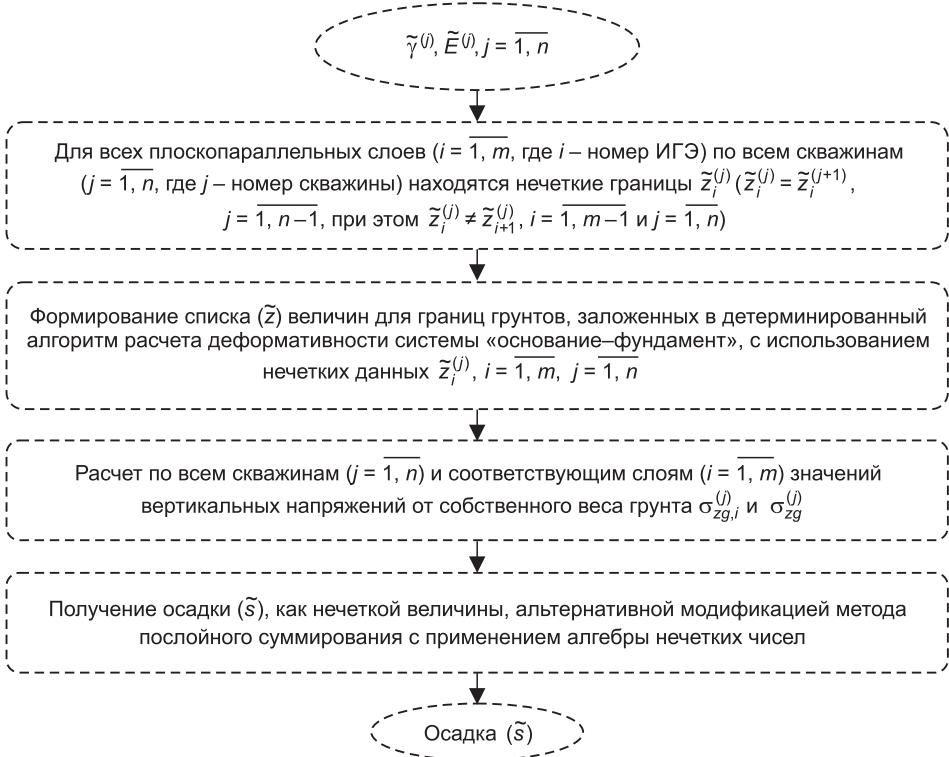


Рис. 7. Блок-схема алгоритма расчета осадки ( $\tilde{s}$ ) как нечеткой величины с применением алгебры нечетких чисел

*Шаг 2.* Задается начальное значение для алгоритма расчета осадки ( $\tilde{s}$ ) как нечеткой величины в виде синглтонной функции принадлежности:

$$\tilde{s}^{(0)} = \tilde{0} = [0,0; 0,0]_0 \cup [0,0; 0,0]_1.$$

*Шаг 3.* Рассчитывается значение осадки ( $\tilde{s}$ ) для всех слоев  $i = \overline{1, n}$ :

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha} &= \left[ \int_{z_{i-1}}^{z_i} \sigma_{zp}(z) dz; \int_{z_{i-1}}^{z_i} \sigma_{zp}(z) dz \right]_0 \cup \left[ \int_{z_{i-1}}^{z_i} \sigma_{zp}(z) dz; \int_{z_{i-1}}^{z_i} \sigma_{zp}(z) dz \right]_1; \\ \tilde{s}^{(i)} &= \tilde{s}^{(i-1)} + \left( \frac{\tilde{1}}{\tilde{E}} - \frac{\tilde{1}}{\tilde{E}_i \cdot \frac{\tilde{1}}{\tilde{E}}} \right) \tilde{\alpha}. \\ \tilde{s} &= \tilde{\beta} \tilde{s}^{(n)}. \end{aligned}$$

На рис. 9 показаны расчетные функции принадлежности осадки здания, полученные по двум способам определения расчетных границ, описанным выше.

Операция взвешенного осреднения дает результирующие функции принадлежности модулей деформации для фиктивных слоев, ограниченных реальными слоями (рис. 8). Происходит смещение их носителей и моды в сторону функции принадлежности реального слоя с наибольшим весом, при этом моды и границы носителей всегда находятся между сравниваемыми слоями.

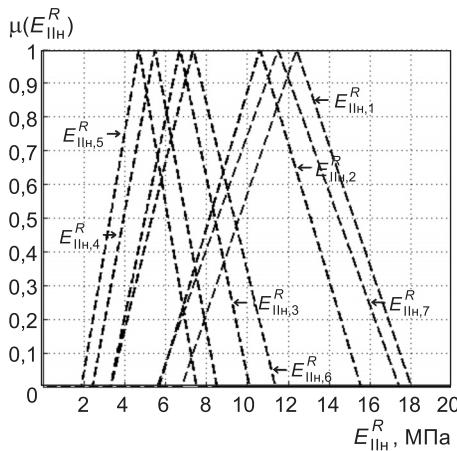


Рис. 8. Кортеж функций принадлежности для нечеткой величины  $\tilde{E}_{IIIH}^R$ , полученный с использованием взвешенного осреднения по назначеннной функции принадлежности с выделением реальных и введением фиктивных слоев

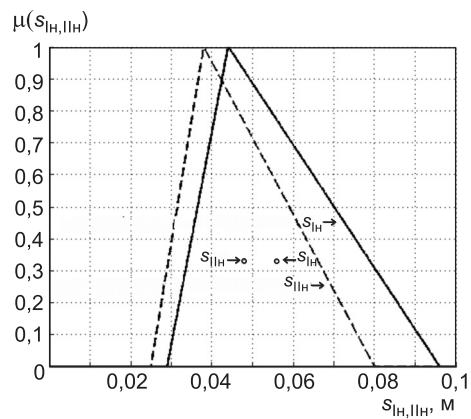


Рис. 9. Нечеткие величины осадок ( $\tilde{s}_{IIIH}$ ,  $\tilde{s}_{IIH}$ ) и их дефазифицированные значения ( $s_{IIIH}$ ,  $s_{IIH}$ )

ниваемыми функциями принадлежности реальных слоев. Отображенное описание физически адекватно.

Функция принадлежности для рассчитанной нечеткой величины осадки  $\tilde{s}_{IIIH}$  (табл. 4), полученная по назначеннной функции принадлежности, имеет моду, совпадающую со значением по детерминированному расчету (табл. 5). Нечеткая величина осадки  $\tilde{s}_{IIH}$ , полученная по назна-

Таблица 4  
Округленные данные с применением назначеннной треугольной функции принадлежности, полученные по нечеткому алгоритму

ИГЭ	$\tilde{s}_{IIIH}^{(i)}$ , м	$\tilde{s}_{IIIH}$ , м	$s_{IIIH}$ , м
ИГЭ-1	(0,0050; 0,0073; 0,0133)	(0,0285; 0,0439; 0,0963)	0,05621778
ИГЭ-2	(0,0137; 0,0204; 0,0399)		
ИГЭ-3	(0,0278; 0,0430; 0,0958)		
ИГЭ-4	(0,0357; 0,0548; 0,1203)		

Таблица 5  
Данные по скважинам, полученные по детерминированному алгоритму

Скважина	Слой	ИГЭ	$\sigma_{zg(i)}$ , Па	$\sigma_{zg}$ , Па	$s$ , м
1	1	ИГЭ-1	49000,0	194750,0	$0,0438611 \approx 0,0439$
	2	ИГЭ-2	18900,0		
	3	ИГЭ-3	66850,0		
	4	ИГЭ-4	60000,0		
2	1	ИГЭ-1	88200,0	301500,0	$0,0438611 \approx 0,0439$
	2	ИГЭ-2	37800,0		
	3	ИГЭ-3	95500,0		
	4	ИГЭ-4	80000,0		
3	1	ИГЭ-1	70560,0	256590,0	
	2	ИГЭ-2	28350,0		
	3	ИГЭ-3	91680,0		
	4	ИГЭ-4	66000,0		

**Таблица 6**  
**Округленные данные с применением назначенной треугольной функции принадлежности и введением фиктивных слоев, полученные по нечеткому алгоритму**

ИГЭ	$\tilde{z}_{\text{I}_{\text{II}}}^R$ , м	$\tilde{E}_{\text{I}_{\text{II}}}^R$ , МПа	$\tilde{s}_{\text{I}_{\text{II}}}^{(i)}$ , м	$\tilde{s}_{\text{I}_{\text{II}}}$ , м	$s_{\text{I}_{\text{II}}}$ , м
ИГЭ-1	(0,4334; 0,5000; 1,8000; 1,8000)	(6,7748; 12,400; 18,025)	(0,0032; 0,0046; 0,0084)		
ИГЭ-2	(1,8000; 1,8000; 2,8000; 2,8000)	(5,6906; 10,619; 15,547)	(0,0058; 0,0084; 0,0155)		
ИГЭ-3	(2,8000; 2,8000; 4,0000; 4,0000)	(3,3052; 6,7000; 10,095)	(0,0104; 0,0154; 0,0297)		
ИГЭ-4	(4,0000; 4,0000; 6,0000; 6,0000)	(2,4378; 5,4692; 8,5007)	(0,0187; 0,0283; 0,0587)		
ИГЭ-5	(6,0000; 6,0000; 6,3000; 6,3000)	(1,8956; 4,7000; 7,5044)	(0,0200; 0,0304; 0,0638)		
ИГЭ-6	(6,3000; 6,3000; 9,3000; 9,3000)	(3,3309; 7,3494; 11,368)	(0,0274; 0,0418; 0,0890)		
ИГЭ-7	(9,3000; 9,3000; 11,000; 12,333)	(5,5796; 11,500; 17,420)	(0,0311; 0,0474; 0,1005)		

ченной функции принадлежности с выделением реальных и введением фиктивных слоев, имеет смещенную влево моду и более широкий носитель (рис. 9, табл. 6). Дефазифицированное значение  $\tilde{s}_{\text{I}_{\text{II}}}$  (см. табл. 4) меньше  $\tilde{s}_{\text{I}_{\text{II}}}$  (см. табл. 6), т.е. оценка осадки здания меньше в случае введения фиктивных слоев. С помощью введения фиктивных слоев и выделения реальных снижается неопределенность и смещаются значения для моды и носителей у функций принадлежности, т.е. сформировано мнемоническое правило для управления степенью неопределенности решения задачи и получения пороговых уровней детализации расчетных схем.

**Заключение.** Проблема неполноты и неопределенности решена благодаря описанию исходных данных с позиций теории нечетких множеств и нечеткой логики. Стандартная детерминированная постановка заменена новым подходом: с помощью функций принадлежности заданы нечеткие физико-механические характеристики и сложная геометрия слоев. Применение алгебры нечетких чисел позволило получить решение задачи об определении осадки здания в нечеткой постановке. Предлагаемый подход позволяет учесть все возможные сочетания исходных данных, обладающих высокой степенью неопределенности.

Выполнено компьютерное моделирование. Получены оценки осадки как нечеткой величины и ее дефазифицированные значения. Расхождение дефазифицированных значений для двух вариантов задания расчетных границ составляет около 15 %. Визуализация показала, что реалистичность оценок достигается за счет присутствия явной связи с физически адекватным состоянием реальных слоев и границ между слоями. Основное преимущество предлагаемого подхода состоит в том, что эти оценки позволяют назначать коэффициенты запаса после расчета, в котором учтена неопределенность исходных данных.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адищев, В.В. Проектирование экспертной системы оценки эксплуатационной пригодности зданий и сооружений [Текст] / В.В. Адищев, Д.Е. Пальчунов, Д.С. Шмаков // Вестн. НГУ. Сер. : Информ. технологии. — 2009. — Июль. — С. 175–187.
2. Адищев, В.В. Применение кластерного анализа для построения нечетких аппроксимаций диаграмм деформирования бетона [Текст] / В.В. Адищев, Д.С. Шмаков // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 4. — С. 60–70.
3. Штова, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С.Д. Штова. — М. : Горячая Линия — Телеком, 2007. — 288 с.
4. Сорочан, Е.А. Справочник проектировщика : Основания, фундаменты и подземные сооружения [Текст] / Е.А. Сорочан. — М. : Стройиздат, 1985. — 480 с.

*АДИЩЕВ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ШМАКОВ Дмитрий Сергеевич, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*ШМАКОВ Евгений Сергеевич, студ.*

*Новосибирский государственный университет*

Получено после доработки 01.03.13

**Adishchev Vladimir Vasilievich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Shmakov Dmitriy Sergeevich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Shmakov Eugene Sergeevich**, student, Novosibirsk State University (NSU), Russia

## THE ESTIMATION OF SETTLEMENT ON EARTH FOUNDATION IN THE UNFORMALIZED DEFINITION

The new approach to a problem solving of determination of settlement of structure on earth foundation in fuzzy statement of problems has been demonstrated. The approach allows you to solve the problems associated with a significant degree of uncertainty and incompleteness of the source data. To describe not quite certain physical-mechanical properties of grounds and the boundaries between the layers has been used a new mathematical tool. The algorithm of the estimation of settlement like fuzzy values has been realized. The findings show the advantages of the new approach over the traditional deterministic approach to the solution of the problem as the assurance coefficient can be assigned after the calculation.

**Key words:** uncertainty, incompleteness, membership function, fuzzy values, settlement of structure, earth foundation.

## REFERENCES

1. Adishchev, V.V. Designing of expert system of an estimation of operational suitability of building designs and constructions [Text] / V.V. Adishchev, D.E. Pal'chunov, D.S. Shmakov // Herald NSU. — 2009. — P. 175–187.
2. Adishchev, V.V. Application of cluster analysis for construction of fuzzy approximations of the deformation curves of concrete [Text] / V.V. Adishchev, D.S. Shmakov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 4. — P. 60–70.
3. Shtova, S.D. Designing of fuzzy systems by means of MATLAB [Text] / S.D. Shtova. — M. : Hot line — Telecom, 2007. — 288 p.
4. Sorochan, E.A. Reference book of designer : Foundation beds, bases and underground structures [Text] / E.A. Sorochan. — M. : Stroyizdat, 1985. — 480 p.

## **СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

**УДК 691.225**

**В.П. СЕЛЯЕВ, В.А. НЕВЕРОВ, Л.И. КУПРИЯШКИНА**

### **ФРАКТАЛЬНОСТЬ НАНОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИРОДНЫХ ДИАТОМИТОВ**

Проведены исследования наноразмерной структуры природных диатомитов и строения дисперсных частиц и их порового пространства для создания высокоэффективных теплоизоляционных материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков.

**Ключевые слова:** природные диатомиты, низкая теплопроводность, метод малоуглового рентгеновского рассеяния, поры, массовые фракталы, фрактальные поверхности.

В современном строительстве весьма актуальной задачей является создание высокоэффективных теплоизоляционных материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков, в состав которых входят частицы нанометрового размера с развитой поровой структурой и значительной удельной поверхностью. Перенос тепла в таких системах осуществляется через контакт частиц материала между собой, конвекцией газа в порах и излучением. Большую роль в формировании так называемой структуры в структуре [1] дисперсных порошков играют процессы самоорганизации, что в конечном итоге приводит к образованию многоуровневой поровой системы, способствующей понижению кондуктивной и лучистой составляющих эффективной теплопроводности за счет рассеяния фононов на границах пора — твердое тело, а также отражения и преломления электромагнитных волн на структурных неоднородностях.

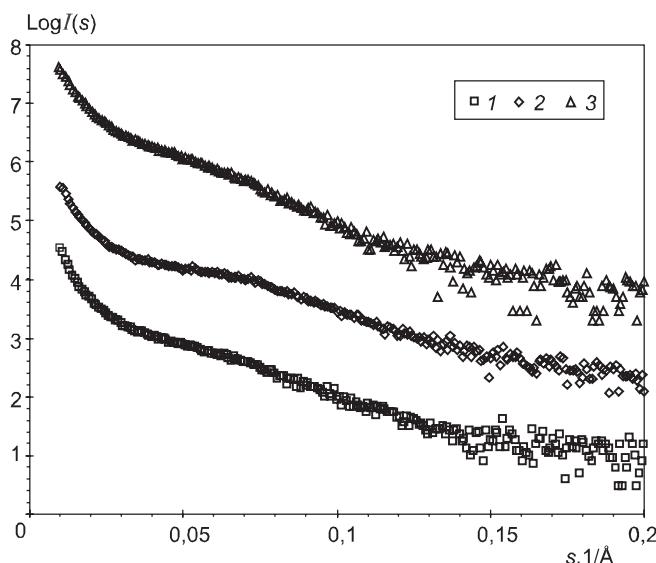
Природный диатомит — один из функциональных теплоизоляционных материалов с уникальными свойствами. Он представляет собой окаменелые остатки древних диатомовых водорослей, состоящих преимущественно из аморфного опалового кремнезема. Высокая разноуровневая пористость этой породы, в основном, и определяет ее теплоизоляционные характеристики. Обожженная диатомитовая крошка используется в жилищном строительстве, при производстве жароупорных бетонов и сухих смесей для «теплых» кладочных растворов, для тепловой изоляции различного оборудования при температурах до 900 °C. С учетом того, что поровая структура нанометрового уровня частиц диатомита уже сформирована в природных условиях, этот нанопористый материал можно считать перспективным наполнителем современных вакуумных изоляционных панелей.

Для научно обоснованного подхода проектирования порошковой изоляции и понимания процессов передачи тепла в сложных зернистых структурах необходима информация об особенностях строения дисперсных частиц и их порового пространства на наномасштабном уровне. Большой объем информации о распределении частиц или пор по разме-

рам, их линейным характеристикам и фрактальным размерностям кластеров и поверхностям раздела структурных неоднородностей можно получить, используя метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР), широко применяемый для изучения наносистем.

В качестве объектов исследования были выбраны природные диатомиты Атемарского (Республика Мордовия), Никольского (Пензенская область) и Инзенского (Ульяновская область) месторождений. Измерение интенсивностей МУРР проводилось на дифрактометре Несис S3-MICRO с использованием отфильтрованного  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения. В качестве координаты рассеяния принято значение модуля вектора рассеяния  $s = 4\pi \sin\theta / \lambda$  ( $2\theta$  — угол рассеяния,  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$  — длина волны рентгеновского излучения). Интенсивности рассеяния регистрировались в диапазоне значений  $s$  от 0,0094 до  $0,40 \text{ \AA}^{-1}$  в режиме сквозного прохождения первичного пучка. На рис. 1 показаны фрагменты кривых МУРР в полулогарифмических координатах для всех трех порошков. На кривых можно выделить участок достаточно быстрого спада  $I(s)$  при малых значениях модуля волнового вектора  $s < 0,03 \text{ \AA}^{-1}$ . Далее следует область заметно более медленного спада кривой рассеяния («плечо») на зависимости  $I(s)$ ) до  $s \sim 0,08 \text{ \AA}^{-1}$ , а затем наблюдается протяженный участок плавного спада интенсивности рассеяния рентгеновских лучей при значениях  $s > 0,08 \text{ \AA}^{-1}$ . Такой характер индикаторов рассеяния  $I(s)$  может свидетельствовать о наличии в исследуемых материалах частиц (пор) разных линейных размеров. Вклад в рассеяние при больших  $s$  дают мелкомасштабные неоднородности, а при малых значениях модуля волнового вектора  $s$  — крупномасштабные. Высокие значения интенсивности рассеяния обусловлены резким контрастом, который вызван большой разницей между плотностью диоксида кремния и порами [2].

Для определения радиусов инерции рассеивающих неоднородностей кривые МУРР были перестроены в координатах  $\log I(s) - s^2$ , анализ которых показал, что в области малых  $s$  не обнаруживается прямолинейный участок указанной зависимости, что характерно для полидисперсных рас-



*Rис. 1.* Экспериментальные кривые  $\log I(s) - s$  диатомитов месторождений:

1 — Атемарского; 2 — Никольского; 3 — Инзенского

сеивающих систем. В таком случае появляется возможность воспользоваться методом Гинье [3], в котором размер рассеивающих частиц характеризуется универсальным параметром — радиусом инерции  $R_g$ . При малых значениях модуля волнового вектора  $s$ , т.е. при  $sR_g \gg 1$ , интенсивность рассеяния представляется как

$$I(s) = I(0)\exp(-sR_g^2/3).$$

Для построения приближенной зависимости относительной доли рассеивающих неоднородностей от их линейных размеров можно применить прием, который предложил А.И. Китайгородский [2]: кривая МУРР в координатах  $(\log I(s) - s^2)$  разбивается на малые интервалы в шкале  $s^2$ . На ней выделяется прямолинейный участок или проводится касательная к этой части кривой. Угол наклона прямой дает радиус инерции  $R_{gk}$ , а отрезок отсекаемый прямой от оси  $\log I(s)$  значение  $I_k(0)$ , определяющее вклад пор данного размера в интенсивность рассеяния. Долю объема пор  $k$ -го размера можно оценить по формуле

$$v_k \sim I_k(0)/(R_{gk})^3.$$

Зная электронный радиус инерции рассеивающей неоднородности, в данном случае поры, можно установить ее радиус (в случае однородной сферы), так как  $3R^2 = 5R_g^2$ , а следовательно, и ее диаметр  $d = 2R_g(5/3)^{1/2}$ . Построенные таким образом зависимости  $v(d)$ - $d$  представлены на рис. 2. Степень неоднородности размеров пор можно характеризовать величиной дисперсии функции распределения  $\Delta d$ , определяемой по полуширине соответствующего максимума распределения. Среднее значение линейных размеров неоднородностей оценено по формуле

$$\langle d \rangle = \sum d_k v_k / \sum v_k.$$

Анализ построенных зависимостей показывает, что функция распределения рассеивающих неоднородностей по размерам диатомита Атемарского месторождения (кривая 1) имеет два четко выраженных максимума, соответствующих значениям  $d_1 \sim 1,3$  нм и  $d_2 \sim 10,3$  нм, причем первый из них, достаточно острый, с дисперсией значений размеров пор  $\sim 1,6$  нм, второй, более размытый, характеризует разброс их линейных размеров  $\sim 6,7$  нм. Отметим, что подавляющая часть рассеивающих объектов диатомита Атемарского месторождения имеет линейные размеры

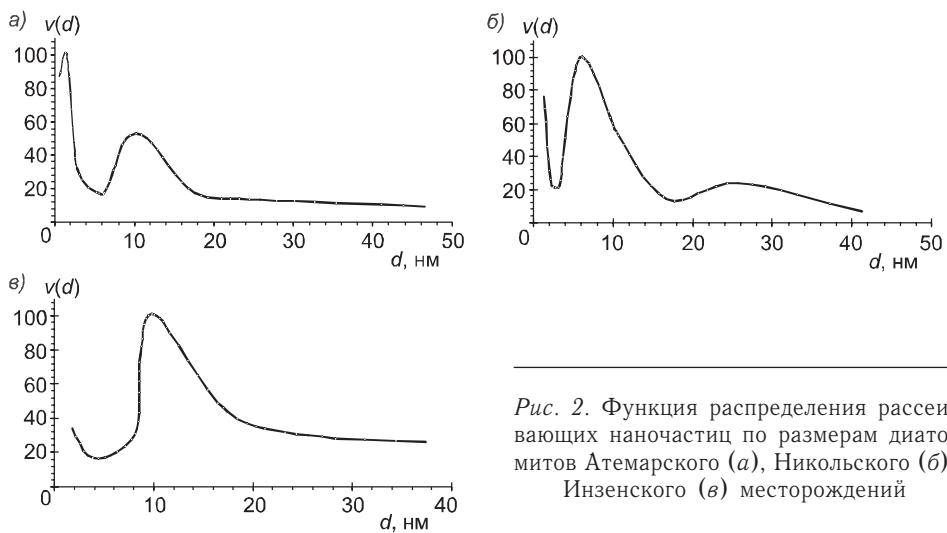


Рис. 2. Функция распределения рассеивающих наночастиц по размерам диатомитов Атемарского (а), Никольского (б), Инзенского (в) месторождений

менее 20 нм. Рассчитанное значение их средних размеров составляет ~6,7 нм.

Бимодальный характер распределения рассеивающих образований по размерам наблюдается и в диатомите Никольского месторождения (крайняя 2). Первый, хорошо выраженный максимум, соответствует значению  $d_1 \sim 6,1$  нм. Максимум асимметричен с пологим склоном в области больших значений линейных размеров неоднородностей и дисперсией  $\Delta d \sim 6,0$  нм. Второй, слабо выраженный и сильно размытый максимум, наблюдается для значений  $d_2 \sim 25,0$  нм при  $\Delta d \sim 12,6$  нм. Среднее значение линейных размеров неоднородностей этого диатомита составляет ~7,8 нм.

Функция распределения числа частиц по размерам диатомита Инзенского месторождения имеет один широкий несимметричный максимум при значении  $d \sim 9,9$  нм, а разброс линейных размеров, участвующих в рассеянии рентгеновских лучей неоднородностей (дисперсия)  $\Delta d$ , составляет ~6,7 нм. Среднее значение  $\langle d \rangle \sim 10,0$  нм. Параметры функций распределения по размерам пор исследуемых диатомитов сведены в табл. 1. В целом, все диатомиты имеют в своем составе рассеивающие образования (поры), размеры которых, в основном, менее 20 нм, а в диатомитах Атемарского и Никольского месторождений наблюдается и заметная часть с масштабом менее 5 нм.

Таблица 1  
Параметры функций распределения по размерам пор диатомитов, нм

Диатомит	$d_1$	$\Delta d_1$	$d_2$	$\Delta d_2$	$\langle d \rangle$
Атемарский	1,3	1,6	10,3	6,7	6,7
Никольский	6,1	6,0	25,0	12,6	7,8
Инзенский	9,9	6,7			10,0

Полученные результаты согласуются с литературными данными. Предложена оболочечная модель строения частиц диоксида кремния, согласно которой ядро частицы сложено из первичных частиц  $\text{SiO}_2$  диаметром 5–10 нм. Ядро окружено несколькими слоями вторичных частиц диоксида кремния диаметром ~20–40 нм, покрытыми слоями первичных частиц. Если считать первичные частицы шарами, то при их тетраэдрической упаковке образуются пустоты (поры), линейные размеры которых составляют  $0,225D$ , где  $D$  — диаметр шаров. При октаэдрическом способе укладки шаров пустоты (поры) будут иметь линейные масштабы ~0,414D, а в случае наиболее рыхлой, кубической упаковки — 0,47D. Следовательно, ядро частицы аморфного кремнезема имеет поры, размеры которых лежат в интервале 1,1–2,3 нм (тетраэдрическая упаковка первичных частиц), 2,1–4,1 нм (октаэдрическая) и 2,4–4,7 нм (кубическая упаковка). Аналогичные значения интервалов упаковочных пустот и у вторичных частиц аморфного кремнезема. Таким образом, ядра частиц кремнезема (и вторичные частицы) содержат пустоты масштаба 1,1–4,7 нм.

При укладке вторичных частиц аморфного диоксида кремния в слои, окружающие ядра частиц, также образуются пустоты (поры) с размерами 4,5–9,0 нм при их тетраэдрической, 8,3–16,7 нм при октаэдрической и 9,4–18,8 нм — при кубической упаковке. Следовательно, частицы аморфного диоксида кремния должны иметь собственную поровую структуру с линейными размерами пор, лежащих в интервале 1,1–18,8 нм.

В реальности же верхний предел значений диаметров пор может быть несколько выше за счет дефектов упаковки частиц и отклонения формы первичных и вторичных частиц от сферической, что и подтверждается результатами исследований.

Как видно из рис. 2, все три кривые распределения рассеивающих неоднородностей по размерам указывают на то, что дисперсные частицы диатомитов имеют собственную поровую систему наномасштабного уровня с линейными размерами пор или их кластеров  $\sim 1\text{--}20$  нм, что соответствует теоретически рассчитанным значениям размеров пустот, образованных первичными и вторичными частицами аморфного кремнезема, согласно оболочечной модели их строения. В диатомите Никольского месторождения присутствуют неоднородности и несколько больших размеров  $\sim 20\text{--}30$  нм, что, видимо, является результатом рассеяния рентгеновских лучей дефектами упаковки первичных и вторичных частиц  $\text{SiO}_2$ .

Если исследуемые структурные элементы наноразмерного уровня (частицы, поры, кластеры, поверхности раздела неоднородностей) имеют фрактальную природу, то в определенных интервалах значений модуля вектора  $s$  должен наблюдаться степенной спад индикатрисы рассеяния  $I(s) \sim s^{-\alpha}$  с нецелым значением показателя степени, причем  $\alpha < 4$ . При  $1 \leq \alpha < 3$  степенной спад  $I(s)$  характерен для рассеяния от фрактальных кластеров или агрегатов наночастиц (массовых фракталов) с размерностью  $D = \alpha$ . В том случае, когда  $3 < \alpha < 4$ , наблюдается рассеяние от наночастиц с негладкой фрактальной поверхностью, фрактальная размерность определяется как  $D_S = 6 - \alpha$ . Такой закон спада кривой  $I(s)$  типичен для рассеяния в пористых материалах. Если показатель степени  $\alpha = 4$ , то выполняется закон Порода [3] при рассеянии рентгеновских лучей от однородных частиц (пор) с гладкой поверхностью.

С целью поиска возможных фрактальных объектов исследуемых диатомитов индикатрисы  $I(s) - s$  были перестроены в двойные логарифмические координаты  $\log I(s) - \log s$ . Их анализ показал, что фрактальный режим рассеяния структурными неоднородностями наноразмерного уровня имеет место во всех дисперсных порошках. Для нахождения фрактальных размерностей этих неоднородностей использовался метод, который заключается в определении наклона соответствующего линейного участка кривой рассеяния, построенной в координатах  $\log I(s) - \log s$ . Показатель степени  $I(s)$  в этом случае устанавливается как  $\alpha = \Delta \log I(s) / \Delta \log s$ . Фрактальные характеристики исследуемых материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Фрактальные характеристики исследуемых материалов

Диатомит	$\Delta s, \text{\AA}^{-1}$	$\alpha$	$D$	$D_S$	$d, \text{ нм}$
Атемарский	0,013–0,026	2,59	2,59		48–24
	0,031–0,061	1,56	1,56		20–10
	0,067–0,095	3,73		2,27	9–7
Никольский	0,011–0,025	2,53	2,53		57–25
	0,035–0,068	1,07	1,07		18–9
	0,075–0,102	3,72		2,28	8–6
Инзенский	0,010–0,025	2,40	2,40		62–25
	0,030–0,047	1,73	1,73		21–13
	0,047–0,071	2,63	2,63		13–9

На кривой МУРР диатомита Атемарского месторождения наблюдаются три прямолинейных участка в интервалах значений модуля вектора  $s$  0,013–0,026; 0,031–0,061 и 0,067–0,095 Å<sup>-1</sup>, что соответствует интервалам значений линейных размеров рассеивающих частиц (пор) 24–48 нм, 10–20 и 7–9 нм соответственно. Параметр  $\alpha$  для указанных интервалов принимает значение 2,59; 1,56 и 3,73. Отсюда следует, что наиболее крупномасштабные рассеивающие объекты ведут себя как массовые фракталы с фрактальной размерностью  $D = \alpha = 2,59$ , характерной для разветвленных самоорганизованных пористых структур. Второй прямолинейный участок кривой  $\log I(s) - \log s$  имеет наклон  $\alpha = 1,56$ , т.е. фрактальная размерность неоднородностей ~10–20 нм  $D = 1,56$ , что является результатом рассеяния рентгеновского излучения порами в виде изогнутых цепочек сфер, возможно, представляющих собой каналы нано- и микроразмерного масштаба. Такого рода поровые каналы (сквозные либо открытые) могут быть местом адсорбции молекул воды.

Кроме указанных массовых фракталов, МУРР диатомита Атемарского месторождения содержит информацию о рассеянии на трехмерных неоднородностях с фрактальной поверхностью. Характерные размеры таких неоднородностей — 7–9 нм, параметр  $\alpha = 3,73$ , а фрактальная размерность  $D_S = 6 - \alpha = 2,27$  указывает на несильно изрезанную поверхность, если учесть, что значение  $D_S = 2,0$  соответствует совершенно гладкой, а  $D_S = 3,0$  — сильно изрезанной, пористой поверхности.

Диатомит Никольского месторождения имеет сходные фрактальные характеристики рассеивающих неоднородностей с диатомитом Атемарского месторождения (см. табл. 2). Можно отметить, что фрактальная размерность неоднородностей масштаба ~9–18 нм ( $D = 1,07$ ) несет информацию о том, что цепочки (кластеры) сферических пор образуют практически прямолинейные (точнее — слегка изогнутые) поровые каналы.

Несколько иной характер неоднородностей обнаружен в диатомите Инзенского месторождения. На индикаторе рассеяния  $\log I(s)-\log s$  выделяются три прямолинейных участка, первый из которых в диапазоне значений  $s$  0,010–0,025 Å<sup>-1</sup> определяется рассеянием достаточно крупных образований (25–62 нм), фрактальная размерность которых  $D = 2,40$ , что несколько меньше, чем в других диатомитах. Второй интервал модуля вектора рассеяния 0,030–0,047 Å<sup>-1</sup> имеет параметр  $\alpha = 1,73$  и, соответственно, фрактальная размерность рассеивающих агрегатов  $D = 1,73$  указывает на цепочки сферических пор (каналы), которые значительно более изогнуты, чем в диатомитах Атемарского и Никольского месторождений.

Особенностью зависимости  $\log I(s) - \log s$  Инзенского диатомита является точка кроссовера при  $s = 0,047$  Å<sup>-1</sup>. Прямолинейный участок (0,047–0,071 Å<sup>-1</sup>) с  $\alpha = 2,63$  говорит о наличии в рассеивающем материале массовых фракталов ( $D = 2,63$ ) — относительно мелкомасштабных (small – scale) фрактальных кластеров (9–13 нм) с развитой поровой структурой. Кроме того, в диатомите Инзенского месторождения поверхности рассеивающих неоднородностей, которые бы имели фрактальный характер, не обнаружены.

Таким образом, методом малоуглового рентгеновского рассеяния показано, что частицы аморфного диоксида кремния, составляющие основную часть природного диатомита, имеют собственную поровую структуру нанометрового уровня. Поры масштаба ~1–20 нм, вероятно, соответствуют пустотам упаковки частиц SiO<sub>2</sub>, в соответствии с оболочечной моделью их строения. Указанный метод позволил оценить средние значения линейных размеров рассеивающих неоднородностей частиц диатомитов.

Кроме того, с помощью метода МУРР установлено, что часть рассеивающих неоднородностей дисперсных порошков диатомитов носит фрактальный характер — это массовые фракталы кластеров порового пространства частиц диоксида кремния, а также развитая система поровых каналов нанометровых размеров, которые, вероятно, увеличивают способность природных диатомитов к удержанию молекул воды. Обнаруженные фрактальные поверхности раздела поры — твердое тело могут вносить свой вклад в характер фонон-фотонной и фотон-фононной теплопроводности на границе контакта пор с основной матрицей [4] при передаче тепла через изучаемые дисперсные системы, что может служить одной из причин низкой эффективной теплопроводности природных диатомитов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов [Текст] / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.П. Селяев. — Ташкент : ФАН, 1991. — 345 с.
2. Китайгородский, А.И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел [Текст] / А.И. Китайгородский. — М. ; Л. : Гостехтеоретиздат, 1952. — 590 с.
3. Свергун, Д.И. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние [Текст] / Д.И. Свергун. — М. : Наука, 1986. — 280 с.
4. Гладков, С.О. Газокинетическая модель теплопроводности гетерогенных веществ [Текст] / С.О. Гладков // ЖТФ. — 2008. — Т. 78, № 7. — С. 12–15.

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
НЕВЕРОВ Вячеслав Александрович, канд. физ.-мат. наук, доц.  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна, канд. техн. наук, проф.  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 07.03.13

**Selyaev Vladimir Pavlovich**, RAASN academician, doctor of technical sciences, professor, Mordovia State University, Saransk, Russia

**Neverov Vyacheslav Alexandrovich**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Mordovia State University, Saransk, Russia

**Kupriyashkina Ludmila Ivanovna**, candidate of technical sciences, professor, Mordovia State University, Saransk, Russia

#### FRACTALNESS NANOSCALE STRUCTURES NATURAL DIATOMITE

Investigations of nanoscale structures of natural diatomite and structure of dispersed particles and pore space to create a high-performance thermal insulation materials based on mineral fine powders.

**Key words:** natural diatomite, low thermal conductivity, small-angle X-ray scattering method, pores, mass fractals, fractal surface.

#### REFERENCES

1. Solomatov, V.I. Polystructural theory of composite building materials [Text] / V.I. Solomatov, V.N. Vyrovoy, V.P. Selyaev. — Tashkent : FAN, 1991. — 345 p.
2. Kitaygorodsky, A.I. X-ray analysis of finely crystalline and amorphous solids [Text] / A.I. Kitaygorodsky. — M. ; L. : Gostechteoretizdat, 1952. — 590 p.
3. Svergun, D.I. Small-angle X-ray and neutron scattering [Text] / D.I. Svergun. — M. : Science, 1986. — 280 p.
4. Gladkov, S.O. Gas-kinetic model of the thermal conductivity of heterogeneous substances [Text] / S.O. Gladkov // J. Technical Physics. — 2008. — Vol. 78, N 7. — P. 12–15.

**УДК 691.322**

**Н.А. МАШКИН, А.Ф. КОСАЧ, А.В. ОБАДЬЯНОВ**

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЬНОЙ КАВИТАЦИОННОЙ  
АКТИВАЦИИ ПЕСКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ  
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ**

Рассмотрен процесс структурообразования мелкозернистого бетона при раздельной кавитационной активации заполнителя — речного песка. Исследованы физико-механические характеристики полученного цементосодержащего композита.

**Ключевые слова:** мелкозернистый бетон, речной песок, механоактивация, активные центры кристаллизации, удельная поверхность, удельная энергия.

Одной из основных проблем в развитии современной технологии гидратационных цементных систем является выработка различных научно обоснованных методов управления процессами их твердения для получения требуемых физико-механических характеристик композитов. Современные достижения в области механики дисперсных систем создали дополнительные возможности управления начальной структурой цементных бетонов. Ключевым моментом этой стороны служит управление избыточной поверхностной энергией, участвующей в структурообразовании фаз, которая проявляется в виде внутренних сил дисперсной или дисперсно-зернистой системы.

Следует особо подчеркнуть, что решающую роль имеет регулирование свойств структуры на ранних стадиях ее зарождения (период коагуляции). Коагуляционные структуры образуются в основном за счет энергии межмолекулярного взаимодействия при повышении концентрации новообразований, преимущественно гидросиликатов и гидроалюминатов кальция в начальной, подготовительной стадии структурообразования. Эти гидраты представлены в виде мельчайших частиц — субмикрокристаллов — размерами меньше 0,1 мкм; они создают в прослойках между гидратированными зернами цемента коллоидную систему. Между частицами возникают коагуляционные контакты, что и приводит к образованию коагуляционной структуры. Особенностью этих контактов является обязательное наличие между частицами тонкой устойчивой прослойки воды (дисперсионной среды) [1].

Задача проводимых исследований — увеличение дисперсности песка мелкозернистого бетона путем механоактивации, а цель — улучшение физико-механических свойств материала при активации определенной доли заполнителя.

В качестве заполнителя мелкозернистого бетона использовались речные пески Сурей-Юганского месторождения. Характеристики песка [2]:

Модуль крупности .....	1,4
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup> .....	2620
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> .....	1570
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % .....	0,84

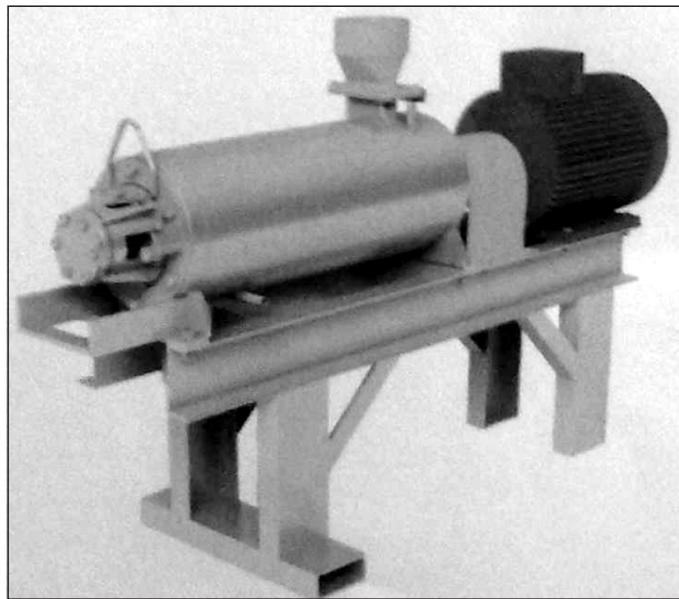


Рис. 1. «Выюга» — мельница непрерывного действия роторного типа, мелющие тела — цилиндрические спирали

Часть песчаной массы подвергалась:

- тонкому сухому помолу в мельнице «Выюга» (рис. 1) до удельной поверхности  $200\text{--}280 \text{ m}^2/\text{kg}$ , что соответствует среднему размеру зерна (около  $6\text{--}10 \text{ мкм}$ );
- мокрому помолу — кавитации в мельнице «Выюга» до удельной поверхности  $220\text{--}310 \text{ m}^2/\text{kg}$ , что соответствует среднему размеру зерна (около  $4\text{--}8 \text{ мкм}$ ).

Кавитационные процессы имеют высокую разрушительную силу, которую используют для дробления твердых веществ, находящихся в виде водной суспензии [3].

В данном исследовании определялась оптимальная доля активированного песка ( $y$ ) от общего количества песчаной массы в бетоне (10, 20 и 30 %), при которой физико-механические характеристики цементосодержащего композита будут наиболее высокими [4] (рис. 2, 3).

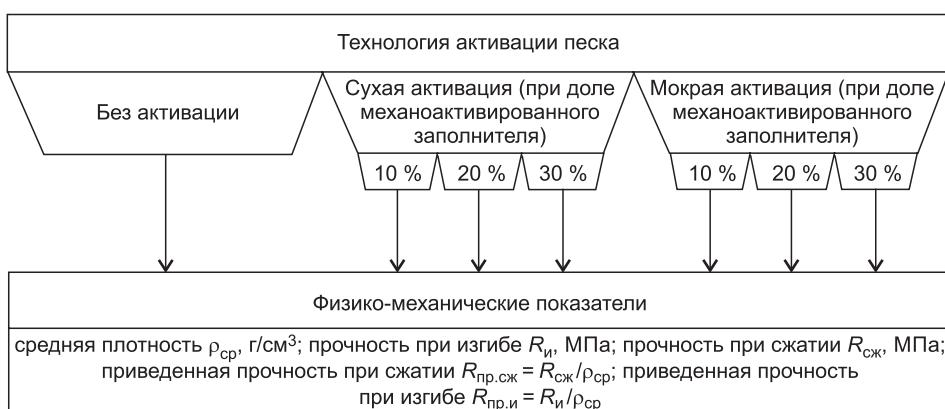
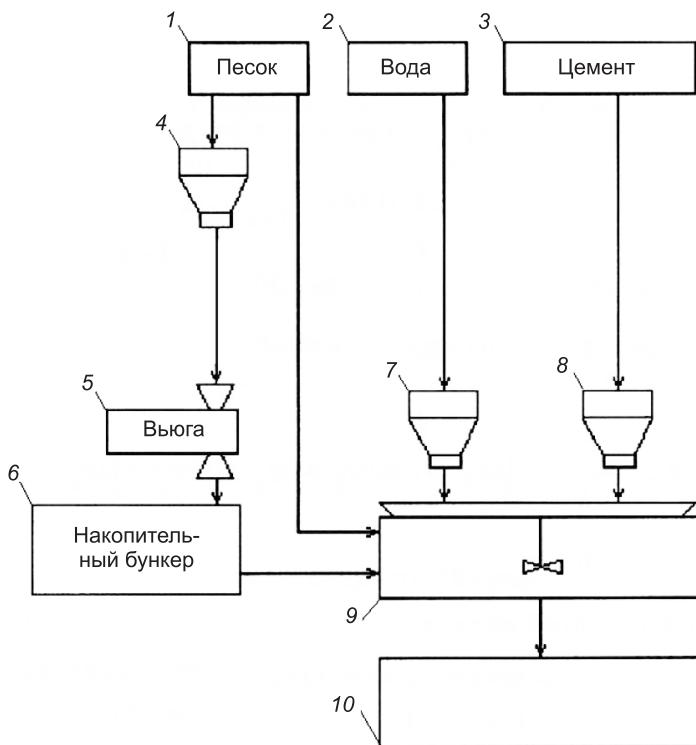


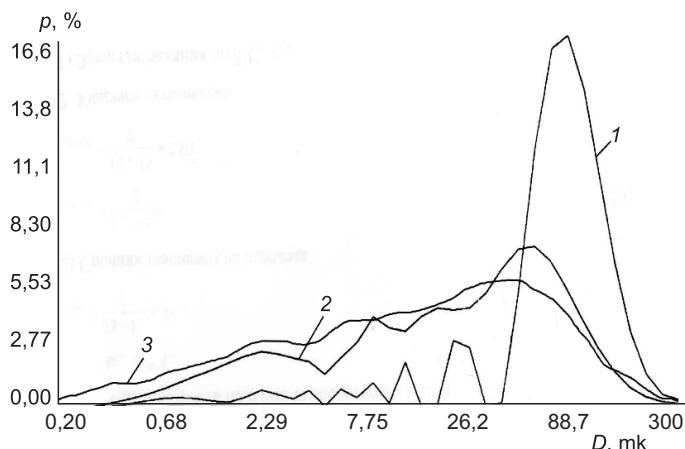
Рис. 2. Технологическая схема приготовления мелкозернистого бетона на обогащенных песках



*Рис. 3. Принципиальная схема приготовления бетона на заводе*  
 1 — накопительный бункер для песка; 2 — емкость для воды; 3 — накопительный бункер для цемента; 4 — дозатор песка; 5 — мельница непрерывного действия роторного типа «Выюга»; 6 — накопительный бункер активированной песчаной смеси; 7 — дозатор воды; 8 — дозатор цемента; 9 — смеситель СБ-138 принудительного действия (с вертикальным ротором); 10 — форма для заливки готовой смеси

Весовое распределение песка установлено с помощью лазерного анализатора частиц «MicroSizer-201» (рис. 4).

Поскольку средние размеры зерен цемента варьируются от 5 до 40 мкм, частицы песка меньших диаметров заполняют пространство между непрогидратированными частицами цемента (рис. 5).



*Рис. 4. Весовое распределение песка без активации (а), при сухой (б) и мокрой (в) активации*

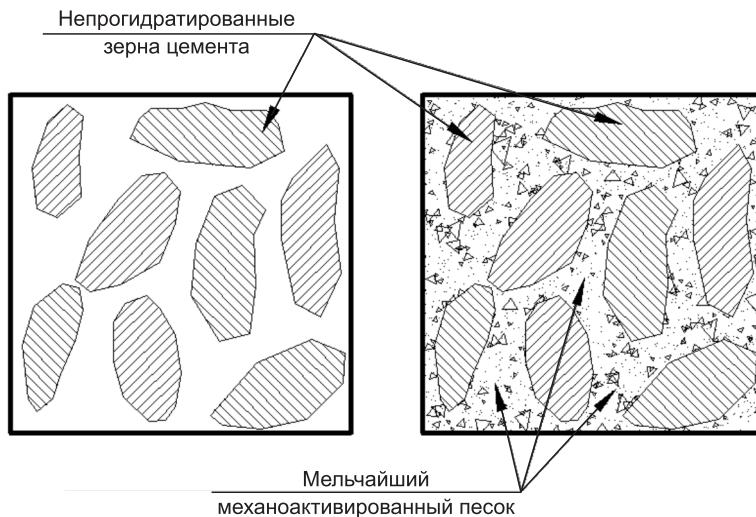


Рис. 5. Заполнение микрочастицами песка пространства вокруг зерен цемента

При оценке влияния вида песка и технологических факторов на процессы структурообразования смеси и свойства пескобетона были приняты постоянными следующие параметры: подвижность смеси (определенена погружением конуса СтройЦНИЛ на глубину  $h = 6\text{--}8$  см); водоцементное отношение, равное 0,54; объемная концентрация цементного теста ( $C = 0,4$ ) и песка ( $S = 0,6$ ) в смеси. Использовался чернореченский алютитовый среднеалюминиатный портландцемент.

Прочность при изгибе и сжатии мелкозернистого бетона определялась на образцах-балочках, изготовленных из цементно-песчаной массы размерами  $4\times 4\times 16$  см из раствора 1:3 по массе (1 часть портландцемента, 3 части песка) и испытанных через 28 сут с момента изготовления, выдержаных при температуре  $+20\pm 2$  °C.

Величина предела прочности при изгибе определена на приборе МИИ-100, предел прочности при сжатии — на прессе МС-500. Физико-механические характеристики образцов представлены в таблице.

В данном исследовании подтверждается ранее выдвинутая авторами гипотеза<sup>1</sup> об улучшении физико-химических характеристик в процессе структурообразования бетонной смеси путем:

#### Физико-механические характеристики образцов

Показатель	Без активации	Сухая активация, %			Мокрая активация, %		
		10	20	30	10	20	30
Прочность при сжатии $R_{сж}$ , МПа	25,00	28,75	31,25	32,00	29,75	32,75	33,25
Приведенная прочность при сжатии $R_{пр.сж} = R_{сж}/\rho_{cp}$	10,46	12,55	13,89	14,35	13,40	14,82	15,05
Прочность при изгибе $R_i$ , МПа	5,50	6,33	6,88	7,04	6,55	7,21	7,32
Приведенная прочность при изгибе $R_{пр.i} = R_i/\rho_{cp}$	2,30	2,76	3,06	3,16	2,95	3,26	3,31
Средняя плотность $\rho_{cp}$ , г/см <sup>3</sup>	2,39	2,29	2,25	2,23	2,22	2,21	2,21

<sup>1</sup> Косач А.Ф., Кузнецова И.Н., Гутарева Н.А., Обадьянов А.В. Особенности структурообразования бетона при механоактивации заполнителя // Вестн. СибАДИ. 2013. № 1. С. 64–68.

- создания активных центров кристаллизации на свежеобразованной поверхности;
- повышения физико-химической активности песка за счет изменения внутренней энергии, дефектов структуры, формирования на поверхности твердого тела поверхностного слоя, в котором концентрируется «избыточная» энергия ненасыщенности атомных связей кристаллической решетки у поверхности.

В результате исследований разработанная технология по обогащению мелкозернистых песков позволила получить мелкозернистый бетон с повышенным значением прочности на сжатие и изгиб ( $R_{сж} = 33,2$  МПа,  $R_i = 7,3$  МПа) от 30 до 35 %.

Из данного исследования видно, что повысить прочность цементного камня и изделий на его основе можно путем организации равномерной кристаллической структуры в момент перекристаллизации первичных продуктов гидратации за счет введения дополнительных центров кристаллизации (крентов), находящихся в нанодисперсном состоянии (при механоактивации речного песка).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Лотов, В.А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий [Текст] / В.А. Лотов // Изв. Том. политехн. ун-та. — 2007. — № 3. — С. 84–88.
- Болотов, С.Н. Минерально-сырьевые ресурсы и динамика развития стройиндустрии Тюменской области [Текст] / С.Н. Болотов, А.П. Каменских; под ред. А.И. Подсосова. — Тюмень, 2001. — 211 с.
- Хозин, В.Г. Оптимизация гранулометрического состава песка для получения высокопрочного тонкозернистого бетона [Текст] / В.Г. Хозин, Н.М. Морозов, И.В. Боровских // Изв. КазГАСУ. — 2008. — № 2 (10). — С. 121–124.
- Гусев, Б.В. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства [Текст] / Б.В. Гусев, В.И. Кондращенко, Б.П. Маслов, А.С. Файвусович ; под ред. Б.В. Гусева. — М. : Науч. мир, 2006. — 560 с., илл.

*МАШКИН Николай Алексеевич, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*КОСАЧ Анатолий Федорович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: A\_Kosach@ugrasu.ru*

*Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск*

*ОБАДЬЯНОВ Александр Викторович, асп.*

*Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск*

Получено 01.03.13

**Mashkin Nikolay Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kosach Anatoliy Fedorovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: A\_Kosach@ugrasu.ru, Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

**Obadjanov Aleksandr Viktorovich**, post-graduate student, Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

#### **EFFECTIVENESS OF SEPARATE ACTIVATION OF CAVITATIONAL SAND IN THE PRODUCTION OF FINE-GRAINED CONCRETES**

Fine structure formation process of concrete considered with separate activation of cavitational filler — river sand. Physical and mechanical characteristics of the received containing cement composite are investigated.

**Key words:** fine grained concrete, river sand, mechanical, active centers of crystallization, specific surface, the energy density.

#### REFERENCES

1. Lotov, V.A. Of system in technology, building materials and products [Text] / V.A. Lotov // News of Tomsk Polytechnic University. — 2007. — N 3. — P. 84–88.
  2. Bolotov, S.N. Mineral resources and construction industry development dynamics of the Tyumen region [Text] / S.N. Bolotov, A.P. Kamenskikh; ed. A.I. Podsolova. — Tyumen, 2001. — 211 p.
  3. Khozin, V.G. Optimization of particle size distribution of sand to produce high-strength concrete tonkozernistogo [Text] / V.G. Khozin, N.M. Morozov, I.V. Borovskikh // Proc. KazGASU. — 2008. — N 2 (10). — P. 121–124.
  4. Gusev, B.V. Formation of the structure of composite materials and their properties [Text] / B.V. Gusev, V.I. Kondrashchenko, B.P. Maslov, A.S. Fajvusovich; ed. B.V. Guseva. — M. : Scientific world, 2006. — 560 p., ill.
-

УДК 691.327:666.973.6

Е.В. ФОМИНА, В.В. СТРОКОВА, Н.П. КУДЕЯРОВА

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ГАШЕНОЙ ИЗВЕСТИ  
В ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНАХ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ\***

Установлена возможность активировать взаимодействие компонентов вяжущего с существенным изменением в фазовом составе гидратных новообразований, изменения условия гашения извести при производстве автоклавного газобетона, что положительно влияет на физико-механические характеристики готового изделия.

**Ключевые слова:** газобетон, гашеная известь, вяжущее, гидросиликаты кальция, гидросульфосиликаты кальция.

При производстве автоклавных ячеистых бетонов на основе извести условия ее гашения изменяются в зависимости от свойств сырьевых материалов и особенностей технологического процесса. Главной задачей при создании ячеистого бетона является получение качественной ячеистой высокопрочной структуры, которая напрямую зависит от активности извести, скорости ее гашения и дисперсности кристаллической фазы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В основном при получении сырьевой смеси газобетонов гашение извести начинается при помоле вяжущего в присутствии кварцевого песка естественной влажности, полное гашение происходит в сырьевой смеси до формования сырца. Поэтому процесс гашения извести недостаточно управляем и в большинстве случаев приводит к заведомо заложенному снижению качества готового изделия с перерасходом вяжущего.

Решить задачу повышения активности взаимодействия вяжущих в силикатной смеси можно за счет различных технологических способов<sup>1, 2</sup>, одним из которых является изменение условий гашения извести. К этим условиям относятся высокая температура процесса, когда наряду с гашением извести водой протекает гашение паром и образуется до 70 % частиц размером до 10 мкм [1]. Ранее было установлено, что при гашении высокоактивной извести ( $A = 86\%$ ,  $B/I = 0,32 - 0,64$ ) в области температур от 160 до 190 °C и наличии двуводного гипса в количестве от 0,05 до 0,25 мас. % происходит дегидратация гипса с образованием  $\beta$ -модификации полугидрата и более дисперсных частиц  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Введение в ячеисто-бетонную смесь высокодисперсных частиц  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  во взаимосвязи с образованной модификацией гипса оказывает

\* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках гранта Президента РФ № МК-6170.2013.8; при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт 16.740.11.0770, государственное задание 3.4601.2011.

<sup>1</sup> Володченко А.Н., Лесовик В.С. Реологические свойства газобетонной смеси на основе нетрадиционного сырья // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 45–48.

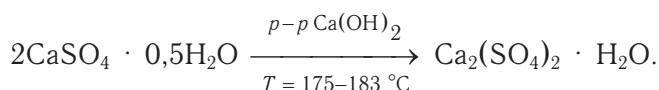
<sup>2</sup> Алфимова Н.И., Шаповалов Н.Н., Абросимова О.С. Эксплуатационные характеристики силикатного кирпича, изготовленного с использованием техногенного алюмосиликатного сырья // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 11–14.

влияние на кинетику гидратации смешанного вяжущего с изменением сроков схватывания сырьевой смеси, реотехнологические характеристики [2] и позволяет совмещать во времени период интенсивного структурообразования с газовыделением при вспучивании ячеисто-бетонной смеси, тем самым получать высококачественную поровую структуру готового изделия. Высокодисперсные и активные продукты гашения играют значительную роль при формировании гидросиликатной связки вяжущего, с учетом уменьшения растворимости  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при повышении температуры, что приводит к увеличению прочности смешанных вяжущих в среднем на 23 %. Вместе с тем отмечалось, что предложенная схема гашения вызывает существенные изменения в фазообразовании, где наряду с ростом кристаллических одноосновных гидросиликатов кальция типа  $\text{CSH(B)}$  присутствовали гидросульфосиликатные соединения типа  $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  [3].

Основной задачей данной работы является установление взаимосвязи между особенностями гашения извести, активации физико-химических взаимодействий при твердении смешанного вяжущего и образованием фаз гидросульфосиликатных соединений в ячеистых бетонах.

Для исследования использовались следующие материалы: известь ОАО «Стройматериалы» (Белгород); кварцевый песок Нижне-Ольшанского месторождения; портландцемент ОАО «Белгородский цемент» марки ЦЕМ I 42,5 Н; двуводный гипс Новомосковского месторождения. Для получения газобетона применяли алюминиевую пасту марки ГБ-1. Основные сырьевые компоненты не отличались от традиционно используемых при производстве газобетонов и соответствовали ГОСТ 31359–2007 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения».

Влияние активированной извести исследовалось в образцах известкового вяжущего. Известь предварительно гасили при  $\text{B/I} = 0,32$  и добавкой 0,15 % двуводного гипса (от массы извести), высокой температурой гашения извести воздействовали на дегидратацию гипса. Твердение образцов производилось в лабораторном автоклаве при давлении 10 атм, температуре 183 °С с выдержкой при постоянной температуре в течение 24 ч. Рентгенофазовый анализ полученных результатов свидетельствует, что наряду с кристаллами  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в системе присутствуют соединения высокоосновного сульфата кальция  $\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , а также некоторое количество полуводного гипса. Можно предположить, что в условиях тепловлажностной обработки и среде, насыщенной известью, происходит частичное связывание гипса и гидроксидов кальция в комплексные соединения по схеме:



Полученный при высоких температурах гашения извести полугидрат гипса в насыщенных известковых смесях не гидратирует и при автоклавной обработке образует высокоосновный гидрат сульфата кальция  $\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , изменяя в последующем механизмы фазообразования вяжущего.

Для подтверждения возможности образования в автоклавированных вяжущих кристаллических фаз типа  $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  был произведен синтез данных соединений, исходя из мольных соотношений в синтезируемой фазе. Активность продуктов гашения извести с двуводным гипсом оценивалась по связыванию  $\text{CaO}$  и  $\text{SO}_3$  при гидротермальном синтезе. Образцы изготавливались по разработанной рецептуре. Часть гипса

(0,05 и 0,15 % от массы извести) смешивалась с известью и гасилась при В/И = 0,32. Остальная часть двуводного гипса вводилась в смесь в соответствии с соотношением исходных компонентов. Продукты гашения смешивались с остальными компонентами, готовая смесь

увлажнялась до 6 % и формовались образцы методом прессования. Содержание CaO в сырьевой смеси составляло 12 %, а SO<sub>3</sub> — 32 %. При автоклавной обработке происходит более интенсивное связывание свободного гидроксида кальция, что подтверждает высокую активность его и полуводного гипса, получаемого при гашении извести (таблица).

В синтезируемой системе при предварительном гашении извести с добавкой 0,05 % двуводного гипса на вторые сутки автоклавной обработки были обнаружены кристаллические соединения типа Ca<sub>3</sub>Si(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub> · 9H<sub>2</sub>O (рис. 1). При этом наблюдалось уменьшение содержания кварца и увеличение концентрации низкоосновных гидросиликатов типа тоберморит. Действие подобных добавок, обеспечивающих максимальную активацию гидратации и твердения вяжущих, обусловлено высокой дисперсностью исходных материалов и малой концентрацией. Возможно, что в силикатных смесях при высоких температурах анионы SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> интенсивно участвуют в синтезе новообразований, частично замещая тетраэдры SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> в новой фазе. Компенсацию избыточного заряда при замене тетраэдров кремния на SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> обеспечивают щелочные ионы Ca<sup>2+</sup>. Подобные соединения автоклавного синтеза образуются из многокомпонентных смесей, имеют отклонения от структуры тоберморита, обладают более высокой плотностью и для их получения требуется значительно меньше энергии [4].

Различия в фазовом составе образцов проявляются в микроструктурных особенностях гидратных новообразований (рис. 2). На поверхности кристаллов кварца фиксируются игольчатые агрегаты гидросульфосилика-

### Содержание свободных оксидов CaO и SO<sub>3</sub> в синтезируемой фазе

Время автоклавной обработки, сут	Предварительное гашение извести с гипсом, %			
	0,05		0,15	
	CaO	SO <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>
1	6,73	8,94	8,34	14,66
2	6,51	8,78	7,75	10,14
3	6,40	8,70	7,56	9,87

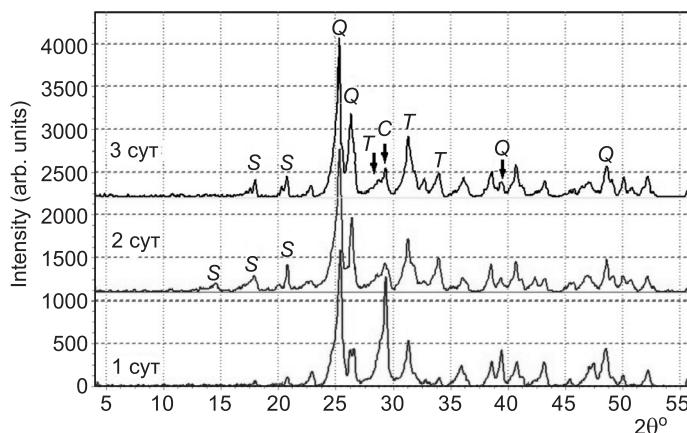
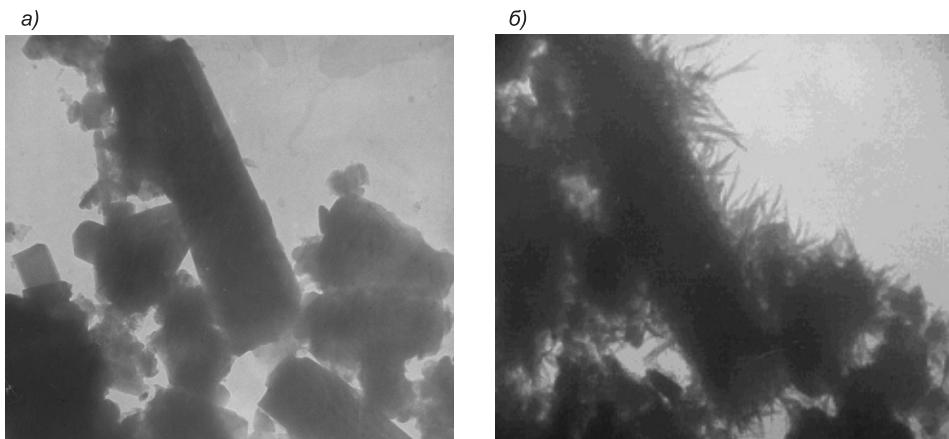


Рис. 1. Рентгенограммы синтезируемого соединения  
S — кальцит; S — Ca<sub>3</sub>Si(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub> · 9H<sub>2</sub>O; Q — кварц; T — низкоосновный гидросиликат кальция



*Рис. 2. Микрофотографии синтезируемого вещества  $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  без предварительного гашения извести (а) и с предварительным гашением извести (б) в присутствии 0,15 % двуводного гипса. Увеличение ×24000*

тов кальция высокой степени кристаллизации, которые способствуют самоармированию системы и увеличению прочности смешанного вяжущего.

Разработанные механизмы предварительного гашения извести способствуют полному использованию ее гидратационных свойств и влияют на термодинамические, кристаллохимические, пространственно-геометрические, технологические аспекты формирования структуры при твердении смешанного вяжущего, повышая его прочность, что соответствует более ранним исследованиям [3]. Подобный технологический прием применялся при получении газобетона. В результате предварительной оптимизации составов установлено, что для получения высокодисперсных продуктов гашения извести, лучшего прохождения реакции газообразования и формирования равномерной поровой структуры целесообразно предварительно гасить 15–25 % известкового вяжущего (от массы всей извести).

Исследования проводились на образцах ячеистых бетонов размером  $10 \times 10 \times 10$  см при соотношении компонентов: известь : песок : цемент : алюминиевая паста = 1 : 3 : 1 : 0,0048 соответственно,  $B/T = 0,48$ . Образцы автоклавировались при температуре  $180^{\circ}\text{C}$  по режиму: продувка автоклава — 40 мин, подъем давления пара до 10 атм — 1 ч, выдержка при рабочем давлении — 5 ч, снижение давления пара — 2 ч. Разработка составов производилась путем определения необходимого количества продуктов гашения извести с варьированием водоизвесткового отношения и добавки двуводного гипса. На основании полученных результатов с помощью метода математического планирования эксперимента были выведены адекватные уравнения регрессии и построены поверхности отклика (рис. 3), характеризующие поведение системы при различных выходных параметрах.

По представленным данным прочность ячеистых материалов при введении в смесь предварительно гашеной извести с добавкой двуводного гипса увеличивается. Составляющие продуктов гашения извести активно участвуют в создании прочного цементирующего вещества за счет увеличения плотности упаковки материала, а также синтеза кристаллических высокопрочных фаз, оказывают положительное влияние на гидратацию вяжущего при формировании пористости и заметном снижении плотности готового изделия. Максимальная прочность изделий повышается на 89 % в сравнении с традиционными изделиями при снижении плотности до 8 %.

Таким образом, на твердение ячеисто-бетонных смесей значительное влияние оказывают свойства полученных продуктов гашения из-

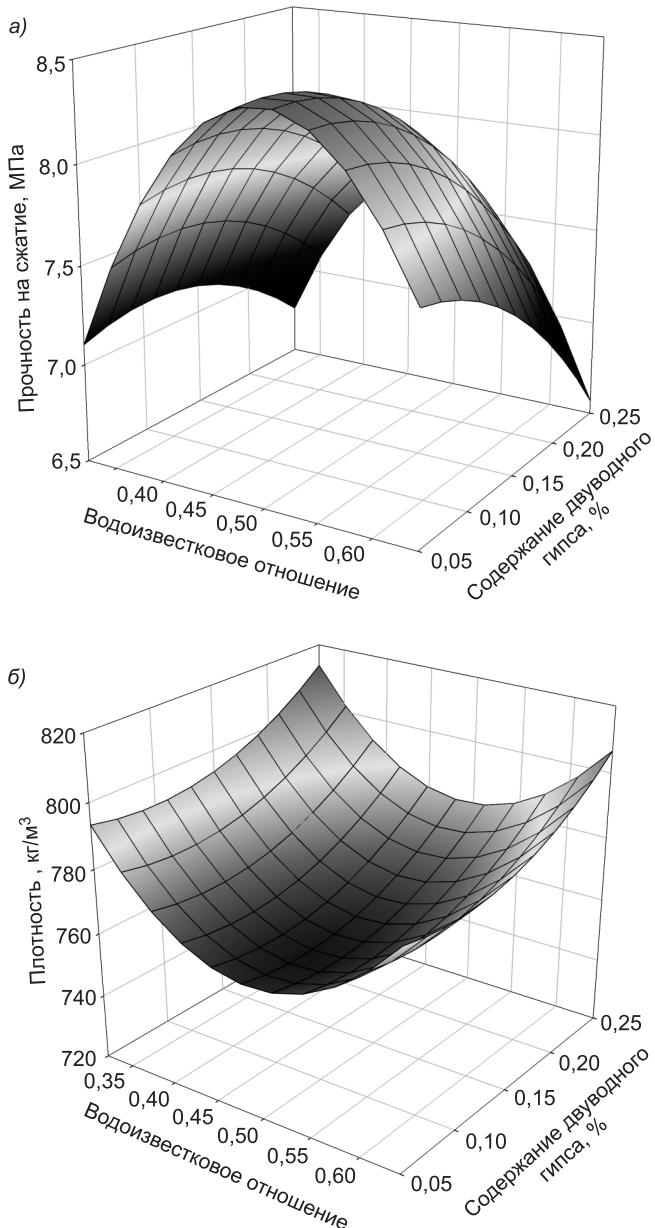


Рис. 3. Зависимость прочности (а) и плотности (б) образцов ячеистого бетона от водоизвесткового отношения и содержания добавки двуводного гипса

вести. При высоких температурах гашения и наличии двуводного гипса в смеси образуются высокодисперсные частицы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , а также первичные соединения высокоосновного гидрата сульфата кальция, которые обладают высокой реакционной способностью, влияют на фазо- и структурообразование при твердении смешанных вяжущих как на ранних стадиях твердения, так и в условиях гидротермального синтеза, улучшая физико-механические характеристики готового изделия. Предложенные технологические приемы можно внедрить на предприятиях по выпуску силикатных автоклавных материалов без значительных затрат на перевооружение и временных простоев производства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудеярова, Н.П. Термодинамический анализ процесса гидратации извести [Текст] / Н.П. Кудеярова // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. — 2005. — № 10. — С. 35–38.
2. Фомина, Е.В. Регулирование реологических характеристик смеси вяжущего при формировании ячеистой структуры изделий автоклавного твердения [Текст] / Е.В. Фомина, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова, А.Б. Бухало, Н.И. Алтынник // Строит. материалы. — 2011. — № 9. — С. 33–35.
3. Фомина, Е.В. Прочность смешанного вяжущего на извести предварительного гашения с добавкой природного гипса [Текст] / Е.В. Фомина, Н.П. Кудеярова // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. — 2006. — С. 17–19.
4. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон [Текст] / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. — М.: Стройиздат, 1973. — 207 с.

*ФОМИНА Екатерина Викторовна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: fomina.katerina@mail.ru*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

*СТРОКОВА Валерия Валерьевна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: strokova@intbel.ru*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

*КУДЕЯРОВА Нина Петровна, канд. техн. наук, проф.; E-mail: kudeyarova@intbel.ru*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 18.03.13

**Fomina Ekaterina Victorovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: fomina.katerina@mail.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Strokova Valeria Valerievna**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: strokova@intbel.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Kudeyarova Nina Petrovna**, candidate of technical sciences, professor; E-mail: kudeyarova@intbel.ru, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## APPLICATION DETAILES FOR PRELIMINARILY HYDRATED LIME IN CELLULAR AUTOCLAVE CONCRETES

The possibility of activation of the binder components interaction with changing in phase composition of hydrate new formations by changing of lime slackening conditions when autoclave gas concrete production is determined. This positively effects on physical and mechanical characteristics of final products.

**Key words:** gas concrete, hydrated lime, binder, calcium hydrosilicate, calcium hydrosulphosilicate.

## REFERENCES

1. Kudеyarova, N.P. Thermodynamic analysis of liming process [Text] / N.P. Kudеyarova // Bul. BSTU. — 2005. — N 10. — P. 35–38.
2. Fomina, E.V. Regulation of rheological characteristics of binder mixture when formation of cellular structure of autoclave products [Text] / E.V. Fomina, V.V. Strokova, V.V. Nelubova, A.B. Bukhalo, N.I. Altynnik // Building materials. — 2011. — N 9. — P. 33–35.
3. Fomina, E.V. Strength of mixed binder consisting of preliminary lacking lime and natural gypsum as additive component [Text] / E.V. Fomina, N.P. Kudеyarova // Izvestia Vusov. Severo-Kavkazsky region. Technical sciences. — 2006. — P. 17–19.
4. Ratinov, V.B. Additives for concrete [Text] / V.B. Ratinov, T.I. Rozenberg. — M.: Stroyizdat, 1973. — 207 p.

УДК 691.31:666.964.3

В.П. КИСЕЛЁВ, В.А. ШЕВЧЕНКО, М.Б. БУГАЕНКО,  
Л.А. ИВАНОВА, В.Д. ВОРОНЧИХИН

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СМОЛЫ ПИРОЛИЗА,  
АНТИОКСИДАНТОВ И ДИВИНИЛАКРИЛОНИТРИЛЬНОГО  
КАУЧУКА ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ БИТУМА  
И АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Рассмотрено влияние на свойства вяжущего различных компонентов, входящих в состав комплексного модификатора. Оценена эффективность повышения физико-механических свойств вяжущего и асфальтобетона при раздельном и совместном введении в битум полимерных добавок – сополимеров бутадиена и акрилонитрила, отстойной смолы пиролиза древесного сырья, а также антиоксидантов аминного типа.

Ключевые слова: битум, асфальтобетон, комплексные модификаторы, отстойные смолы пиролиза, сополимер бутадиена и акрилонитрила, антиоксиданты.

Дорожно-строительный комплекс ставит перед учеными задачу разработки новых видов высококачественных, устойчивых к старению материалов. Как показывает опыт, при эксплуатации автомобильных дорог происходит старение дорожных битумов, что приводит к образованию различных дефектов дорожного покрытия, ухудшающих комфортность и безопасность движения [1]. В связи с этим актуальны разработки специальных составов вяжущего, позволяющих получить материал с требуемым комплексом эксплуатационных свойств [2].

При модификации битума путем добавления в него отдельно полимеров или поверхностно-активных веществ (ПАВ) трудно добиться значительного улучшения свойств. Изучено раздельное и совместное влияние на сцепление битума со стеклянной подложкой дивинилстирольного термоэластопласта (ДСТ), а также ПАВ катионного типа WETFIX BE производства Швеции. Показано, что модификация битумов за счет введения оптимальных количеств полимера (3 %) и ПАВ (0,5–1,0 %) более эффективна, чем индивидуальная модификация большим содержанием полимера (4–9 %) [3].

Ранее нами [4] были проведены опыты по изучению адгезионных свойств дорожных битумов, модифицированных ДСТ и двумя образцами дивинилакрилонитрильного (ДАН) эластомера, при различных способах введения их в битум. Наибольшее повышение адгезионной прочности характерно для вяжущих на основе эластомеров, содержащих в качестве ПАВ отстойные смолы пиролиза (ОСП) древесного сырья. ОСП состоят из нейтральных масел (27,3–36,7 мас. %), в которых сосредоточены ароматические углеводороды и кислородные соединения (эфиры и кислоты). В фенольной части смол (27,9–37,0 мас. %) содержится значительное количество двухатомных фенолов (до 15,0–20,4 % пирокатехина и до 25,0 % гомологов пирокатехина). Это предопределяет использование ОСП в дорожной отрасли как антиоксиданта и ПАВ.

В настоящее время при модификации свойств дорожного битума положительный эффект, как показано в работах<sup>1–4</sup>, достигается путем введения в вяжущее и соответственно в асфальтобетонные смеси нескольких веществ, каждое из которых улучшает определенные показатели. В составе модифицированного вяжущего (МВ) предпочтительно использование полимеров с активными функциональными группами, а также ПАВ и адгезивов с расширенным спектром модифицирующего действия. К таким ПАВ относятся ОСП, повышающие адгезию вяжущего к материалам основных пород, а также аминные антиоксиданты, увеличивающие устойчивость углеводородного материала к старению и адгезию вяжущего к материалам кислых пород<sup>5,6</sup>.

Целью настоящего исследования являлась оценка физико-механических свойств битума и асфальтобетонных смесей при введении в вяжущее комплексного модификатора (КМ).

В работе использовали битум ОАО «Ачинский НПЗ» марки БНД 90/130 ГОСТ 22245–90; в качестве эластомера ДАН — каучук БНКС-40. ОСП получали пиролизом древесины маньчжурского ореха при температуре 500 °C в инертной атмосфере. Перед применением ОСП выпаривали при 150 °C в течение 1 ч для удаления остатков воды и низкомолекулярных соединений: альдегидов и одноатомных фенолов, снижающих адгезию вяжущего и придающих неприятный запах смолам. Для стабилизации свойств битума и повышения адгезии материала к породам кислого характера применяли аминные антиоксиданты диафен ФП (N-изопропил-N<sup>1</sup>-фенил-p-фенилдиамин), а также нафтам (фенил-β-нафтиламин).

Сцепление вяжущего с известняковым щебнем определяли по методу красителей А.С. Колбановской<sup>7</sup>. Основным критерием адгезионной активности вяжущих к материалам кислых пород служил показатель их сцепления со стеклянной подложкой, определенный в соответствии с ДСТУ Б В.2.7–81 с изменением № 1 (Приказ Госстроя Украины от 25.08.05. № 143).

Устойчивость к старению оценивали по изменению пенетрации и температуры размягчения после прогрева в условиях испытания по ГОСТ 18180–72, а также по величине сцепления вяжущего к материалу основных и кислых пород. Подбор состава образцов асфальтобетонных смесей осуществляли по ГОСТ 9128–2009, исследование качества — по ГОСТ 12801–98.

<sup>1</sup> Мардиросова И.В., Чан Н.Х., Балабанов О.А. Модифицированное асфальтовое вяжущее повышенной стойкости к старению // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 4. С. 15–20.

<sup>2</sup> Ивански М., Урьев Н.Б. Асфальтобетон как композиционный материал. М.: Техполиграфцентр, 2007. 770 с.

<sup>3</sup> Руденский А.В., Никонова О.Н., Казиев М.Г. Повышение долговечности асфальтобетонов введением активного комплексного модификатора // Стройт. материалы. 2011. № 10. С. 10–11.

<sup>4</sup> Худякова Т.С. Резиновая крошка в деле // Влияние комплексного модификатора КМА на физико-механические свойства дорожного битума. 2010. № 7. С. 56–62.

<sup>5</sup> Киселёв В.П., Бугаенко М.Б., Кеменев Н.В. Влияние добавок, обладающих антиоксидантной активностью, на качество асфальтобетонных смесей // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 3. С. 49–55.

<sup>6</sup> Киселёв В.П., Бугаенко М.Б., Кеменев Н.В. Стабилизация свойств нефтяного дорожного битума // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 2. С. 69–75.

<sup>7</sup> Колбановская А.С., Михайлов В.В. Дорожные битумы. М.: Автотрансиздат, 1959. С. 32–35.

Было изучено МВ, в составе которого присутствует 3,0 мас.% ДАН, 5,0 ОСП, а также 1,0 мас.% антиоксиданта аминного типа. Поскольку в [3] установлено оптимальное содержание полимеров и ПАВ (3 и 1,0 % соответственно), в качестве оптимальных были использованы эти количественные соотношения. МВ приготавливается следующим образом: в обогреваемую емкость с мешалкой подается обезвоженный битум, 6 % от массы битума 50%-го раствора полимера в толуоле. Композиция нагревается до температуры 150–160 °С, добавляется 5 % ОСП и 1 % от массы битума антиоксиданта (нафтама (Н) или диафена (ДФ). Полная гомогенизация компонентов наблюдается через 15 мин.

С целью оценки влияния отдельных компонентов предлагаемого модификатора и совокупного их влияния на свойства битума были изучены физико-механические свойства получаемых композиций МВ до и после испытания на старение (табл. 1).

Как видно из результатов, приведенных в табл. 1, добавка эластомера ДАН, пластифицированного толуолом, резко снижает пенетрацию вяжущего, значительно увеличивает температуру размягчения битума, на 1–2 °С повышает температуру хрупкости, незначительно уменьшает показатели сцепления вяжущего к материалу основных и кислых пород. Устойчивость к старению битума при модификации его пластифицированным ДАН мало отличается от исходного битума ( $\Delta t_p = 6,5\text{--}5,5$  °С). Добавление ОСП, особенно совместное введение ОСП и антиоксидантов, положительно влияет на свойства МВ. Пенетрация и температура размягчения битума выдерживается в пределах изучаемой марки, снижается температура хрупкости битума, что влечет за собой повышение его морозостойкости и, соответственно, возрастание устойчивости к образованию трещин при зимних отрицательных температурах эксплуатации. Вяжущее становится устойчивым к старению ( $\Delta t_p = 2\text{--}3$  °С).

Механизм влияния ОСП и антиоксидантов (нафтама и диафена) на повышение устойчивости к старению битума заключается в следующем. ОСП и антиоксиданты, прерывая цепной окислительный процесс, в данном случае действуют одинаково. ОСП, в составе которых имеется подвижный атом водорода в фенольной OH-группе, нафтам и диафен, содержащие подвижный атом водорода в аминогруппе ( $\text{NH}_2$ ), выполняют роль

Таблица 1

**Изменение физико-механических показателей свойств битумов, модифицированных добавками, после испытания на старение по ГОСТ 18180–72**

Показатель	Исходный битум БНД 90/130	Б+3 % ДАН	Б+3 % ДАН+5 % ОСП	Б+3 % ДАН+5 % ОСП + 1 % ДФ	Б+3 % ДАН+5 % ОСП+1 % Н
Изменение массы после испытания, мас. %	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6
Пенетрация при 25 °С, %	114/80	74/48	118/109	124/113	129/118
Температура хрупкости, °С(–1)	17/14	16/12	23/21	24/21	24/20
Температура размягчения, °С	43,0/49,5	69,0/74,5	49,0/52,0	50,0/52,5	49,0/52,0
$S_r$ , %	52/38	49/45	58/53	95/90	96/94
$S_u$ , %	68	66/65	97/93	95/96	99/96

Примечание. В числителе даны показатели до испытания, в знаменателе — после испытания.

$S$  — показатель сцепления;  $S_r$  — на гранитном,  $S_u$  — на известняковом отсеве.

акцепторов свободных электронов, образующихся на стадии термоокислительной деструкции битума. А поскольку структура ОСП и используемых антиоксидантов является сложной и пространственно затрудненной для какого-либо взаимодействия, образующиеся радикалы малоактивны и неспособны взаимодействовать по цепному механизму с другими молекулами битума. За счет этого тормозится цепной окислительный процесс химической стадии старения битума. При добавлении ОСП в состав модификатора возрастает показатель сцепления с материалом основных пород, нафтама и диафена — показатели сцепления с материалом кислых пород. Это свидетельствует о синергизме действия компонентов МВ. Следует также отметить, что вводимые добавки приводят к снижению убыли массы битума после прогрева в условиях испытания.

Для изучения влияния МВ на физико-механические свойства асфальтобетонных смесей приготавливали мелкозернистые смеси типа Б, 2-й марки для II дорожно-климатической зоны, мас. %:

Щебень карьера «Мазульский» фракции 15–5 мм	32
Песок дробленый фракции 5–0 мм .....	60
Минеральный порошок .....	8
Органическое вяжущее (сверх 100 %) .....	6,8

В качестве минерального порошка использовалась фракция  $\varnothing \leq 0,071$  мм ( $\geq 90\%$ ) помола мраморной крошки. Органическое вяжущее — битум БНД 90/130, модифицированный эластомером, ОСП и антиоксидантом аминного типа.

Результаты испытаний приведены в табл. 2. Показатель водонасыщения образца асфальтобетона № 1, полученного на исходном битуме, превышает требования ГОСТ 9128–2009 (1,5–4,0 %). При повышении содержания битума в смеси более 6,8 % (сверх 100), как использовано в работе, и при увеличении времени перемешивания этот показатель можно было бы ввести в рамки стандарта. Однако для более наглядной оценки влияния отдельных компонентов КМ на водонасыщение условия приготовления образцов не меняли и оставили такими же, как и при формировании контрольного образца.

Результаты показывают, что при использовании для приготовления асфальтобетонной смеси пластифицированного толуолом ДАН (образец № 2) происходит по сравнению с контрольным образцом № 1 увеличение прочности при сжатии при 20, 0 и 50 °C, повышаются коэффициенты

Таблица 2

**Свойства асфальтобетона на битумах БНД90/130, модифицированных эластомером ДАН с добавками ОСП и антиоксидантов аминного типа**

Образец	Характеристика вяжущего (6,5 % сверх 100)	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Водонасыщение, % по объему	Прочность на сжатие $R$ , МПа, при температуре, °C			Коэффициенты водостойкости, сут	
				0 $R_0$	20 $R_{20}$	50 $R_{50}$	1	14
1	Битум БНД90/130	2,61	5,2	6,1	3,2	1,2	0,86	0,75
2	Битум + 3 % ДАН	2,57	4,2	6,5	4,4	1,8	0,89	0,85
3	Битум + 3 % ДАН + 5 % ОСП	2,56	3,4	6,7	4,9	1,7	0,99	0,88
4	Битум + 3 % ДАН + 5 % ОСП + 1 % ДФ	2,64	2,4	6,9	4,8	1,8	1,05	0,89
5	Б + 3 % ДАН + 5 % ОСП + 1 % Н	2,65	2,2	7,1	5,0	1,9	1,10	0,89

кратковременной (после 1 сут водонасыщения) водостойкости  $K_{\text{в}}$  и длительной (после 14 сут водонасыщения) водостойкости  $K_{\text{в,дл}}$ . Добавление ОСП приводит к значительному уменьшению водонасыщения, дальнейшему возрастанию физико-механических показателей свойств асфальтобетона. Это можно объяснить следующими двумя факторами: пластифицирующим действием смол, способствующим улучшению процессов перемешивания компонентов асфальтобетонной смеси, формования и уплотнения при прессовании образцов, а также сцепления МВ с материалом основных пород (в нашем случае с известняковым щебнем). При использовании в составе КМ ОСП и антиоксидантов аминного типа прочность на сжатие при 0, 20 и 50 °C возрастает в большей степени, уменьшается водонасыщение, повышаются коэффициенты водостойкости  $K_{\text{в}}$  и  $K_{\text{в,дл}}$ , что свидетельствует об улучшении качества асфальтобетонной смеси по сравнению со смесью на исходном битуме и асфальтобетонной смесью на основе битума с добавлением пластифицированного толуолом ДАН. Полученные экспериментальные данные, по-видимому, объясняются тем, что в присутствии смол пиролиза и антиоксидантов повышается адгезия МВ в целом к минеральным компонентам асфальтобетона: материалам как основных, так и кислых пород (к щебню и песку). Это достигается за счет применения всех указанных добавок в комплексе.

Таким образом, совместное усиливающее положительное влияние отстойных пиролитических смол, синтетических полимеров и промышленных антиоксидантов аминной природы на свойства битума и асфальтобетонных смесей доказывает синергизм их действия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чан, Н.Х. Комплексно-модифицированный асфальтобетон повышенной стойкости к воздействиям жаркого и влажного климата [Текст] / Н.Х. Чан, И.В. Мардиросова, О.А. Балабанов // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 7. — С. 54–61.
2. Ахмедзаде, П. Комбинированное использование талового пека и полибутадиена в асфальтобетонных смесях [Текст] / П. Ахмедзаде // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2004. — № 4. — С. 18–21.
3. Золоторёв, В.А. Совместное влияние полимеров и поверхностно-активных веществ на сцепление битумов и водостойкость асфальтобетонов [Текст] / В.А. Золоторёв, С.В. Кудрявцева, С.В. Ефремов, Е.Н. Агеева // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2007. — № 3. — С. 33–35.
4. Киселёв, В.П. Оценка адгезионных и когезионных свойств модифицированных дорожных битумов [Текст] / В.П. Киселёв, А.А. Ефремов, М.Б. Бугаенко, Н.В. Кеменев, В.С. Филимонов // Вестн. Том. гос. архитектурно-строит. ун-та. — 2010. — № 4. — С. 129–138.

*КИСЕЛЕВ Владимир Петрович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Wkiselev001@yandex.ru*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

*ШЕВЧЕНКО Валентина Аркадьевна, канд. техн. наук, проф.; E-mail: kafsmi@mail.ru*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

*БУГАЕНКО Максим Борисович, инж.; E-mail: Porosha223@yandex.ru*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

*ИВАНОВА Людмила Алексеевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: lusya54@yandex.ru*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

*ВОРОНЧИХИН Василий Дмитриевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: wd-77@mail.ru*

*Сибирский государственный технологический университет, г. Красноярск*

**Kiselev Vladimir Petrovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Wkiselev001@yandex.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Shevchenko Valentina Arkadievna**, candidate of technical sciences, professor; E-mail: kafsmi@mail.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Bugaenko Maxim Borisovich**, engineer; E-mail: Popowa223@yandex.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Ivanova Lyudmila Alekseevna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: lusya54@yandex.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Voronchihin Vasily Dmitrievich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: wd-77@mail.ru, Siberian State Technological University, Krasnoyarsk, Russia

## **USAGE OF PYROLYSIS RESIN, ANTIOXYGENS AND BUTADIENE ACRYLONITRILE RUBBER RESIN FOR MODIFYING PROPERTIES OF BITUMEN AND ROAD CONCRETE MIX**

The article deals with the impact on properties of the binder with different action members which are constituents of integrated modifying agent. Performance of increasing physical and mechanical properties of the binder and asphalt concrete is estimated when separate and combined introducing polymeric additives, such as butadiene and acrylonitrile copolymers, settling-vat pyrolysis resin of raw wood as well as amine antioxidant into bitumen.

**Key words:** bitumen, asphalt concrete, integrated modifying agent, settling-vat pyrolysis resin, butadiene and acrylonitrile copolymer, antioxidants.

### REFERENCES

1. Chan, N.Kh. Upgrade integrated bitumen concrete with the increased resistance to the impact of hot and wet climate [Text] / N.Kh. Chan, I.V. Mardirosova, O.A. Balabannov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 7. — P. 54–61.
2. Ahmedzade, P. Combined usage of gal pitch and polybutadiene resin in road concrete mix [Text] / P. Ahmedzade // Science and Machinery in Road Industry. — 2004. — N 4. — P. 18–21.
3. Zolotarev, V.A. Combinmed impact of polymers and superficially active substance on bitumen cohesion and water-resisting properties of road concrete mix [Text] / V.A. Zolotarev, S.V. Kudrevtseva, S.V. Efremov, E.N. Ageeva // Science and Machinery in Road Industry. — 2007. — N 3. — P. 33–35.
4. Kiselev, V.P. Estimation of adhesive and cohesive properties of upgrade road bitumen [Text] / V.P. Kiselev, A.A. Efremov, M.B. Bugaenko, N.V. Kemenev, V.S. Filimonov // Vestnik Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. — 2010. — N 4. — P. 129–138.

# ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.003:658.012.2

С.А. БОЛОТИН, А.Х. ДАДАР, З.Х. ООЛАКАЙ, Г.С. ЧЕБОКЧИНОВА

## МЕТОДИКА ДЕТАЛИЗАЦИИ «НОВЫХ» НОРМ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИКИ СНиП 1.04.03–85

Предлагается методика детализации «новых» норм продолжительности строительства с использованием нормативной статистики отмененных норм продолжительности работ, с трансформированием их в соответствующие регрессионные зависимости.

**Ключевые слова:** нормы продолжительности, регрессионная зависимость, статистика.

Известно, что основой календарного планирования строительства являются организационно-технологическая схема возведения соответствующего объекта [1] и нормы продолжительности строительства [2]. В декабре 2010 г. Министерством регионального развития приняты новые нормы продолжительности строительства, которые определяют продолжительности двух периодов строительства — подготовительного и основного. Однако даже для календарного планирования, осуществляемого в составе проекта организации строительства, такой детализации, на наш взгляд, явно не достаточно, так как при организационном проектировании, как минимум, необходимо учитывать продолжительности работ нулевого цикла, возведения надземной части здания и его внутренних работ. Кроме того, и количества норм, приведенных в новом документе, даже для наиболее представительного класса жилых зданий недостаточно, и эта недостаточность сводит на нет рекомендацию принятого норматива к использованию экстраполяционно-интерполяционных процедур, поскольку в некоторых случаях в нормах присутствует всего лишь один объект-представитель.

В этом отношении гораздо более представительны «старые» нормы, определенные в СНиП 1.04.03–85\* [3], которые, по нашему мнению, могут служить статистической основой для рекомендаций по применению экстраполяционно-интерполяционных процедур. В качестве примера, подтверждающего представительность «старых» норм, можно привести нормы продолжительности строительства жилых зданий, с учетом их современной типологии и с числом этажей 5 и более. В данном нормативе содержится достаточно презентативный массив, включающий 27 норм для монолитных зданий, 20 — для кирпичных и 27 норм для панельных

зданий. В качестве основных параметров в «старых» и новых нормах, кроме типа здания, указываются общая площадь и число этажей, и поэтому от них должны зависеть нормы продолжительности отдельных циклов работ. Для примера рассмотрим нормативную статистику кирпичных зданий, представленную в табл. 1.

Анализируя структуру продолжительности циклов основных работ, приходим к следующим выводам. Для подготовительного периода всех типов зданий как в «старом» СНиПе, так и в новом нормативе отводится 1 мес. Считаем, что продолжительность работ нулевого цикла (НЦ) функционально зависит от общей площади здания, так она определяет главную нагрузку на его основание и фундамент. Аналогичный вид регрессионной зависимости может быть принят и для аппроксимации отдельных работ (отд), объем и продолжительность которых также линейно связаны с общей площадью здания. В регрессионную зависимость продолжительности работ по надземной части (НЧ) здания следует добавить учет его этажности исходя из того, что продолжительность работ по каждому последующему этажу будет возрастать на некоторую постоянную величину по сравнению с предыдущим этажом. Тогда суммируя добавки по всем этажам и ограничиваясь старшей степенью итогового выражения, принимаем, что общая добавка будет пропорциональна квадрату числа этажей здания.

Таблица 1  
Нормативная статистика кирпичных зданий [2]

Число этажей <i>N</i>	Общая площадь <i>F</i> , м <sup>2</sup>	Норма продол. <i>T</i> , мес.	В том числе по циклам				Распределение стоимости, %			
			подгото- вка	нулевой цикл	над- земная часть	отделка	подго- товка	нулевой цикл	над- земная часть	отделка
5	1500	6,5	1	1,0	3,0	1,5	7	9	63	21
5	2500	7,0	1	1,0	3,5	1,5	7	7	67	19
5	4000	8,0	1	1,0	4,5	1,5	7	11	66,5	15,5
5	6000	9,0	1	1,0	5,5	1,5	6	11	75	8
9	3000	8,0	1	1,0	4,5	1,5	9	15	64,5	11,5
9	6000	10,0	1	1,5	5,5	2,0	7	19,5	58,5	15
9	8000	11,0	1	1,5	6,5	2,0	5	12,5	65,5	17
9	10000	12,0	1	1,5	7,5	2,0	5	12,5	69,5	13
9	12000	12,5	1	1,5	8,0	2,0	5	3,5	78	13,5
10	3500	8,0	1	1,0	4,5	1,5	9	15	64,5	11,5
10	7000	9,5	1	1,0	5,5	2,0	6	4	75	15
10	9000	10,5	1	1,5	6,0	2,0	6	6	72,5	15,5
10	11000	11,5	1	1,5	7,0	2,0	6	3,5	77	13,5
10	13000	12,5	1	1,5	8,0	2,0	5	3,5	78	13,5
12	4000	9,5	1	1,5	5,0	2,0	6	6,5	68,5	19
12	8000	10,5	1	1,5	6,0	2,0	6	6	72,5	15,5
12	12000	13,5	1	2,0	8,5	2,0	6	4	79	11
14	5000	9,5	1	1,5	5,0	2,0	6	6,5	68,5	19
14	8000	11,0	1	1,5	6,5	2,0	5	12,5	65,5	17
14	12000	13,5	1	2,0	8,5	2,0	6	4	79	11

В результате обработки статистического массива, представленного в табл. 1, получены следующие регрессионные зависимости:

$$T_{\text{НЦ}}^k = 0,885 + 0,000067F,$$

$$T_{\text{НЧ}}^k = 2,622 + 0,000418F + 0,00284N^2, \quad (1)$$

$$T_{\text{отд}}^k = 1,505 + 0,000047F.$$

Проверка этих зависимостей показала, что с учетом округления до 0,5 мес. полное совпадение достигнуто: для нулевого цикла в 65 % случаев, для надземной части в 30, а для цикла отделочных работ в 85 % случаев. При расхождении в 0,5 мес. и менее — совпадение в 100 % случаев.

По результатам обработки статистических массивов монолитных и панельных зданий получены регрессионные зависимости (табл. 2).

Таблица 2  
Регрессионные уравнения по продолжительности циклов работ,  
выполняемых при строительстве жилых зданий

Тип здания	Цикл работ	Свободный член	Коэффициент		$P$ при $\Delta = 0,5$
			при $F$	при $N^2$	
Кирпичное	Нулевой	0,885	0,000067		1,00
	Надземная часть	2,622	0,000417	0,00284	1,00
	Отделка	1,505	0,000047		1,00
Монолитное	Нулевой	0,570	0,000106		0,71
	Надземная часть	3,041	0,000364	0,00354	0,77
	Отделка	0,837	0,000118		0,85
Панельное	Нулевой	0,856	0,000049		1,00
	Надземная часть	2,284	0,000168	0,00265	0,81
	Отделка	0,872	0,000049		0,97
Кирпично-монолитное	Нулевой	0,684	0,000093		
	Надземная часть	2,863	0,000384	0,00340	
	Отделка	1,101	0,000093		

Сравнение трех типов зданий показало, что вероятность ( $P$ ) отклонения продолжительности, рассчитанной по полученным регрессионным уравнениям, от данных по нормативной статистике, определенное порогом в 0,5 мес. и менее, составила более 71 %.

По отношению к данным СНиП, которые соответствовали статистике, полученной до 1990 г., в современном строительстве жилых зданий распространены и кирпично-монолитные дома. Для регрессионного описания продолжительности основных циклов работ по этому типу зданий нами объединена статистика по кирпичным и монолитным домам и получены соответствующие регрессионные уравнения.

Для дополнительного подтверждения адекватности полученных уравнений рассмотрим экономический критерий, основанный на анализе чувствительности проекта к вариации структуры продолжительности отдельных циклов работ. В методических рекомендациях [4] преемственной оценкой экономической эффективности проектов является

чистый дисконтированный доход, однако его вычисление связано с наличием количественной информации о доходном периоде строящегося объекта, которая, особенно на ранней стадии проектирования, может отсутствовать. Данное ограничение можно обойти, если воспользоваться расчетом показателя, получившего название «минимальная стоимость виртуальной продажи»<sup>1</sup>.

По определению, минимальной стоимостью виртуальной продажи (*VS*) является стоимость возможной продажи объекта, при которой его застройщик получает заданный им процент дохода на инвестированный в объект капитал,

$$VS = \int_0^T (1+E)^{T-t} c(t) dt, \quad (2)$$

где *T* — норма продолжительности строительства;

*E* — норма дохода на инвестируемый капитал;

*c(t)* — распределение капитальных вложений по времени.

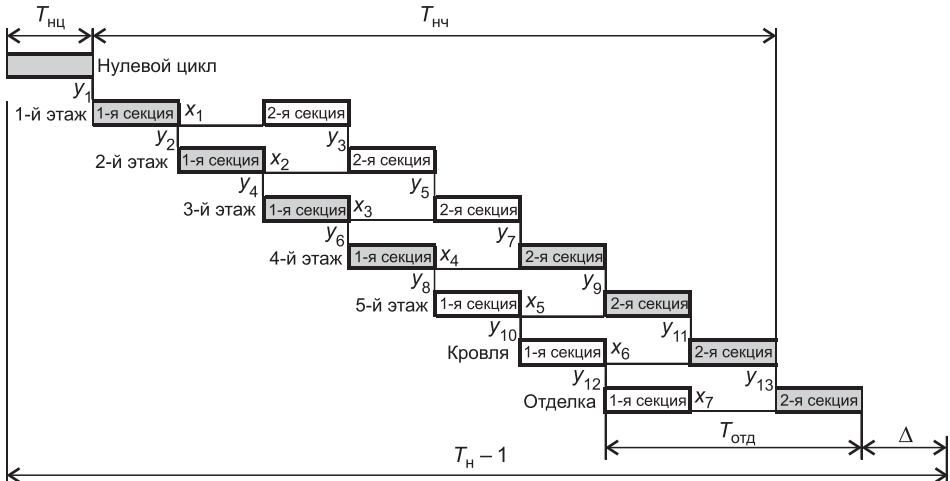
Методика анализа чувствительности сводилась к следующему. В качестве стоимости работ по основным циклам принято нормативное распределение, представленное данными последних четырех столбцов табл. 1. В качестве продолжительности циклов работ использовались нормативные данные и продолжительности, рассчитанные по регрессионным формулам табл. 2. Для примера приведем данные расчета показателей эффективности по 9-этажному монолитному зданию общей площадью 12000 м<sup>2</sup>, для которого расхождение продолжительности для каждого цикла составило 1 мес., что отражает самый неблагоприятный случай. Минимальная стоимость виртуальной продажи для нормативного распределения продолжительности равна 104,9 %, а для регрессионного — 104,8 %, что показывает хорошее совпадение.

По представленным в табл. 2 регрессионным выражениям рассчитываются только отдельные продолжительности основных циклов работ. В итоге суммарная продолжительность может отличаться от нормативной продолжительности, определенной в нормативе [1], и это отличие будет также зависеть от принятой организационно-технологической схемы строительства. Поэтому для четкого соответствия между продолжительностью отдельных циклов работ и общей нормативной продолжительностью нами использована следующая расчетная схема. Для наглядности покажем ее действие на примере организационно-технологической схемы, приведенной на рисунке.

Из нормативной продолжительности строительства *T<sub>н</sub>* вычтем продолжительность работ подготовительного периода, которая для всех жилых зданий, представленных в работе [2], равна 1 мес. Продолжительность строительства по регрессионным уравнениям и по принятой организационно-технологической схеме будет отличаться на величину *Δ*. Начальная продолжительность работ нулевого цикла, рассчитанная из соответствующего регрессионного уравнения, равна *t<sub>0</sub>*. Начальная продолжительность отделочного цикла работ *T<sub>отд</sub>* должна быть распределена между секциями здания пропорционально их площади и составит *t<sub>71</sub>* и *t<sub>72</sub>*.

---

<sup>1</sup> Болотин С.А. Оценка строительства социальных объектов по минимальной стоимости виртуальной продажи // Оценочные технологии в экономических процессах. СПб.: Инжэкон, 2002. С. 148–151.



Пример расчетной организационно-технологической схемы строительства 2-секционного 5-этажного жилого дома

соответственно. Также пропорционально площадям секций распределяется рассчитанная по регрессионному уравнению продолжительность работ по надземной части  $T_{\text{нч}}$ . Для учета связей между работами введены соответствующие переменные:  $x_1-x_7$  имитируют ресурсные связи, а переменные  $y_1-y_{13}$  — фронтальные связи (использована терминология из работы<sup>2</sup>). С учетом введенных обозначений для всех путей, соединяющих начальное и конечное событие, можно составить систему линейных неравенств. В качестве примера покажем, что для пути, выделенного на рисунке тонированными прямоугольниками, линейное неравенство имеет следующий вид

$$\alpha_0 t_0 + \alpha_1 (t_{11} + t_{21} + t_{31} + t_{41} + t_{42} + t_{52}) + \alpha_2 t_{62} + \alpha_3 t_{72} + x_4 + y_1 + y_2 + y_4 + y_6 + y_9 + y_{11} + y_{13} \leq T_{\text{н}} - 1. \quad (3)$$

В данное неравенство помимо продолжительностей и связей включены управляемые переменные  $\alpha$ , показывающие во сколько раз можно увеличить (уменьшить) первоначальные продолжительности работ так, чтобы общая продолжительность строительства была равна нормативу. Индексы переменных последовательно соответствуют работам: нулевого цикла, надземной части, кровельным и отделочным. Критерием поиска оптимального варианта является максимальная суммарная продолжительность всех работ, рост которой приводит к минимизации числа исполнителей работ<sup>3</sup>. Пример формализованного представления целевой функции дан в виде следующей формулы

$$\alpha_0 t_0 + \alpha_1 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^5 t_{ij} + \alpha_2 (t_{61} + t_{62}) + \alpha_3 (t_{71} + t_{72}) \Rightarrow \max. \quad (4)$$

Таким образом, пример показывает, что поставленная задача сводится к решению стандартной задачи линейного программирования. Однако

<sup>2</sup> Афанасьев В.А. Поточная организация строительства. М.; Л.: Стройиздат, 1990.

<sup>3</sup> Болотин С.А., Рунковский О.Н. Максимизация продолжительностей работ всех исполнителей в расписаниях СМР // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1990. № 11. С. 66–70.

при этом можно выделить одну особенность, касающуюся возможного возникновения несовместной системы неравенств. Дело в том, что введенная в неравенства величина  $\Delta$  может принимать отрицательные значения. Актуальность решения подобного рода задач календарного планирования была показана в монографии<sup>4</sup>.

Обобщение представленной методики можно свести к следующему резюме. Существующие нормы продолжительности строительства можно дифференцировать по циклам основных видов работ, используя при этом нормативную статистику отмененных норм продолжительности работ, трансформируя их в соответствующие регрессионные зависимости. Дополнительный учет организационно-технологической схемы строительства позволяет составить и решить задачу линейного программирования по оптимальному распределению продолжительности основных циклов работ, которое обеспечит точное совпадение общей продолжительности строительства объекта с его заданным нормативным значением.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию: Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 г. № 87. — М., 2008.
2. Нормативы продолжительности строительства: утверждены приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 21.12.2010 г. № 746.
3. СНиП 1.04.03–85. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений [Текст]. — М., 1991.
4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования [Текст]. — М. : Экономика, 2000.

*БОЛОТИН Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sbolotin@mail.ru  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

*ДАДАР Алдын-кыс Хунаевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: daryi@mail.ru  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

*ООЛАКАЙ Зита Хулер-ооловна, асп.; E-mail: sita-hertek@mail.ru  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

*ЧЕБОКЧИНОВА Гульмира Станиславовна, асп.; E-mail: chebokchinova@rambler.ru  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено после доработки 29.03.13

**Bolotin Sergey Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sbolotin@mail.ru, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Dadar Aldyn-kys Khunaevna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: daryi@mail.ru, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Oolakay Zita Khuler-oоловна**, post-graduate student; E-mail: sita-hertek@mail.ru, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Chebokchinova Gulmira Stanislavovna**, post-graduate student; E-mail: chebokchinova@rambler.ru, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

<sup>4</sup> Климов С.Э. Методология календарного планирования строительного производства в суровых условиях Крайнего Севера. СПб.: СПбГАСУ, 2005. С. 107.

**PROCEDURE OF DETAILED ESTIMATION  
OF A «NEW» STANDARD CONSTRUCTION TIME BASED  
ON THE STATISTICS OF THE LOCAL BUILDING  
REQUIREMENTS 1.04.03–85**

There has been suggested a procedure of developing in detail the «Nev» standard construction time using the standard statistics of the old (withdrawn) Standard construction time, the latter being transformed into corresponding regressive relationships.

**Key words:** standard time, regressive relationship, statistics.

**REFERENCES**

1. On the sections of the design documentation and content requirements: RF Government Resolution N 87. — M., 2008.
  2. Standard construction time. Approved by Order N 746 as of December 21, 2010 of the Ministry of regional development of the Russian Federation.
  3. SN&R 1.04.03–85. Standard construction and backlog time in the construction of industrial premises, buildings and facilities [Text]. — M., 1991.
  4. Guidelines for evaluation of projects investment efficiency and their selection for the financial support [Text]. — M. : Ekonomika, 2000.
-

**УДК 693.547.3:624.131**

**Д.Н. ГОЛУБЕВА, М.М. ТИТОВ**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТОГРЕВА  
МЕРЗЛОГО ГРУНТА ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ  
КОНСТРУКЦИЙ ФУНДАМЕНТОВ**

Рассматриваются постановка и решение тепловой задачи отогрева промороженного грунтового основания. Приведены графики для определения температуры поверхности нагревателя и времени прогрева грунта на глубину 30 см до 0 °C, в зависимости от разных мощностей нагревателя и различной температуры поверхности грунтового массива.

**Ключевые слова:** мерзлый грунт, отогрев, фундамент, зимнее бетонирование, бетон.

При устройстве фундаментной части здания в зимний период года после укладки бетонной смеси на промерзшее грунтовое основание в бетоне возникает температурный градиент по направлению к мерзлому грунту. При этом, если тепла, внесенного в бетонную смесь, недостаточно для отогрева грунта, возникает вероятность замерзания бетона на границе контакта с мерзлым грунтом и как следствие недобор бетоном подошвы фундамента критической прочности.

СНиП 3.03.01–87\* п. 2.56 исключает возможность замерзания смеси в зоне контакта с основанием. «Состояние основания, на которое укладываются бетонная смесь, а также температура основания и способ укладки должны исключать возможность замерзания смеси в зоне контакта с основанием» [1].

Рекомендации по электрообогреву монолитного бетона [2] говорят о том, что «промерзшее грунтовое или искусственное основание при зимнем бетонировании монолитных конструкций фундаментов, как правило, необходимо отогреть на всю глубину промерзания до температуры 5–10 °C. При большой толщине мерзлого грунтового основания необходимо оттаивать его не менее чем на  $\frac{3}{4}$  глубины промерзания и не менее чем на 500 мм для связных и 300 мм для несвязных грунтов. Размеры участков отогретого основания должны выступать за внешний обрез бетонируемых конструкций по всему периметру на двойную глубину оттаивания, но не менее чем на 1 м».

Таким образом, в процессе реализации технологии зимнего бетонирования монолитных конструкций фундаментов зданий как для энергосбережения, так и для оптимального использования тепла, внесенного в грунтовый массив при его отогреве, а также выполнения требований и рекомендаций [1–3], необходим достоверный метод расчета прогноза температурного поля грунтового массива при его прогреве до оптимальной температуры, обеспечивающей выполнение технологических операций и набора бетона подошвы фундамента критической прочности.

Математическая постановка задачи (в упрощенном виде) отогрева и прогрева промороженного грунтового основания с плоским поверх-

ностным нагревателем может быть представлена в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} 1. \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a_{\text{T}} \frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2}; \\ 2. \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a_{\text{M}} \frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2}; \\ 3. t(x,0) = f_1(x); \\ 4. \lambda \frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x} = \alpha [t(0,\tau) - f_2(\tau)]; \\ 5. \frac{\partial t(\infty,\tau)}{\partial x} = 0; \\ 6. t(x,\tau) \Big|_{x=z-0} = t(x,\tau) \Big|_{x=z+0} = t; \\ 7. \lambda_{\text{M}} \frac{\partial t(z,\tau)}{\partial x} - \lambda_{\text{T}} \frac{\partial t(z,\tau)}{\partial x} = W \frac{dz}{d\tau} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где 1.1 — дифференциальное уравнение теплопроводности в таловой зоне грунтового массива;

1.2 — дифференциальное уравнение теплопроводности в мерзлой зоне грунтового массива. Величина  $a_{\text{M,T}} = \frac{\lambda_{\text{M,T}}}{C_{\text{M,T}}}$ ,  $\text{м}^2/\text{ч}$ , носит название «коэффициента температуропроводности» материала соответственно для мерзлого и талого грунтового массива и характеризует способность среды выравнивать свою температуру;

1.3 — начальное условие;

1.4 — граничное условие III рода на поверхности грунтового основания;

1.5 — граничное условие I рода, задается закон распределения температуры на бесконечной границе тела;

1.6 — условия на фазовой границе оттаивания и замерзания грунтового массива;

1.7 — классическое граничное условие Стефана на границе раздела фаз при замерзании (оттаивании) влаги, здесь  $W = \epsilon \rho_{\text{св}} \omega$ , это скрытая теплота фазовых переходов по рассматриваемой оси,  $\epsilon$  — удельная теплота плавления льда (334 кДж/кг).

Поставленную выше задачу можно решить при помощи комбинированного сеточного метода [4]. Суть комбинированного сеточного метода заключается в следующем: в узлах расчетной области, не смежных с фронтом фазового перехода, температура определяется из явной разностной схемы, а для точек смежных узлов — из неявной. Реализация этой задачи осуществлялась при помощи комбинированного сеточного метода в программном продукте MAPLE\_12, а также моделирование процесса отогрева производилось в ELCUT (профессиональная версия).

Для изучения изменения температурного поля в грунтовом массиве зимой 2011/12 г. был проведен эксперимент с грунтом ненарушенного строения в полевых условиях. С момента включения нагревателя до момента достижения 0 °С на глубине 30 см потребовалось 54 ч. В качестве нагревателя использовался термоэлектромат.

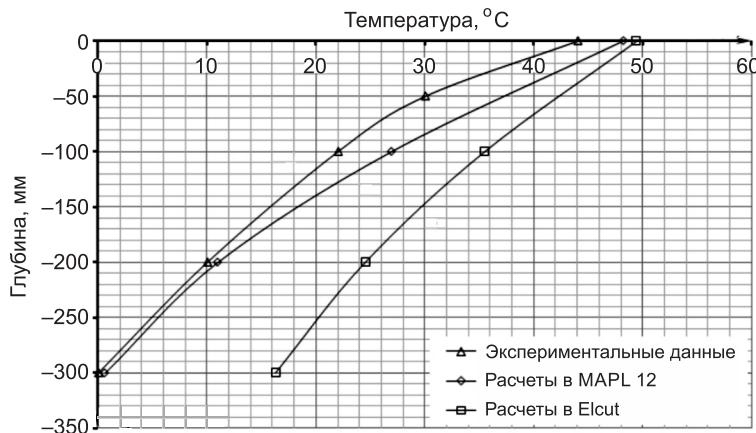


Рис. 1. Температурные поля в грунтовом массиве в момент времени, равный 54 ч от момента начала оттаивания грунта, полученные при помощи ELCUT 5.7, MAPL\_12 и экспериментально

Температурные поля грунтового массива, полученного в результате обработки экспериментальных данных и расчета при помощи комбинированного сеточного метода и моделирования процесса отогрева, приведены на рис. 1.

Расхождения температурных полей, полученных экспериментальным путем и расчетным образом в программном продукте ELCUT, возможно, связаны с тем, что из-за сложности определения теплофизических характеристик грунтового массива (теплопроводность  $\lambda$ , Вт/(м · °C), удельная теплоемкость  $C$ , Дж/(кг · °C)) эти значения, основываясь на влажности

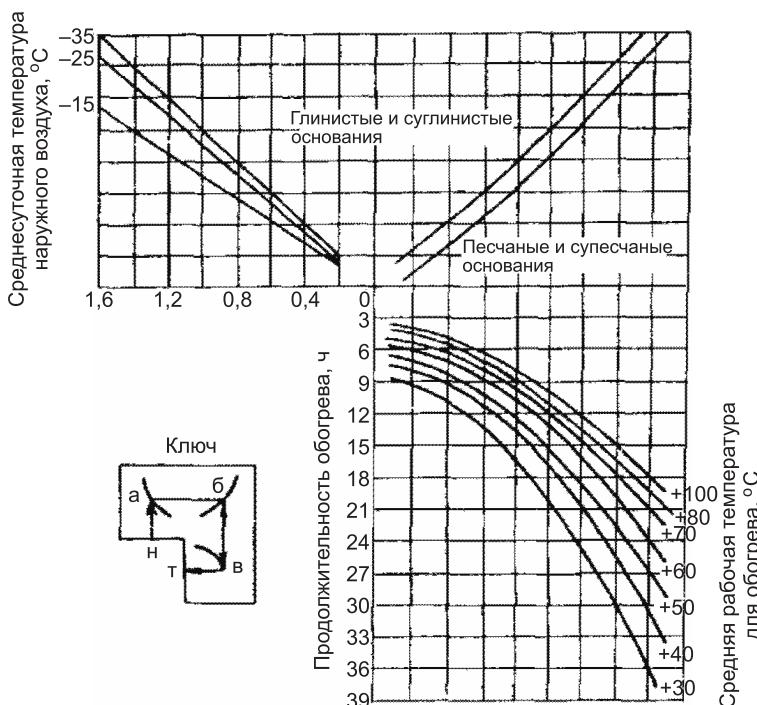


Рис. 2. Номограмма для определения ориентировочной продолжительности оттаивания и отогрева мерзлых грунтовых оснований нормальной влажности

и плотности грунта, были взяты из СНиП 2.02.04–88, а не установлены экспериментально.

Значительную роль играет отсутствие 100%-го теплового контакта поверхности нагревателя и грунтового массива в реальных условиях, тогда как в программе ELCUT предполагалось, что этот контакт составляет 100 %.

Расхождения с MAPLE\_12 могут появиться из-за упрощений, внесенных при написании программы, таким образом, необходима ее дальнейшая доработка.

Предварительные расчеты продолжительности оттаивания и прогрева основания могут быть произведены с помощью номограммы (рис. 2), построенной на основании большого объема экспериментальных исследований Центрального научно-исследовательского и проектно-экспериментального института организации, механизации и технической помощи строительству Госстроя СССР [2].

Решение математической модели (1) и применение номограммы (см. рис. 2) для нахождения времени отогрева промороженного грунтового основания основываются на том, что известна температура нагревателя, в то время как на практике определена только мощность нагревателя. Строителям крайне важно иметь решение приведенной выше задачи через известную удельную мощность нагревателя,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , через которую можно получить все другие теплотехнические параметры (глубина и время прогрева в зависимости от мощности, температуры наружного воздуха и начального распределения температур грунтового массива). Для этого при помощи программного продукта ELCUT (профессиональная версия) были построены графики для определения температуры поверхности нагревателя в зоне контакта с мерзлым грунтом и времени прогрева промороженного грунтового основания в зависимости от удельной мощности нагревателя и теплофизических характеристик грунта.

На рис. 3 и 4 приведены примеры графиков для определения времени отогрева песка разной крупности (плотность  $\rho = 1400 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

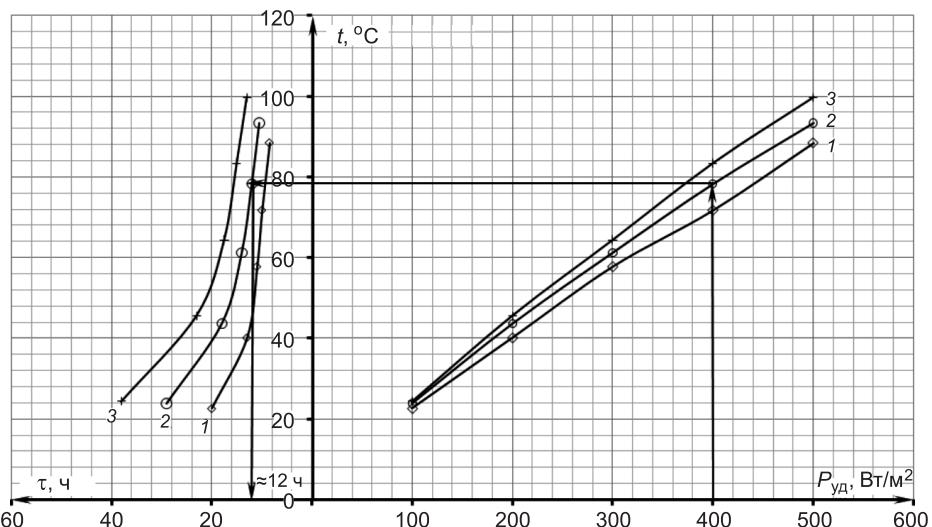


Рис. 3. График для определения температуры поверхности термоэлектротомата и времени прогрева песка разной крупности на глубину 30 см до 0 °C в зависимости от удельной мощности термоэлектротомата, при температуре поверхности грунтового массива  $-5, -10, -15, -20, -25, -30 \text{ °C}$ , при толщине утеплителя — вспененного полиэтилена  $\delta = 0,01 \text{ м}$ ,

$$K_{\text{пр}} = 3,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}), R = 0,29 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$$

1 —  $-10 \text{ °C}$ , 2 —  $-20 \text{ °C}$ , 3 —  $-30 \text{ °C}$

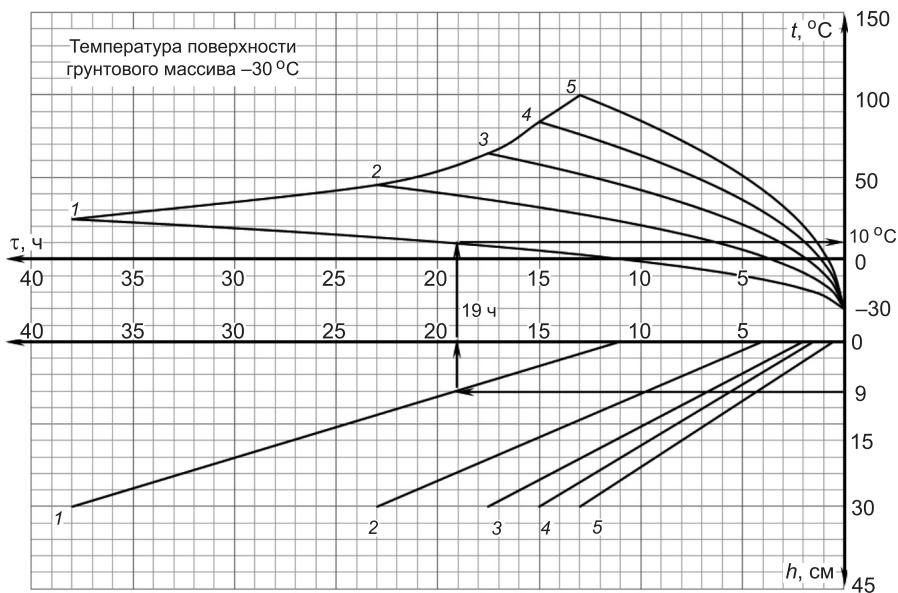


Рис. 4. График для определения примерного времени прогрева песка разной крупности на различную глубину до 0 °C в зависимости от удельной мощности нагревателя, при температуре поверхности грунтового массива -30 °C, толщине утеплителя — вспененного полиэтилена  $\delta = 0,01$  м,  $K_{\text{нр}} = 3,4$  Вт/(м<sup>2</sup> · °C),  $R = 0,29$  м<sup>2</sup> · °C/Вт

влажность  $\omega = 0,2$ ; теплопроводность  $\lambda_{\text{тал}} = 1,57$  Вт/(м · °C),  $\lambda_{\text{мер}} = 1,86$  Вт/(м · °C); объемная теплоемкость  $C_{\text{тал}} = 1771$  Дж/(м<sup>3</sup> · °C),  $C_{\text{мер}} = 1350$  Дж/(м<sup>3</sup> · °C)). Данного типа графики были построены для различных грунтов, имеющих различные теплофизические характеристики.

Следует отметить, что графики (см. рис. 3, 4) были построены в предположении, что между поверхностью нагревателя и проморожденного грунтового основания имеется 100%-й тепловой контакт, которого в реальных условиях достичь очень сложно, поэтому построенные графики требуют уточнения в зависимости практики применения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 3.03.01-87\*. Несущие и ограждающие конструкции. — М. : ЦИПТ Госстроя СССР, 1988. — 192 с.
2. Рекомендации по электрообогреву монолитного бетона и железобетона нагревательными проводами / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. — М. : Изд-во ЦНИИОМТП, 1989. — 67 с.
3. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях в районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. — М. : Стройиздат, 1982. — 213 с.
4. Доленко, П.Д. Обогрев мерзлых массивов при бетонировании гидротехнических сооружений в зимних условиях: дис... канд. техн. наук : 5.23.07 [Текст] / П.Д. Доленко. — Новосибирск, 1988. — 156 с.

**ТИТОВ Михаил Михайлович, д-р техн. наук, доц.**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

**ГОЛУБЕВА Дарья Николаевна, асп.**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 19.03.13

**Titov Mikhail Mikhailovich**, doctor of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia  
**Golubeva Dariya Nikolaevna**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **USING TECHNOLOGY THAWING OF FROZEN SOIL IN CONCRETING FOUNDATION DESING**

We consider the formulation and solution of the heat problem promorozhennaya thawing of the soil foundation. The graphs for determining the surface temperature of the heater and the warm soil to a depth of 30 cm to 0 °C, depending on the different heater power, and varying the surface temperature of the soil mass.

**Key words:** frozen ground, warm, foundation, winter concreting, concrete.

### REFERENCES

1. SN&R 3.03.01-87\*. Bearing and protecting designs. — M. : USSR State TSIPT, 1988. — 192 p.
  2. Recommendations for electrical heating of monolithic concrete and reinforced concrete heating wires / TSNIIOMTP State Construction SSSR. — M. : Publishing House of the TSNIIOMTP, 1989. — 67 p.
  3. Guidelines for the production of concrete work in winter conditions in the Far East, Siberia and the Far North / TSNIIOMTP SSSR. — M. : Stroyizdat, 1982. — 213 p.
  4. Dolenko, P.D. Heating frozen arrays for concreting waterworks in winter : the dissertation for the degree of cand. tehn. sciences : 5.23.07 [Text] / P.D. Dolenko. — Novosibirsk, 1988. — 156 p.
-

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.511:533.6

И.Н. ЛОГАЧЕВ, К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА, И.В. КРЮКОВ

### ОСОБЕННОСТИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА В ПЕРЕГРУЗОЧНОМ ЖЕЛОБЕ С КОМБИНИРОВАННОЙ БАЙПАСНОЙ КАМЕРОЙ\*

#### Сообщение 2. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА<sup>1</sup>

Получены и решены гидродинамические уравнения для оценки межкомпонентного взаимодействия в вертикальном перфорированном желобе при перемещении в них гравитационных потоков сыпучего материала и эжектируемого воздуха. Рассмотрен случай, когда рециркуляция восходящего в байпасной камере воздуха осуществляется как через отверстия равномерной перфорации стенок желоба, так и через торцевые отверстия на концах байпасной камеры. Определены параметры, обеспечивающие наибольшее снижение объемов эжекции за счет рециркуляции воздуха.

Ключевые слова: аспирация, перегрузки сыпучих материалов, эжекция воздуха.

В данной статье излагаются заключающие исследования, изложенные в серии статей [1–4].

**3. Эффективность комбинированного байпасирования.** Вернемся к общей постановке задачи. Оценим насколько изменится рецикл воздуха с двумя кольцами циркуляции. Для этого линеаризуем исходные уравнения (4) и (5), положив:

$$udu \approx \bar{u}du,$$

$$\omega d\omega \approx \bar{\omega}d\omega.$$

Несмотря на столь грубое упрощение с математической точки зрения, получаемые результаты, как мы видели раньше, существенно не отличаются от «точных» решений исходной системы нелинейных уравнений. Связано это с тем, что потери давления при движении воздуха в рассматриваемых каналах главным образом определяются местными потерями, а не изменением скоростного давления.

Кроме того, примем линейный закон изменения массовых сил межкомпонентного взаимодействия в потоке сыпучего материала:

$$Le \frac{|v-u|(v-u)}{v} \approx Le k(v-u), \quad (24)$$

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проекты НШ-588.2012.8), РФФИ (проект №12-08-97500-р\_центр\_a), плана стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

<sup>1</sup> См.: Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Крюков И.В. Особенности рециркуляции воздуха в перегруженном желобе с комбинированной байпасной камерой. Сообщ. 1. Основные уравнения // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 4. С. 62–71.

© Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Крюков И.В., 2013

$$k = \sqrt{1 - \frac{u}{v}} \approx 1 - \frac{\bar{u}}{\bar{v}}.$$

Черта над буквой (выражением) обозначает осреднение величины по длине желоба (или байпасной камеры).

Для того чтобы упростить правую часть линейного уравнения, заменим равноускоренный поток материала на ускоренный (условный) поток, скорость которого определяется трехчленом  $\bar{v} = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 / 2$ . Тогда усредненная скорость потока частиц

$$\bar{v} = b_0 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{6},$$

где  $b_0 = n$ ;  $b_1 = \sqrt{8(1+n^2)} - 3n - 1$ ;  $b_2 = 4(1+n - \sqrt{2(1+n^2)})$ .

Что касается потерь давления в перфорационных отверстиях стенок желоба, положим, что они зависят линейно (а не квадратично) от скорости

$$p_\omega - p_u = \zeta_0 |\bar{w}| w,$$

где  $|\bar{w}|$  — усредненная абсолютная величина скорости перетекаемого воздуха в отверстиях;  $\zeta_0$  — коэффициент местного сопротивления (к.м.с.) отверстия (принимая, как правило,  $\zeta_0 = 2,4$  — как для отверстия в бесконечно тонкой стенке). В силу (6) последнее соотношение можем записать в виде:

$$p_\omega - p_u = \frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} \frac{du}{dx}. \quad (25)$$

С учетом упрощений исходные уравнения (4) и (5), принимая во внимание соотношение между скоростями (2)

$$\omega = \frac{u - z}{r}; \quad \bar{\omega} = \frac{\bar{u} - z}{r},$$

запишем в виде следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_\omega}{dx} + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} \frac{du}{dx} &= 0, \\ \frac{dp_u}{dx} + 4 \bar{u} \frac{du}{dx} &= k \text{Le}(v - u). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Вычитая второе уравнение этой системы из первого, получим выражение

$$\frac{d(p_\omega - p_u)}{dx} - 4 \left( \bar{u} - \frac{\bar{u} - z}{r^2} \right) \frac{du}{dx} + k \text{Le}u = k \text{Le}v,$$

которое с учетом (25) сводится к линейному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$A = 2 \left( \bar{u} - \frac{\bar{u} - z}{r^2} \right) \frac{E}{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}, \quad (27)$$

$$B = k \frac{\text{Le}E}{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}.$$

Таким образом, общая задача с комбинированным байпасированием перфорированного желоба перегрузочного узла сводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} u'' - 2Au' - Bu = -Bv, \\ dp_{\omega} + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} dw = 0 \end{array} \right\} \quad (28)$$

с краевыми условиями (7)–(12).

Решение первого уравнения этой системы имеет вид:

$$u = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x} + v - k_1 - k_2 x, \quad (29)$$

$$u' = C_1 a_1 e^{a_1 x} + C_2 a_2 e^{a_2 x} + b_1 + b_2 x - k_2, \quad (30)$$

где  $k_2 = 2b_2 \frac{A}{B}$ ;  $k_1 = 2 \frac{A}{B} (b_1 - k_2) - b_2 / B$ ;

$$a_1 = A + \sqrt{A^2 + B}; \quad a_2 = A - \sqrt{A^2 + B}.$$

Для определения констант интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  воспользуемся краевыми условиями для скорости (7) и (9):

$$\left. \begin{array}{l} u_n = C_1 + C_2 + n - k_1, \\ u_k = C_1 e^{a_1} + C_2 e^{a_2} + 1 - k_1 - k_2. \end{array} \right\}$$

Имеем:

$$C_1 = \frac{m_2 - m_1 e^{a_2}}{e^{a_1} - e^{a_2}}; \quad C_2 = \frac{m_1 e^{a_1} - m_2}{e^{a_1} - e^{a_2}},$$

где  $m_1 = u_n - n + k_1$ ;  $m_2 = u_k - 1 + k_1 + k_2$ .

Используя уравнение (25) с учетом (29), получим следующее соотношение:

$$p_{\omega} - p_u = \frac{|w| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1 x} + C_2 a_2 e^{a_2 x} + b_1 + b_2 x - k_2),$$

позволяющее на основании первых уравнений краевых условий для давлений (11) и (12) составить систему равенств:

$$\left. \begin{array}{l} \zeta_{\omega n} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} + \zeta_{un} u_n^2 = \frac{|w| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 + C_2 a_2 + b_1 - k_2), \\ \zeta_{\omega k} \frac{(u_k - z)^2}{r^2} + \zeta_{uk} u_k^2 = - \frac{|w| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1} + C_2 a_2 e^{a_2} + b_1 - k_2 + b_2). \end{array} \right\} \quad (31)$$

Для замыкания полученной системы из двух уравнений с тремя неизвестными  $u_n$ ,  $u_k$  и  $z$  воспользуемся вторым дифференциальным уравнением системы (28). Интегрируя это уравнение по всей длине каналов, получим соотношение:

$$p_{\omega}(1) - p_{\omega}(0) + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} (u_k - u_n) = 0,$$

которое с учетом вторых уравнений краевых условий для давлений (11) и (12), а также соотношений (13) и (14), дает возможность составить третье уравнение

$$p_y + \zeta_n^* z^2 + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} (u_k - u_n) = \zeta_{\omega k} \frac{(u_k - z)^2}{r^2} + \zeta_{\omega n} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} = 0, \quad (32)$$

$$\zeta_{n1}^* = \zeta_1^* + \zeta_p^* = \zeta_1 \left( \frac{\tilde{S}_u}{\tilde{f}_1} \right)^2 + \zeta_p \left( \frac{\tilde{S}_u}{\tilde{f}_p} \right)^2,$$

замыкающее систему (31).

Для решения системы уравнений (32) и (31) необходимо найти осредненные скорости воздуха, эжектируемого ( $\bar{u}$ ), рециркулируемого ( $\bar{\omega}$ ) и перетекающего через перфорационные отверстия  $|w|$ . Для определения осредненной скорости эжектируемого воздуха  $\bar{u}$  нужно выполнить интегрирование второго уравнения «упрощенной» системы (26) по всей длине желоба. Имеем:

$$p_u(1) - p_u(0) + 4\bar{u}(u_k - u_n) = Le(\bar{v} - \bar{u})^2 / \bar{v}$$

или с учетом краевых условий для давлений

$$\zeta_{uk} u_k^2 + \zeta_{un} u_n^2 + \zeta_n^* z^2 + p_y + 4\bar{u}(u_k - u_n) = Le \frac{(\bar{v} - \bar{u})^2}{\bar{v}},$$

откуда получим следующее соотношение для  $z$ :

$$z = \sqrt{\frac{kLe(\bar{v} - \bar{u}) - F_y}{\zeta_n^*}}, \quad (33)$$

где для удобства записи принято

$$F_y = \zeta_{uk} u_k^2 + \zeta_{un} u_n^2 + p_y + 4\bar{u}(u_k - u_n).$$

Используем результаты решения «точной» задачи с одним циркуляционным кольцом, т.е. положим в качестве первого приближения

$$\bar{u} = u_c, \quad \bar{\omega} = \omega_c,$$

где  $u_c$  и  $\omega_c$  определяются уравнениями (22) после решения уравнения (21) относительно параметра  $z_c$ .

Осреднение абсолютной величины скорости перетекания  $|\bar{w}|$  будем осуществлять по значению этой величины в трех точках по длине желоба. Учитывая, что скорость  $w$  знакопеременна, можем записать

$$|\bar{w}| \approx \frac{|w(0)| + |w(1)|}{3},$$

где в силу краевых условий (8) и (10), (11) и (12), а также учитывая (2):

$$|w(0)| = \sqrt{\frac{\zeta_{\omega n}}{\zeta_0} \left( \frac{u_n - z}{r} \right)^2 + \frac{\zeta_{un}}{\zeta_0} u_n^2},$$

$$|w(1)| = \sqrt{\frac{\zeta_{\omega k}}{\zeta_0} \left( \frac{u_k - z}{r} \right)^2 + \frac{\zeta_{uk}}{\zeta_0} u_k^2}.$$

Остановимся на более простом варианте — решим систему (31) с подстановкой соотношения (33), приняв в качестве первого приближения усредненной скорости  $\bar{u}$  среднеарифметическое значение скорости эжектируемого воздуха в трех точках (при  $x = 0$ ;  $x = x_m$ ;  $x = 1$ )

$$\bar{u} = \frac{u_n + u_m + u_k}{3}, \quad (34)$$

где  $u_m \approx u_c$ .

После решения системы (31), определив  $u_n$  и  $u_k$ , найдем расчетную величину усредненной скорости по формуле

$$\bar{u}_r = \bar{v} + \frac{C_1}{a_1} (e^{a_1} - 1) + \frac{C_2}{a_2} (e^{a_2} - 1) - k_1 - 0,5k_2, \quad (35)$$

полученной интегрированием функции (28) в интервале  $0 \leq x \leq 1$ . Сопоставим эти величины и осуществим при необходимости следующее приближение, приняв

$$\bar{u} \approx \bar{u}_r, \quad (36)$$

или найдем максимальное значение  $u_m$  решением системы (29) и (30) (положив  $u = u_m$ ;  $x = x_m$ ;  $u' = 0$ ), а затем определим величину  $\bar{u}$  по формуле (34). Мы приняли метод последовательных приближений с использованием соотношений (35) и (36).

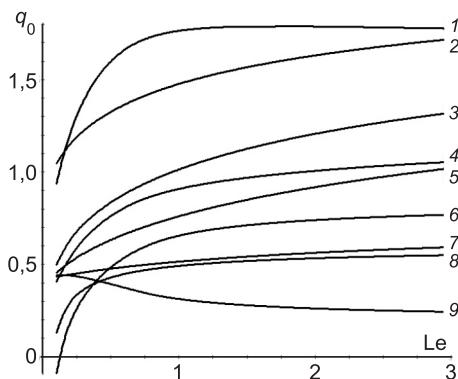


Рис. 5. Изменение расходов эжектируемого воздуха, нагнетаемого в нижнее аспирируемое укрытие из приемной камеры при одном циркуляционном кольце  $Q_1$ , при двух циркуляционных кольцах  $Q_2$  и при отсутствии этих колец  $Q_0$ ; расходов эжектируемого воздуха  $Q_{ul}$  при одном кольце,  $Q_{u2}$  при двух циркуляционных кольцах и  $Q_{u0}$  при отсутствии колец циркуляции; отношение этих расходов  $q_0 = Q_{u0}/Q_1$ ,  $q_{02} = Q_{u2}/Q_1$ , а также коэффициентов рециркуляции воздуха  $R_{z1} = (Q_{ul} - Q_1)/Q_{ul}$ ;  $R_{z2} = (Q_{u2} - Q_2)/Q_{u2}$  в зависимости от величины числа эжекции  $Le$  (при  $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\varepsilon = 0,25$ ;  $\zeta_0 = \zeta_1 = \zeta_p = 2,4$ ;  $\zeta_{un} = 0,5$ ;  $\zeta_{uk} = 1,0$ ;  $\zeta_u = \zeta_w = 1,5$ ;  $\zeta_{on} = \zeta_{wk} = 0,75$ ;  $f_l = f_p = S_u = S_w = 0,3 \text{ м}^2$ ;  $n = 0,3$ ;  $v_k = 10 \text{ м}/\text{с}$ ;  $P_3 = -6 \text{ Па}$ ;  $P_y = -0,1$ ;  $\zeta_1^* = \zeta_p^* = 2,4$ ;  $\zeta_n^* = 4,8$ )

1 —  $q_2 = Q_{u2}/Q_1$ ; 2 —  $q_0 = Q_{u0}/Q_1$ ; 3 —  $Q_{ul}$ ; 4 —  $Q_{u2}$ ; 5 —  $Q_{u0}$ ; 6 —  $R_{z2}$ ; 7 —  $Q_1$ ; 8 —  $R_{z1}$ ; 9 —  $Q_2$

Результаты исследований на конкретном примере перегружочного узла с комбинированным байпасированием показали, что при наличии двух рециркуляционных колец (внешнего транзитного относительно байпасной камеры восходящего потока — 1-е кольцо и внутреннего восходящего потока воздуха в байпасной камере, перетекающего через отверстия стенок из этой камеры в желоб в верхней части и истекающего из желоба в нижней части — 2-е кольцо) расход рециркулируемого воздуха растет, а расход воздуха, нагнетаемого (транзитная часть расхода воздуха в желобе относительно системы верхнее укрытие — желоб — нижнее укрытие) из приемной камеры в нижнее аспирируемое укрытие, уменьшается (рис. 5). Это легко заметить, сравнивая графики изменения коэффициентов рециркуляции  $R_{z1}$ ,  $R_{z2}$  и расходов нагнетаемого воздуха  $Q_1$  и  $Q_2$ . С увеличением эжектирующей способности потока перегружаемого материала, т.е. с ростом числа  $Le$ , это отличие становится более замет-

но. В случае  $Le = 0,6$  при отсутствии байпасирования расход нагнетаемого воздуха в абсолютном выражении составил  $Q_0 = 0,66 \text{ м}^3/\text{с}$ , при наличии только одного кольца рециркуляции он снизился до  $Q_1 = 0,49 \text{ м}^3/\text{с}$  (на 26 %) и при наличии двух колец — до  $Q_2 = 0,37 \text{ м}^3/\text{с}$  (уменьшается в 1,78 раза). Эти величины при  $Le = 3$  соответственно составят  $Q_0 = 1,03 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{с}$  (на 42 % меньше);  $Q_2 = 0,24 \text{ м}^3/\text{с}$  (меньше в 4,29 раза по сравнению с величиной  $Q_0$ ).

Столь существенное снижение расходов нагнетаемого воздуха  $Q_1$  (а следовательно, и заметное уменьшение расходов удаляемого воздуха  $Q_a$ ) объясняется ростом противодавлений в укрытиях (рис. 6) при увеличении  $Le$ . Прежде всего заметно повышается величина разрежения в верхнем укрытии  $p_{1(1)}$  и снижается — в приемной камере нижнего укрытия  $p_{2(1)}$ , что стимулирует увеличение расхода рециркулируемого воздуха при росте  $\Delta p_{21(1)}$ .

Для случая двух колец рециркуляции происходит повышение рецикла воздуха за счет интенсификации перетекания воздуха через перфорационные отверстия при росте числа эжекции  $Le$ . Несмотря на рост разрежения в приемной камере  $p_{2(2)}$  и связанное с ним снижение противодавления  $\Delta p_{21(2)}$ , величина рецикла увеличивается. Это объясняется повышением эжектирующей способности потока перегружаемого материала при росте параметра  $Le$ . Возрастают избыточные давления (рис. 7) в желобе  $p_u(0)$  и байпасной камере  $p_\omega(0)$ , а также по абсолютной величине разности давлений  $\delta p(0)$  и  $\delta p(1)$ , что способствует повышению расхода рециркулируемого воздуха.

При увеличении числа  $Le$  растут как продольные скорости эжектируемого и рециркулируемого воздуха (рис. 8), так и скорости перетекающего воздуха (рис. 9).

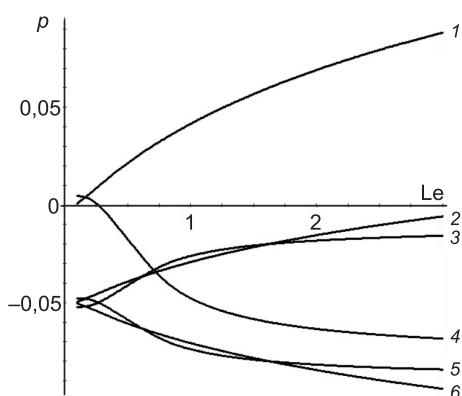


Рис. 6. Изменение избыточных статических давлений воздуха в верхнем (не аспирируемом) укрытии  $p_{1(1)}$  — при одном циркуляционном кольце и  $p_{1(2)}$  — при наличии двух колец, а также в приемной камере нижнего аспирируемого укрытия  $p_{2(1)}$  при одном кольце и  $p_{2(2)}$  при наличии двух колец и разности этих давлений  $\Delta p_{21(1)} = p_{2(1)} - p_{1(1)}$ ;  $\Delta p_{21(2)} = p_{2(2)} - p_{1(2)}$  в зависимости от величины  $Le$  (при тех же исходных данных, что и на рис. 5)  
 1 —  $\Delta p_{21(1)}$ ; 2 —  $p_{2(1)}$ ; 3 —  $p_{1(2)}$ ; 4 —  $\Delta p_{21(2)}$ ; 5 —  $p_{2(2)}$ ; 6 —  $p_{1(1)}$

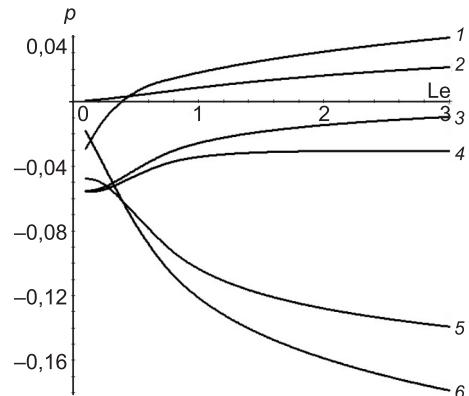


Рис. 7. Изменение избыточных статических давлений воздуха в зависимости от числа  $Le$  (при тех же исходных данных, что и на рис. 5) на концах желоба  $p_u(0)$  (кривая 4) — при входе эжектируемого воздуха в желоб,  $p_u(1)$  (кривая 1) — при выходе его из желоба;  
 что и на рис. 5) на концах байпасной камеры:  $p_\omega(0)$  (кривая 3) — при выходе рециркулируемого воздуха из камеры в верхнее укрытие,  $p_\omega(1)$  (кривая 5) — при входе укрытия, а также разность этих давлений  $\delta p(0) = p_\omega(0) - p_u(0)$  (кривая 2) и  $\delta p(1) = p_\omega(1) - p_u(1)$  (кривая 6)

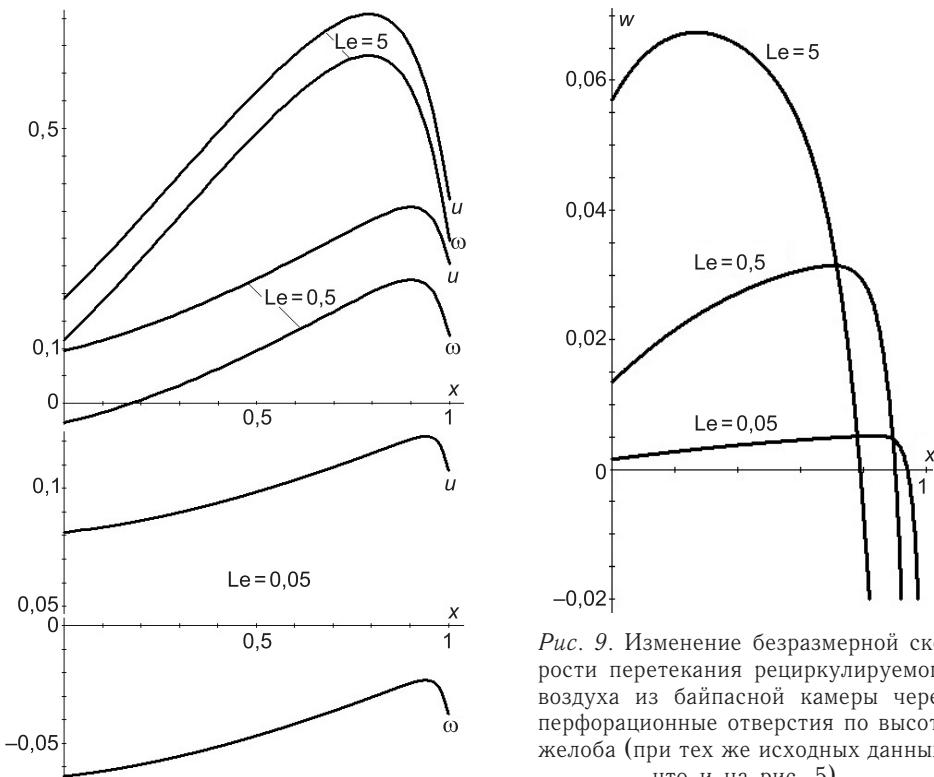


Рис. 8. Изменение безразмерных скоростей эжектируемого воздуха в желобе ( $u$ ) и рециркулируемого восходящего потока воздуха в байпасной камере ( $\omega$ ) по высоте падения частиц перегружаемого сыпучего материала (при тех же исходных данных, что и на рис. 5)

и снижению площади зазора между конвейерной лентой и стенками приемной камеры (растет  $p_2$ ).

**Выводы.** Устройство комбинированной камеры с транзитным обменом воздуха между верхним неаспираторным укрытием и приемной камерой нижнего аспираторного укрытия (см. рис. 1) повышает энергосберегающий эффект. Расход нагнетаемого в аспираторное укрытие эжектируемого воздуха  $Q_1$  можно существенно уменьшить путем организации двойного циркулирования воздуха по внешнему кольцу (с использованием торцевых отверстий байпасной камеры) и по внутреннему кольцу, обеспечивающему перетекание воздуха через отверстия перфорации по всей длине желоба.

Так, на конкретном примере при небольшой эжектирующей способности потока сыпучего материала ( $Le = 0,6$ ), даже при одном внутреннем кольце рециркуляции, расход нагнетаемого воздуха был снижен в 1,35 раза по сравнению с перегрузкой этого же потока материала в желобе с непроницаемыми стенками и отсутствием байпасной камеры, а при двойном кольце рециркуляции — в 1,78 раза (см. рис. 5). А при больших числах эжекции эффект снижения расхода  $Q_1$  еще выше. При  $Le = 3$  и одном внешнем кольце циркуляции этот же расход при том же сопоставлении ( $Q_{u_0}$ ) был уменьшен в 1,72, а с двумя кольцами — в 4,29 раза.

Рис. 9. Изменение безразмерной скорости перетекания рециркулируемого воздуха из байпасной камеры через перфорационные отверстия по высоте желоба (при тех же исходных данных, что и на рис. 5)

Остается в силе, и в этом случае, утверждение, что существенная роль в уменьшении величины нагнетаемого воздуха  $Q_1$  принадлежит герметизации верхнего укрытия (увеличивается  $p_1$ )

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачев, И.Н. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщ. 1. Уравнения динамики эжектируемого и рециркулируемого воздуха [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 46–53.
2. Логачев, И.Н. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщ. 2. Линеаризация дифференциальных уравнений [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 11–12. — С. 62–70.
3. Логачев, И.Н. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщ. 3. Численный эксперимент и результаты исследований [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 1. — С. 79–87.
4. Логачев, И.Н. Особенности рециркуляции воздуха в перегрузочном желобе с комбинированной байпасной камерой. Сообщ. 1. Основные уравнения [Текст] / И.Н. Логачев, К.И. Логачев, О.А. Аверкова, И.В. Крюков // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 4. — С. 62–71.

ЛОГАЧЕВ Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
ЛОГАЧЕВ Константин Иванович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
АВЕРКОВА Ольга Александровна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
КРЮКОВ Илья Валерьевич, студ.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 13.03.13

**Logachev Ivan Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Logachev Konstantin Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Averkova Olga Alexandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Krukov Ilya Valerievich**, student, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## FEATURES OF RECIRCULATION OF AIR IN TRANSFERRING TROUGH WITH THE COMBINED BYPASS CAMERA

### Mess age 2. SOLUTION OF EQUATIONS AND RESULTS OF CALCULATION

Were obtained and solved hydrodynamic equations for estimating inter-component interaction in a vertical perforated trough when moving in them of gravitational flow of bulk material and air ejection. Considered case when recirculation of ascending air in the bypass camera is carried out as through uniform openings of perforation walls of a trough and through butt-end openings on the ends of the bypass camera. Parameters are determined which provide the greatest decrease of ejection volumes at the expense of recirculation air.

Key words: aspiration, bulk material transfer, ejection of air.

## REFERENCES

1. Logachev, I.N. Ejection of air by the stream of bulk material in a vertical perforated trough. Message 1. The dynamics equations of ejected and recirculated air [Text] /

- I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 10. — P. 46–53.
2. Logachev, I.N. Ejection of air by the stream of bulk material in a vertical perforated trough. Message 2. Linearization of differential equations [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 11–12. — P. 62–70.
3. Logachev, I.N. Ejection of air by the stream of bulk material in a vertical perforated trough. Message 3. Numerical experiment and research results [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 1. — P. 79–87.
4. Logachev, I.N. Features of recirculation of air in transferring trough with the combined bypass camera. Message 1. Main equations [Text] / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova, I.V. Krukov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 4. — P. 62–71.
-

УДК 697.137.2.001.24

М.Н. КУЧЕРЕНКО, Е.В. ЧИРКОВА

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕНОСА ВЛАГИ  
ЧЕРЕЗ НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ**

Предложена методика нормирования интенсивности переноса влаги через наружные ограждающие конструкции производственных сельскохозяйственных зданий на основе теории потенциала влажности. Величиной, оценивающей влагозащитные свойства ограждений, является сопротивление влагопередаче. В роли движущей силы влагопереноса выступает градиент потенциала влажности. Данная методика нормирования позволяет на стадии проектирования учитывать особенности параметров микроклимата производственных сельскохозяйственных зданий.

**Ключевые слова:** сопротивление влагопередаче, потенциал влажности, коэффициент влагообмена, коэффициент влагопроводности.

Методика определения теплофизических характеристик наружных ограждений, приведенная в СНиП 23-02-2003, распространяется на здания и сооружения различного назначения, что не позволяет учитывать особенности параметров микроклимата производственных сельскохозяйственных зданий (животноводческих, птицеводческих, хранилищ картофеля и овощей), где относительно низкая температура  $t_{int}$  и высокая относительная влажность воздуха  $\varphi_{int}$ . Результатом являются непредсказуемые отличия расчетных параметров от реальных [1].

В настоящее время разработана методика нормирования требуемого сопротивления теплопередаче теплового контура производственных сельскохозяйственных зданий [1], в которой за основу нормирования принят удельный тепловой поток  $q_a^i$ , Вт / м<sup>2</sup>, учитывающий явные тепловыделения животных, птиц, хранящейся продукции. Методика позволяет установить особенности объемно-планировочных решений зданий. Такой методический подход к расчетам температурного режима сельскохозяйственных помещений дает возможность избежать субъективных погрешностей, однако он не учитывает влияния влажностного режима ограждающих конструкций на динамику параметров микроклимата. Для сельскохозяйственных зданий вопрос о влажностном состоянии строительных конструкций является основополагающим, поскольку из-за низких температур и высоких относительных влажностей воздуха они находятся в крайне жестких условиях эксплуатации, приводящих к снижению их теплозащитных характеристик и преждевременному износу. Необходимо уточнить методику нормирования и расчета интенсивности влагопереноса через ограждающие конструкции с целью выявления реальных показателей их теплофизических характеристик.

За основу уточненной методики динамики переноса массы влаги принята теория полного термодинамического потенциала влажности<sup>1</sup>. В отличие от широко применяемой теории диффузии пара в сорбирующей

<sup>1</sup> Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Выш. шк., 1982. 415 с.

среде теория потенциала влажности дает возможность оценить состояние влаги во всех ее фазах и позволяет проводить расчеты влажностного режима многослойных конструкций практически при любых нестационарных воздействиях на наружные ограждения.

Физико-математическое понятие потенциала влажности  $\Theta$ ,  $^{\circ}\text{B}$ , аналогично температурному потенциальному, которым является температура  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ . По аналогии с основным законом теплопроводности, устанавливающим прямую пропорциональность между удельным потоком теплоты и градиентом температуры, удельный поток влаги через ограждение  $i$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , пропорционален градиенту потенциала влажности:

$$i = -\chi \nabla \Theta, \quad (1)$$

где  $\chi$  — коэффициент влагопроводности,  $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{B})$ ;  $\nabla \Theta$  — градиент потенциала влажности,  $^{\circ}\text{B}/\text{м}$ .

Коэффициент влагопроводности строительных материалов определяется по зависимости<sup>2</sup>:

$$\chi = (e_{int} - e_{ext}) \mu / (\Theta_{int} - \Theta_{ext}), \quad (2)$$

где  $e_{int}$  и  $e_{ext}$  — соответственно упругости водяного пара с внутренней и наружной сторон ограждения, Па;

$\Theta_{int}$  и  $\Theta_{ext}$  — соответственно потенциалы влажности воздуха с внутренней и наружной сторон ограждения,  $^{\circ}\text{B}$ ;

$\mu$  — коэффициент паропроницаемости материала,  $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ .

Потенциалы влажности внутреннего  $\Theta_{int}$  и наружного  $\Theta_{ext}$  воздуха устанавливаются по аналитическим зависимостям [2]: при  $t \leq 10$   $^{\circ}\text{C}$  и при любой относительной влажности  $\varphi$ , %,  $\lg \Theta = 0,057d + 0,829$ ; при  $t > 10$   $^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi \geq 80$  %  $\lg \Theta = 0,12d - 0,049t + 1,056$ ; при  $t > 10$   $^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi < 80$  %, когда влагосодержание воздуха лежит в пределах  $20 < d \leq 30$  г/кг сухого вещества  $\lg \Theta = 0,096d + 0,082$ ; при меньших влагосодержаниях воздуха ( $0 < d \leq 20$ )  $\lg \Theta = 0,057d + 0,829$ .

Влагосодержание определяется исходя из зависимости [2]:

$$\varphi = k_t d, \quad (3)$$

где угловой коэффициент  $k_t$  при различных значениях температуры находится из соотношения  $k_t = 24,39e^{-0,062t}$  [2].

Разработанная методика нормирования сопротивления влагопередаче базируется на проведении аналогии между явлениями тепло- и влагообмена с использованием классических термодинамических представлений к явлениям переноса вещества. Динамика протекания процессов тепло- и влагообмена между воздухом и строительными конструкциями сопоставлена на основе функции потенциала влажности.

Согласно предложенной методике нормирования влажностных характеристик наружные ограждения должны иметь приведенное сопротивление влагопередаче  $R_0^{\Theta}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{B}/\text{кг}$ , не меньше нормируемого значения  $R_{req}^{\Theta}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{B}/\text{кг}$ , определяемого по формуле:

$$R_{req}^{\Theta} = (\Theta_{int} - \Theta_{ext}) / \Delta \Theta_n \beta_{int}^{\Theta}, \quad (4)$$

где  $\Delta \Theta_n$  — нормируемый перепад потенциалов влажности,  $^{\circ}\text{B}$ ;

---

<sup>2</sup> Кучеренко М.Н., Чиркова Е.В. Термодинамическое обоснование определения коэффициента влагопроводности строительных материалов // Приволж. науч. журн. 2010. № 4. С. 129–135.

$\beta_{int}^{\Theta}$  — коэффициент влагообмена на внутренней поверхности ограждения, кг/(ч · м<sup>2</sup> · °В).

Приведенное сопротивление влагопередаче  $R_0^{\Theta}$ , м<sup>2</sup> · ч · °В/кг, ограждающей конструкции равно:

$$R_0^{\Theta} = \sum_{i=1}^n (\delta_i / \chi_i), \quad (5)$$

где  $\delta_i$  — толщина  $i$ -го слоя ограждающей конструкции, м;

$\chi_i$  — коэффициент влагопроводности материала  $i$ -го слоя, кг/(м · ч · °В);

$n$  — число слоев, составляющих ограждение.

Сопротивления влагообмену на внутренней и наружной поверхностях ограждений не учитываются из-за пренебрежимо малой величины. Величина, стоящая в знаменателе формулы (4), представляет собой нормируемый поток влаги через ограждение  $i_{req} = \Delta\Theta_n \beta_{int}^{\Theta}$ , кг/(ч · м<sup>2</sup>).

Для определения перепада потенциалов влажности внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждения  $\Delta\Theta_n$ , °В, проведены экспериментальные исследования в коровнике, по результатам построены графические зависимости  $\Delta\Theta^w = f(t_{int})$  для наружной стены и  $\Delta\Theta^c = f(t_{int})$  для бесчердачного покрытия (рис. 1), позволяющие определять осредненные значения перепадов потенциалов влажности. Согласно графикам, максимальная величина разности потенциалов для наружной стены составляет 2,2 °В, для бесчердачного покрытия — 3,2 °В. Знак разности потенциалов свидетельствует о направлении движения влаги. Наличие отрицательных значений имеет место при повышенной относительной влажности ограждающих конструкций и, как видно из рис. 1, б, при температурах воздуха ниже нормируемой.

Коэффициент влагообмена  $\beta_{int}^{\Theta}$ , кг/(ч · м<sup>2</sup> · °В), устанавливается на основе критериальных зависимостей. Теплообмен между поверхностью ограждения и окружающим воздухом характеризуется тепловым критерием Нуссельта, определяемым соотношением  $Nu = \alpha \cdot l / \lambda_b$ , где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $l$  — определяющий размер поверхности в направлении потока воздуха, м;  $\lambda_b$  — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · °С). Точное определение коэффициента влагообмена  $\beta_{int}^{\Theta}$  является сложной задачей. Для ее решения предложено использовать массообменный критерий Нуссельта  $Nu'_\Theta$ , который аналогичен диффузионному  $Nu'$ , но учитывает в качестве движущей силы разность потенциалов влажности [3]:

$$Nu'_\Theta = \beta_{int}^{\Theta} l / \chi_b, \quad (6)$$

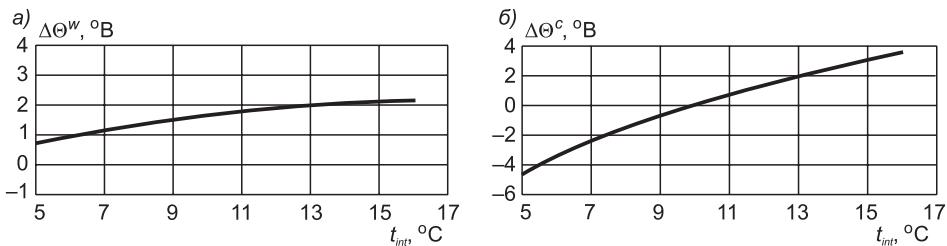


Рис. 1. Зависимость разности потенциалов влажности у внутренней поверхности стены (а) и бесчердачного покрытия (б) от температуры внутреннего воздуха

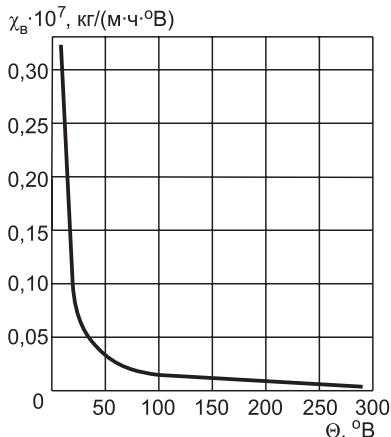


Рис. 2. Зависимость коэффициента влагопроводности воздуха от потенциала влажности

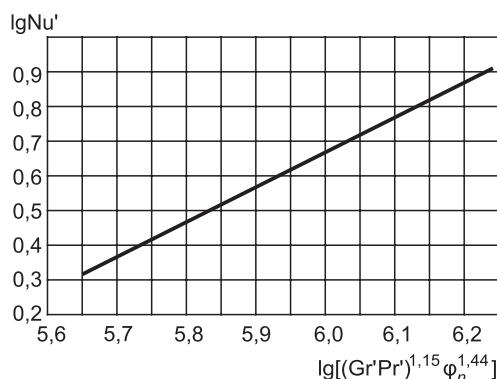


Рис. 3. Зависимость  $\lg \text{Nu}'_\Theta$  от  $\lg[(\text{Gr}' \text{Pr}')^{1.15} \phi_n^{1.44}]$  в процессе увлажнения

где  $\chi_B$  — коэффициент влагопроводности воздуха,  $\text{kg}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot {}^\circ\text{B})$ , определяемый по графической зависимости  $\chi_B(\Theta)$ , приведенной в [3] (рис. 2).

Количественно величина  $\text{Nu}'_\Theta$  устанавливается по графической зависимости  $\text{Nu}' = f(\text{Gr}' \cdot \text{Pr}', \phi_n)$ , приведенной в [4] и показанной на рис. 3. Эмпирическое уравнение, соответствующее данному графику, выглядит следующим образом:

$$\text{Nu}' = 0,45 \cdot 10^{-4} (\text{Gr}' \text{Pr}')^{1.15} \phi_n^{1.44}, \quad (7)$$

где  $\text{Gr}'$  — критерий Грасгофа;

$\text{Pr}'$  — диффузионный критерий Прандтля;

$\phi_n$  — относительная влажность воздуха у поверхности ограждения, %.

В результате расчетов определено, что в процессе увлажнения значения  $\text{Nu}'$  лежат в пределах от 1,6 до 7,9. Если принять во внимание, что диффузионный критерий  $\text{Nu}'$  и массообменный  $\text{Nu}'_\Theta$  равны, то представляется возможность найти коэффициент влагообмена  $\beta_{int}^\Theta$ ,  $\text{kg}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^\circ\text{B})$ , и требуемое сопротивление влагопередаче  $R_{req}^\Theta$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^\circ\text{B}/\text{кг}$ , по формуле (4).

Толщина утепляющего слоя в наружной конструкции  $\delta_{ut}$ , м, определяется подстановкой в (5) найденной величины  $R_{req}^\Theta$  вместо  $R_0^\Theta$ .

**Выходы.** 1. Предложенная методика нормирования сопротивления влагопередаче ограждений на основе полного термодинамического потенциала влажности позволяет осуществлять учет влажностного режима ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий при расчете их теплофизических характеристик.

2. Применение теории потенциала влажности в расчете переноса влаги через наружные ограждения дает возможность одновременно учитывать перемещение жидкой и парообразной влаги под действием градиента потенциала влажности в условиях нестационарной влагопередачи.

3. Методика нормирования позволит повысить качество проектирования наружных ограждений, приведет к повышению надежности и долговечности строительных конструкций, а также к поддержанию оптимальных параметров микроклимата в сельскохозяйственных зданиях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бодров, В.И. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений [Текст] / В.И. Бодров, М.В. Бодров, Е.Г. Ионычев, М.Н. Кучеренко. — Н. Новгород : ННГАСУ, 2008. — 623 с.
2. Кучеренко, М.Н. Термодинамическое обоснование графоаналитического решения задачи влагопереноса в слое биологически активной продукции : автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / М.Н. Кучеренко. — Н. Новгород, 2005. — 21 с.
3. Богословский, В.Н. Расчет тепловлагообмена между воздухом и жидкостью с позиции теории потенциала влажности [Текст] / В.Н. Богословский, А.Н. Гвоздков // Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий : сб. науч. тр.— Рига : Изд-во Риж. политехн. ин-та, 1986. — С. 25–37.
4. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах [Текст] / А.В. Лыков. — М. : Гостехтеориздат, 1954. — 296 с.

*КУЧЕРЕНКО Мария Николаевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: kucherenk\_maria@mail.ru  
Тольяттинский государственный университет  
ЧИРКОВА Елена Владимировна, ассист.; E-mail: chirkovaev@mail.ru  
Тольяттинский государственный университет*

Получено после доработки 01.03.13

**Kucherenko Mariya Nikolaevna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: kucherenk\_maria@mail.ru, Togliatti State University, Russia  
**Chirkova Elena Vladimirovna**, assistant; E-mail: chirkovaev@mail.ru, Togliatti State University, Russia

### APPLICATION OF THE MOISTURE POTENTIAL THEORY FOR THE MOISTURE TRANSFER CALCULATION THROUGH THE BUILDING WALLING

A method of normalization of moisture transfer intensity through the production farm building walling on the basis of moisture potential theory is suggested. A resistance to moisture transfer is adopted in the capacity of value evaluating moisture protection properties of the walling. The moisture potential gradient plays the role of a factor of the moisture transfer. The application of this method of normalization allows to take into account the peculiarity of microclimate characteristics in the production farm buildings.

**Key words:** resistance to moisture transfer, moisture potential, coefficient of moisture exchange, hydraulic conductivity coefficient.

### REFERENCES

1. Bodrov, V.I. Microclimate of industrial farm buildings and constructions [Text] / V.I. Bodrov, M.V. Bodrov, E.G. Ionychev, M.N. Kucherenko. — N. Novgorod, 2008. — 623 p.
2. Kucherenko, M.N. Thermodynamic justification of grapho-analytical solution of the moisture transfer problem in the layer of biologically active products: Ph. D. in Engineering thesis' abstract [Text] / M.N. Kucherenko. — N. Novgorod, 2005. — 21 p.
3. Bogoslovskiy, V.N. The calculation of heat and moisture exchange between the air and the fluid from the position of moisture potential theory [Text] / V.N. Bogoslovskiy, A.N. Gvozdov // The ventilation and the air conditioning of industrial and farm buildings: collected articles. — Riga, 1986. — P. 25–37.
4. Lykov, A.V. The transport phenomena in the capillary-porous solids [Text] / A.V. Lykov. — M., 1954. — 296 p.

УДК 697.7

Е.Г. САВЕЛЬЕВ, Т.Л. РОХЛЕЦОВА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Предложены схемы солнечного теплоснабжения, которые могут применяться в средней полосе России.

Ключевые слова: солнечное теплоснабжение, тепловые насосы, возобновляемая энергия.

В России и за рубежом накоплен значительный опыт использования солнечной энергии в системах отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования зданий, разработано и построено большое количество «солнечных домов», оборудованных гелиосистемами. Ведущими странами в этой области являются Япония, Германия, Франция, Великобритания, США.

Солнечная энергия помимо неограниченности запасов привлекает внимание относительно высокой экологической чистотой по сравнению с традиционными источниками энергии. Применение солнечной энергии обосновано для объектов, оторванных от систем централизованного энергоснабжения.

Рассмотрим возможность использования солнечной энергии для систем горячего водоснабжения и отопления на примере Новосибирской области (рис. 1). Населенные пункты области расположены на одной широ-



Рис. 1. Территория Новосибирской области

те с городами: Ачинск, Владимир, Екатеринбург, Елабуга, Златоуст, Иваново, Казань, Калининград, Калуга, Кемерово, Кострома, Красноярск, Курган, Москва, Нижний Новгород, Нижний Тагил, Омск, Пермь, Псков,

Рязань, Саранск, Смоленск, Томск, Тула, Тюмень, Ульяновск, Уфа, Чебоксары, Ярославль.

Как во многих районах Российской Федерации, ТЭЦ и котельные города, районных центров и небольших поселков Новосибирской области работают на привозном угле или мазуте. Согласно [1] в Новосибирске (рис. 2) не менее 153 дней в году (май — сентябрь) температура наружного воздуха более  $+10^{\circ}\text{C}$ , не менее 214 дней в году (апрель — октябрь) более  $+0^{\circ}\text{C}$ . Температура грунта на глубине 1,6 м не опускается ниже  $+1,2^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 2,4 м — ниже  $2,7^{\circ}\text{C}$ .

Города и поселки Новосибирской области расположены от  $53^{\circ}$  до  $56^{\circ}$  с.ш., интенсивность прямой (рассеянной) солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, в Новосибирске приведена на рис. 3.

Поступление суммарной (прямая + рассеянная) солнечной радиации на горизонтальную поверхность приведено для безоблачного неба [1].

Расчет потребления тепла системами отопления и горячего водоснабжения для семьи из пяти человек, проживающей в двухэтажном коттедже  $150\text{ m}^2$ , был выполнен в соответствии с нормативными требованиями [2]. Сравнение поступления прямой солнечной энергии и потребление тепла системами отопления и горячего водоснабжения показаны на рис. 4.

На основании анализа методов расчета интенсивности солнечной радиации в отечественной [3] и зарубежной литературе [4] можно сделать вывод, что представленные методики носят в большинстве случаев частный характер, применимы для конкретных условий в географической точке и требуют большого объема подготовленной климатологической информации. Это затрудняет разработку и оптимизацию систем солнечного теплоснабжения.

Анализируя методику расчета солнечного горячего водоснабжения [3], было установлено, что для определения часовой производительности

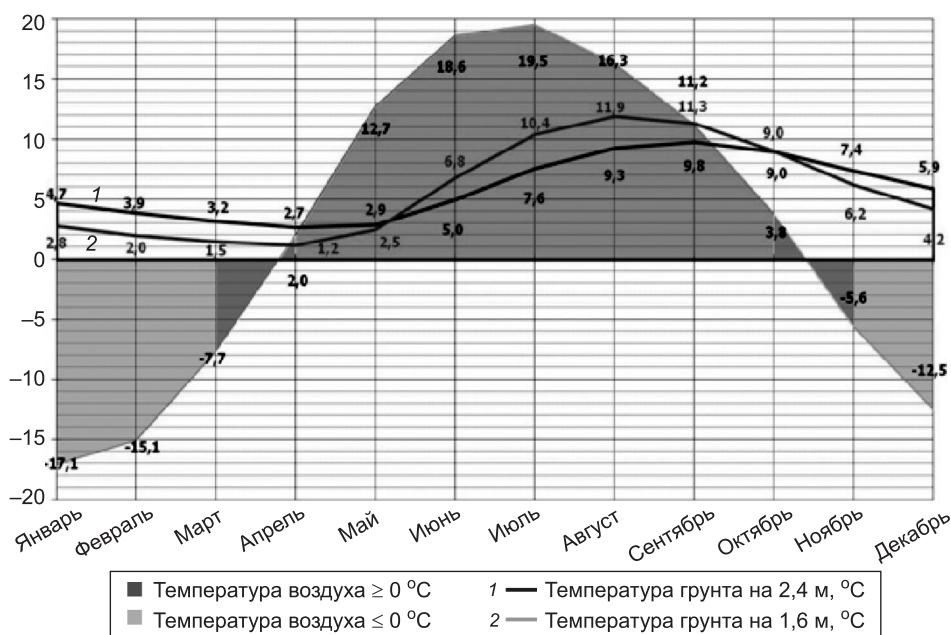


Рис. 2. Средние температуры грунта и наружного воздуха по месяцам

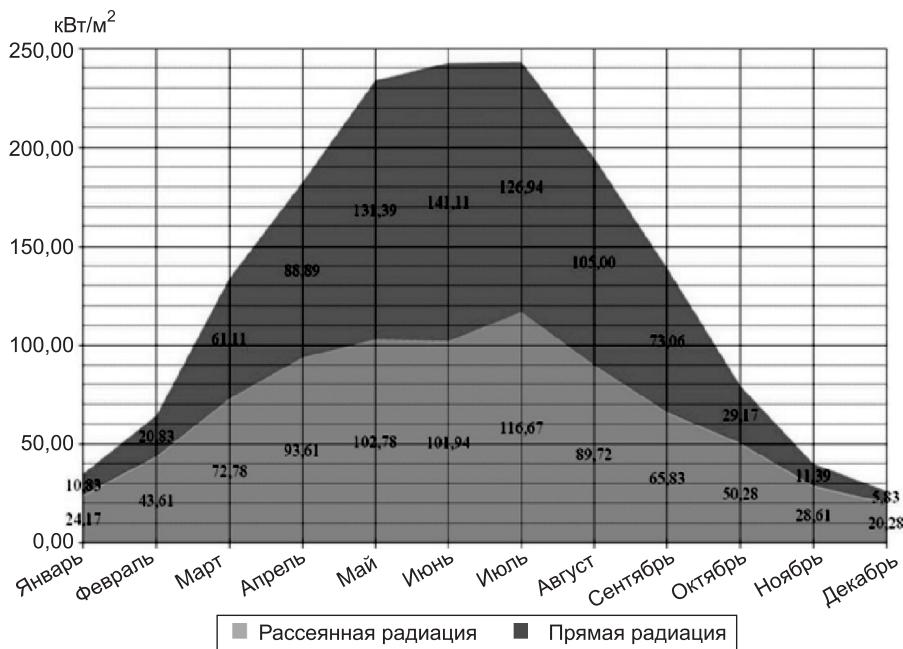


Рис. 3. Поступление прямой и рассеянной радиации по месяцам

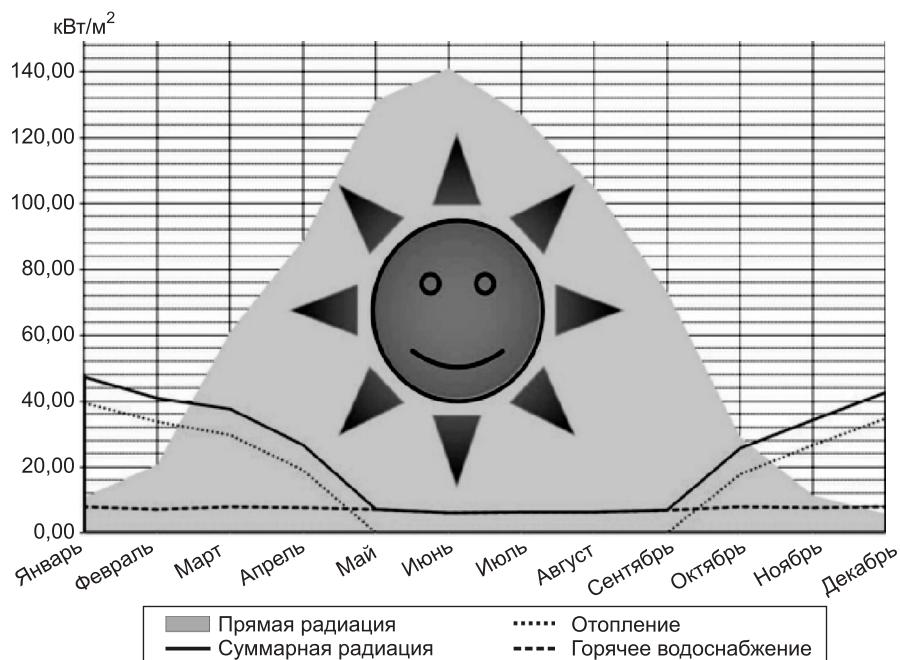


Рис. 4. Интенсивность прямой солнечной радиации и потребление тепла системами отопления и горячего водоснабжения в Новосибирске

установки без дублера  $g_i$  по формуле (1), необходимо установить граничные условия, при которых эта формула работает:

$$g_i = \frac{0,86U}{\ln \frac{t_{\max i} - t_1}{t_{\max i} - t_2}}. \quad (1)$$

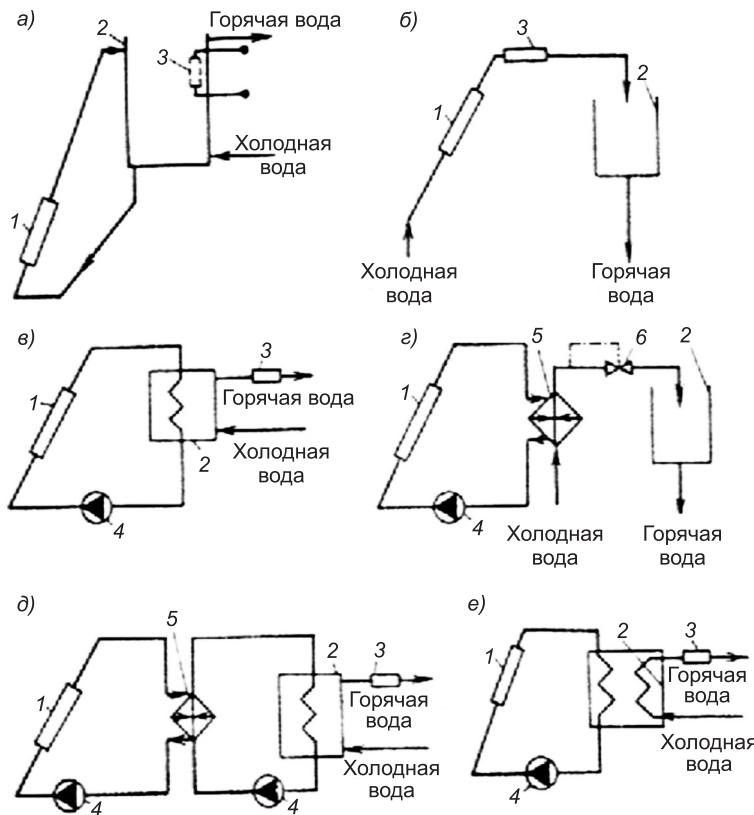


Рис. 5. Принципиальные схемы установок солнечного горячего водоснабжения с естественной циркуляцией (а), одноконтурной (б), двухконтурной (в), двухконтурной с постоянной температурой воды (г), трехконтурной (д), с двумя змеевиками в баке-аккумуляторе (е)

1 — солнечный коллектор; 2 — бак-аккумулятор; 3 — дублер нагрева воды;  
4 — циркуляционный насос; 5 — теплообменник; 6 — регулятор температуры

Нужна корректировка формулы (2) определения равновесной температуры каждого часа [3]:

$$t_{\max i} = \frac{q_{\theta i}}{U + t_{ei}}. \quad (2)$$

Кроме того, необходимо определить временные интервалы использования солнечной энергии как по часам суток, так и по месяцам года.

В методике расчета солнечного горячего водоснабжения [3] приведено шесть принципиальных схем установок (рис. 5). Для принципиальных схем с дублером нужно доказать возможность и целесообразность использования грунтовых аккумуляторов, тепловых насосов, а не традиционных источников теплоты, работающих на угле, газе или дизельном топливе. Принципиальные схемы также требуют всестороннего анализа и технико-экономического обоснования на предмет применения в суровых климатических условиях (рис. 6).

**Выводы.** В суровых климатических условиях масштабы потребления топлива на отопление и горячее водоснабжение делают необходимым развитие «солнечного» домостроения, чему способствует гелиоэнергетическое изобилие районов, расположенных на широте Новосибирской области. Поэтому предложенные здесь схемы солнечного теплоснабжения могут применяться практически по всей средней полосе России. Для ус-

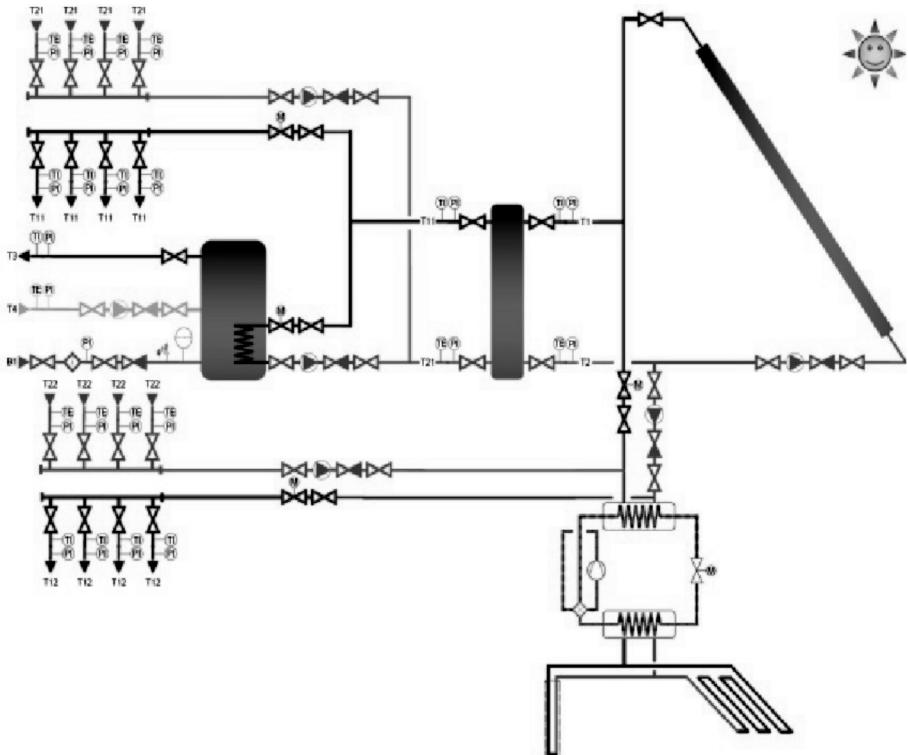


Рис. 6. Принципиальная схема солнечного теплоснабжения коттеджа с грунтовым аккумулятором в качестве дублера

пешного и широкого внедрения гелиоустановок нужно решить следующие задачи применительно к различным климатическим условиям Российской Федерации:

- 1) адаптация методик расчета систем солнечного теплоснабжения;
- 2) разработка алгоритма выбора принципиальной схемы установки солнечного теплоснабжения для конкретно заданных условий;
- 3) разработка алгоритма выбора дублера для повышения потенциала тепловой энергии и покрытия дефицита энергии в периоды длительных неблагоприятных погодных условий;
- 4) рассмотрение возможности комбинированных активных и пассивных установок солнечного теплоснабжения для увеличения эффективности их работы;
- 5) определение возможности перехода на воздушное отопление, с рекомендациями по объемному решению (с целью уменьшения потерь тепла зданием) и теплотехническим характеристикам ограждающих конструкций здания;
- 6) разработка технических решений, применение новых материалов и оборудования, обеспечивающих при высоком качестве и долговечности снижение стоимости систем солнечного теплоснабжения, сроком окупаемости 2–3 года.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. — М. : Госстрой России, 2000.
2. СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов. — М. : Минстрой России, 1996.
3. ВСН 52-86. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования. — М. : Госстрой СССР, 1986.

4. Сабади, П.Р. Солнечный дом : пер. с англ. Н.Б. Гладковой [Текст] / П.Р. Сабади. — М. : Стройиздат, 1981.

*САВЕЛЬЕВ Евгений Геннадьевич, ст. препод.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*РОХЛЕЦОВА Татьяна Лаврентьевна, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 11.03.13

**Savelyev Evgeniy Gennadievich**, senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Rohletsova Tatyana Lavrenteva**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## USE OF SOLAR ENERGY IN HARS INVIRONMENTS

Schemes of a solar heat supply which can be applied in a midland of Russia are offered.

Key words: solar heating, heat pumps, renewable energy.

## REFERENCES

1. CN&R 23-01-99. Construction climatology. — М. : Gosstroj of Russia, 2000.
  2. SR 41-101-95. Design of thermal points. — М. : Minstroj of Russia, 1996.
  3. DCN 52-86. Installations of solar hot water supply. Norms of design. — М.: Gosstroj of USSR, 1986.
  4. Sabade, P.R. Solar house: translation from English by N.B. Gladkova [Text] / P.R. Sabade. — М. : Stroyizdat, 1981.
-

УДК 697.921.42

А.А. БОРОВИЦКИЙ, С.В. УГОРОВА, В.И. ТАРАСЕНКО

## МНОГОФАКТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УЛАВЛИВАНИЯ МЕСТНОГО ВЫТЯЖНОГО УСТРОЙСТВА

Представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента улавливания вредности в зависимости от пространственного положения наклонного воздухоприемника и расхода удаляемого воздуха. Исследуемый тип местного отсоса наиболее распространен в сварочных цехах. Предложена теоретически-экспериментальная зависимость для определения коэффициента улавливания вредности.

**Ключевые слова:** эксперимент, трассирующий газ, местное вытяжное устройство, коэффициент улавливания.

В технической литературе отсутствуют подробные экспериментальные сведения по коэффициенту улавливания наклонных местных вытяжных устройств (МВУ). В работе [1] приводятся сведения о том, что при удалении воздуха через всасывающую воронку в количестве  $800\text{--}1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  размер зоны эффективного улавливания, для которой коэффициент улавливания  $k_{\text{ул}} \geq 0,8$  составляет  $0,35\text{--}0,4 \text{ м}$ . Нормы<sup>1</sup> рекомендуют принимать  $k_{\text{ул}} \leq 0,75$ . Поэтому в инженерных расчетах обычно принимают  $k_{\text{ул}} \approx 0,75$ . Фирмы-производители таких отсосов дают лишь отдельные значения этой величины без увязки с многочисленными факторами, от которых она зависит. Однако для выбора принципиальных решений системы промышленной вентиляции, обеспечивающих минимальные затраты за срок службы, этих данных недостаточно [2].

**Методика и экспериментальная установка.** Исследования коэффициента улавливания проводились в лаборатории кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидравлики ВлГУ. Схема установки приведена на рис. 1. Общее число опытов — 45, погрешность — 9–24 %. В качестве трассирующего газа был выбран диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ),  $\rho_{\text{n.y}} = 1,839 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\text{ПДК}_{\text{ср.см}} = 9000 \text{ мг}/\text{м}^3$ ,  $\text{ПДК}_{\text{м.p}} = 27\,000 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Расход газа  $G_{\text{вр}} = 17 \text{ л}/\text{мин}$ . Тепловыделения в помещении отсутствовали, температура воздуха  $t_{\text{в}} \approx 20^\circ\text{C}$ , средняя подвижность, замеренная в месте установки источника вредных выделений (ВВ) при неработающем вытяжном вентиляторе и открытых окне и двери, —  $v_{\text{ср}} \approx 0,1 \text{ м}/\text{с}$ .

Расход удаляемого воздуха через МВУ изменялся в диапазоне  $L_{\text{мо}} = 400\text{--}1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ , расстояние от источника до всасывающего отверстия  $x = 0,24\text{--}0,72 \text{ м}$  ( $x/d_{\text{мо}} = 1; 2; 3$ ), угол наклона оси МВУ к плоскости источника  $\alpha = 30\text{--}90^\circ$  (см. рис. 1, *в*).

Для имитации общеобменной системы вентиляции во время опытов в лаборатории было открыто окно 4 и дверь 10 (см. рис. 1, *а, б*). Моделируемый источник ВВ представляет собой пластиковую цилиндрическую емкость 2 диаметром 0,055 м и высотой 0,040 м. В ее верхней части уста-

<sup>1</sup> СП 1009–73. Санитарные правила по сварке, наплавке и резке металлов. М.: Стройиздат, 1973. 31 с.

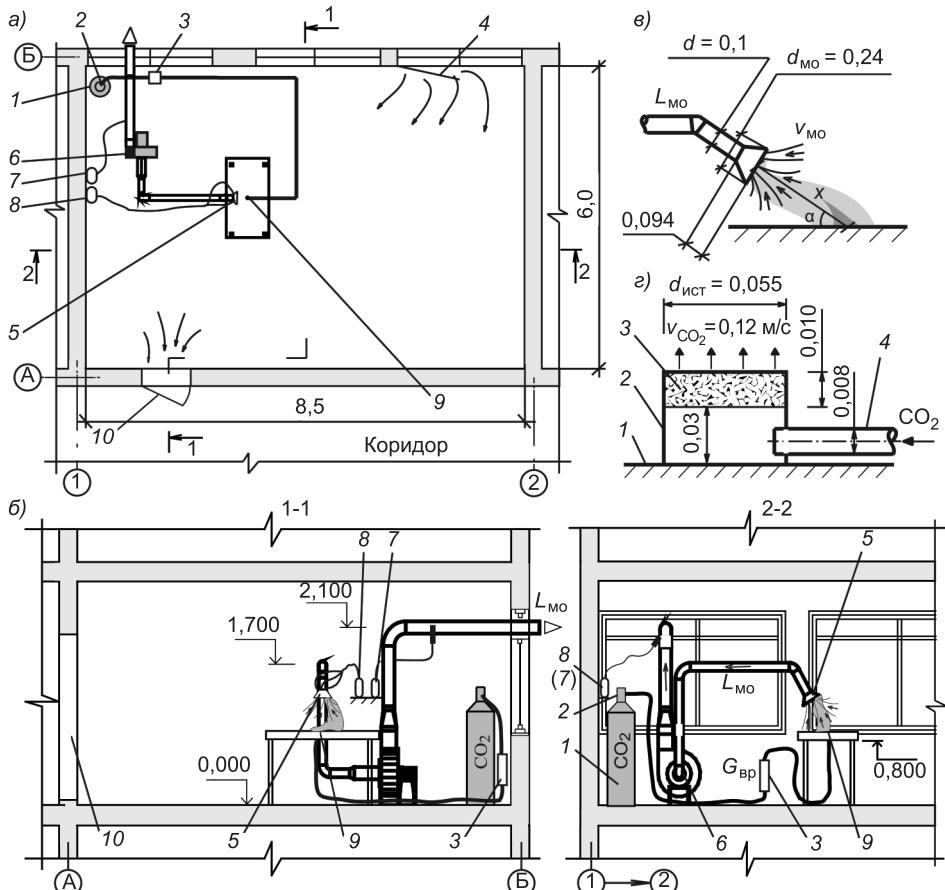


Рис. 1. Размещение лабораторного стендa

а — план расположения оборудования; б — разрезы лабораторного помещения: 1 — баллон с трассирующим газом; 2 — регулятор давления УР-6-6; 3 — ротаметр LZN-6Т; 4 — открытое окно; 5 — МВУ,  $d_{MO} = 0,24$  м; 6 — вентиляционный агрегат ВЦ 5-35-3,55; 7 — газоанализатор TESTO-535;

8 — дифманометр ДМЦ-01; 9 — источник вредных выделений; 10 — открытая дверь;

в — расположение МВУ относительно источника ВВ; г — источник ВВ: 1 — поверхность стола; 2 — источник ВВ; 3 — губка (поролон); 4 — пластиковая трубка  $d = 10 \times 1$  мм, по которой подается газ  $CO_2$

новлена губка 3, а сбоку подсоединенна пластиковая трубка 4 (см. рис. 1, г).

**Методика проведения экспериментов и их обработка.** В основе вычисления коэффициента улавливания используется зависимость:

$$k_{\text{уд}} = (c_{MO} - c_0) / (c_{\max} - c_0), \quad (1)$$

где  $c_0$  — фоновая концентрация трассирующего газа,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $c_{MO}$  — концентрация трассирующего газа в вытяжном воздуховоде,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $c_{\max}$  — максимально возможная концентрация трассирующего газа в вытяжном воздуховоде,  $\text{мг}/\text{м}^3$ , определяемая инструментально газоанализатором, при размещении источника ВВ внутри всасывающего отверстия.

Трассирующий газ из баллона 1 (см. рис. 1, а, б) подается в рабочую зону. Для снижения давления газа установлен регулятор давления 2, для контроля расхода — ротаметр 3. Под воздействием разряжения, создаваемого вытяжным вентилятором 6, ВВ удаляются через МВУ 5. Измерение концентрации в вытяжном воздуховоде  $c_{MO}$  производилось после от-

носительной стабилизации показаний газоанализатора в течение 3–5 мин. Концентрация трассирующего газа замерялась портативным газоанализатором 7 через отверстие в вытяжном воздуховоде.

**Результаты исследования.** После обработки опытов построены графики (рис. 2, 3). В данной работе приведена только часть результатов исследований. На рис. 2, а представлены экспериментальные зависимости  $k_{\text{ул}} = f(L_{\text{мо}})$ . Через опытные точки проведены кривые, форма которых схожа с экспоненциальной.

Пунктирные линии на рис. 2, а проведены исходя из представления об экспоненциальной зависимости  $k_{\text{ул}} = f(L_{\text{мо}})$ . Отметим, что при любом угле наклона вытяжного раstra к поверхности стола на расстоянии  $x/d_{\text{мо}} = 1$  при  $L_{\text{мо}} > 600 \text{ м}^3/\text{ч}$  среднее значение коэффициента улавливания вредности  $k_{\text{ул}} \approx 0,9$ .

Проанализируем зависимость  $k_{\text{ул}} = f(x/d_{\text{мо}})$  (рис. 2, б). Пунктирные линии проведены из предположения, что при  $x/d_{\text{мо}} \rightarrow 0$ ,  $k_{\text{ул}} \rightarrow 1$ . Предположим, что коэффициент улавливания можно представить в виде экспоненциально-степенной зависимости, аналогичной принятой у В.М. Эльтермана [3] для турбулентной диффузии:

$$k_{\text{ул}} = \exp[-(a\bar{x})^n], \quad (2)$$

где  $a$  и  $n$  — множитель и показатель степени, согласующие опытные данные с гипотетической зависимостью (2),  $\bar{x} = x/d_{\text{мо}}$  — относительное расстояние.

Для проверки гипотетической зависимости (2) экспериментальные точки нанесены на график (см. рис. 3). Все кривые проходят через значение

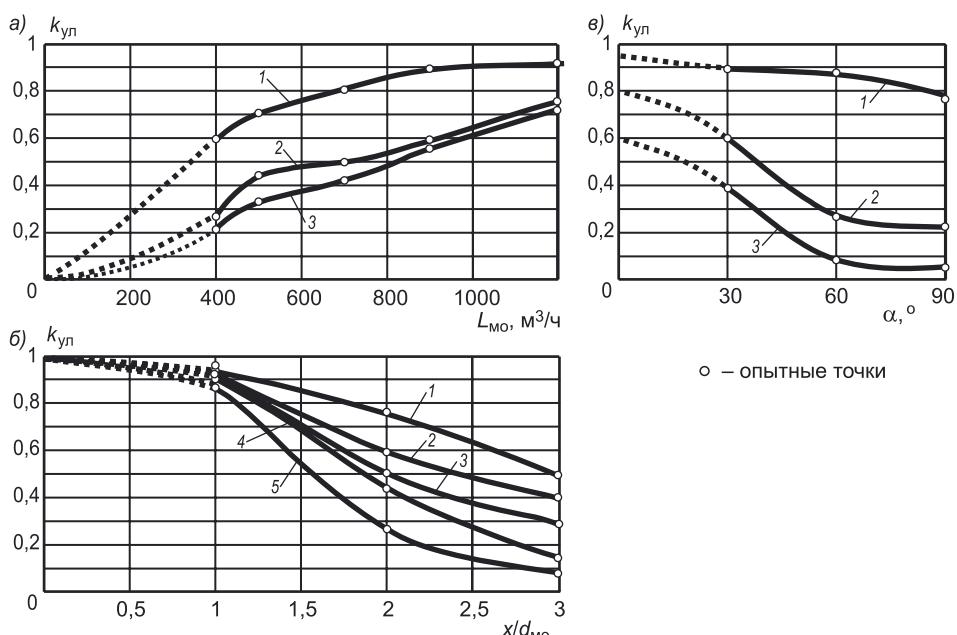


Рис. 2. Многофакторная зависимость коэффициента улавливания, построенная по опытным данным

а — от расхода удаляемого воздуха  $L_{\text{мо}}$  при  $x/d_{\text{мо}} = 2$ : 1 —  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 —  $\alpha = 60^\circ$ ; 3 —  $\alpha = 90^\circ$ ; б — от относительного расстояния при  $\alpha = 60^\circ$ : 1 —  $L_{\text{мо}}/L_{\text{max}} = 1$ ; 2 —  $L_{\text{мо}}/L_{\text{max}} = 0,75$ ; 3 —  $L_{\text{мо}}/L_{\text{max}} = 0,58$ ; 4 —  $L_{\text{мо}}/L_{\text{max}} = 0,42$ ; 5 —  $L_{\text{мо}}/L_{\text{max}} = 0,33$ ; в — от угла наклона при  $L_{\text{мо}}/L_{\text{max}} = 0,33$ : 1 —  $x/d_{\text{мо}} = 1$ ; 2 —  $x/d_{\text{мо}} = 2$ ; 3 —  $x/d_{\text{мо}} = 3$

ние  $k_{\text{ул}} = 0,37$ , при котором возможно обобщение опытных данных. Из рис. 3 видно, что предложенная зависимость (2) может быть использована для описания полученных опытных данных.

Из экспериментальных данных видно, что с уменьшением угла наклона коэффициент улавливания увеличивается. Пунктирные линии (см. рис. 2, в) проведены из предположения, что чем ближе раструб к поверхности стола ( $\alpha \rightarrow 0^\circ$ ), тем эффективнее локализация вредных выделений. Мы считаем, что это могло произойти по двум причинам. Во-первых, при  $\alpha \rightarrow 0^\circ$  расстояние между раструбом и ограничивающей поверхностью стола сокращается, поэтому скорость всасывания в точке выпуска ВВ постепенно увеличивается [4], тем самым повышая коэффициент улавливания. Однако  $k_{\text{ул}} \neq 1$ , как это возможно при полном укрытии (например, при  $x/d_{\text{мо}} = 0$ ), и стремится к какому-либо определенно-

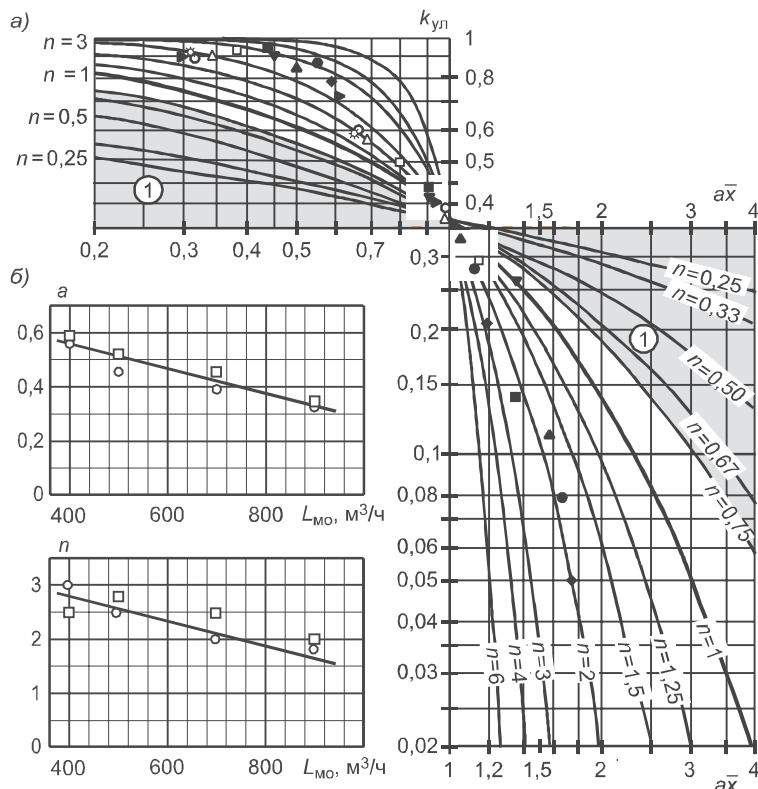


Рис. 3. Основные теоретические зависимости к формуле (2)

а — сводный график теоретически экспериментальных зависимостей коэффициента улавливания  $k_{\text{ул}}$  наклонного МВУ от относительного расстояния для семейства значений  $a/\bar{x}$  и  $n$  и результаты анализа и обобщения опытов автора по величине  $a/\bar{x}$

$\circ$  — при  $\alpha = 30^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 2$ ,  $a = 0,33$ ,  $F_{\text{мо}} = 0,0452 \text{ м}^2$ ),  $\bullet$  — при  $\alpha = 60^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 3$ ,  $a = 0,56$ ),  $\blacksquare$  — при  $\alpha = 60^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 2,5$ ,  $a = 0,45$ ),  $\square$  — при  $\alpha = 60^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 700 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 2$ ,  $a = 0,38$ ),  $\diamond$  — при  $\alpha = 60^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 1,8$ ,  $a = 0,32$ ),  $\blacklozenge$  — при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 2,5$ ,  $a = 0,59$ ),  $\blacktriangle$  — при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 2,8$  (2,5),  $a = 0,52$ ),  $\blacktriangledown$  — при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 700 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 2,5$ ,  $a = 0,45$ ) (наибольший разброс  $n = 1-3$ ),  $\triangle$  — при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 2,0$ ,  $a = 0,34$ ),  $\blacktriangleright$  — при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L_{\text{мо}} = 1200 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $n \approx 2,6$ ,  $a = 0,32$ );

1 — затененная область, где результаты при соответствующих значениях параметров не получены; б — величины коэффициента  $a$  и показателя степени  $n$  для двух углов наклона  $\alpha = 60^\circ$  и  $90^\circ$ , в зависимости от расхода воздуха

$\circ$  — при  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\square$  — при  $\alpha = 90^\circ$

му значению. Во-вторых, на плане лаборатории (см. рис. 1, *a*) видно, что поток воздуха из окна, двигаясь к двери, уносит ВВ в сторону МВУ, увеличивая коэффициент улавливания.

**Анализ результатов исследования.** Сравним полученные опытные данные с нормативными требованиями к коэффициенту улавливания. В п. 45 СП 1009–73 указано, что «количество вредностей, локализуемых местными отсосами (с учетом скорости движения воздуха в помещении и других факторов), для вытяжных шкафов составляет не более 90 %, для остальных видов местных отсосов — не более 75 %». В процессе эксперимента только на расстоянии  $x/d_{\text{мо}} = 1$  получены значения  $k_{\text{ул}} > 0,75$ . В остальных случаях они сильно отличаются для различных пространственных положений МВУ. Поэтому необходимо выбрать среднее значение  $k_{\text{ул}}$ , задавшись расстоянием и расходом удаляемого воздуха.

Рекомендованный производителями МВУ (ЗАО «СовПлим» (Россия), ООО «Экоюрис-Венто» (Россия), ЗАО «ИнВент» (Россия), Plymoth (Германия), Aerservice (Италия), Nederman (Швеция) и др.) расход удаляемого воздуха для конструкции, аналогичной той, что была принята в эксперименте, находится в диапазоне 200–700 м<sup>3</sup>/ч. Размеры и форма всасывающей воронки (см. рис. 1, *в*) приняты аналогичными вытяжному устройству MiniMan-100 фирмы ЗАО «СовПлим». Устройства предназначены для удаления вредных веществ, выделяющихся при процессах пайки, лужения, точечной сварки. При пайке мелких деталей всасывающее отверстие можно максимально приблизить к месту выделения вредностей. Однако для сварки постоянно выдерживать минимальные расстояния достаточно проблематично, так как сварной шов имеет длину, сравнимую с диаметром всасывающего отверстия. Поэтому можно считать, что если МВУ предусматривается для пайки, то  $k_{\text{ул}}$  следует выбирать для расстояния  $x/d_{\text{мо}} \approx 1–2$ , а для сварки —  $x/d_{\text{мо}} \approx 1–3$ . Средний коэффициент улавливания вредности для  $L_{\text{мо}} = 700$  м<sup>3</sup>/ч на расстоянии  $x/d_{\text{мо}} = 1–2$  равен  $k_{\text{ул}} \approx 0,77$ , на расстоянии  $x/d_{\text{мо}} = 1–3$   $k_{\text{ул}} \approx 0,65$ . Однако для сварки производители МВУ предлагают устройства с большим расходом удаляемого воздуха и диаметром всасывающего отверстия. Таким образом, полученные результаты исследований соответствуют вышеупомянутым требованиям норм.

**Выходы.** 1. Проведено экспериментальное исследование коэффициента улавливания МВУ. Получены зависимости от расхода удаляемого воздуха, расстояния от МВУ до источника вредности, угла наклона оси входного сечения МВУ к плоскости расположения источника (см. рис. 1).

2. Для коэффициента улавливания вычислена погрешность (неопределенность), с которой он был определен, в данном эксперименте она оказалась около ±15 % (доверительная вероятность  $P = 0,95$ ).

3. Результаты экспериментальных исследований подтверждают предложенную в работе [2] экспоненциально-степенную зависимость для нахождения коэффициента улавливания от скорости всасывания.

4. Предложена аналитическая зависимость (2) для нахождения коэффициента улавливания от относительного расстояния  $x/d_{\text{мо}}$ . Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность ее использования (см. рис. 3).

5. Коэффициент улавливания вредности представлен в полярных координатах (рис. 4, *a*) и в виде трехмерного графика (рис. 4, *б*). Эти графи-

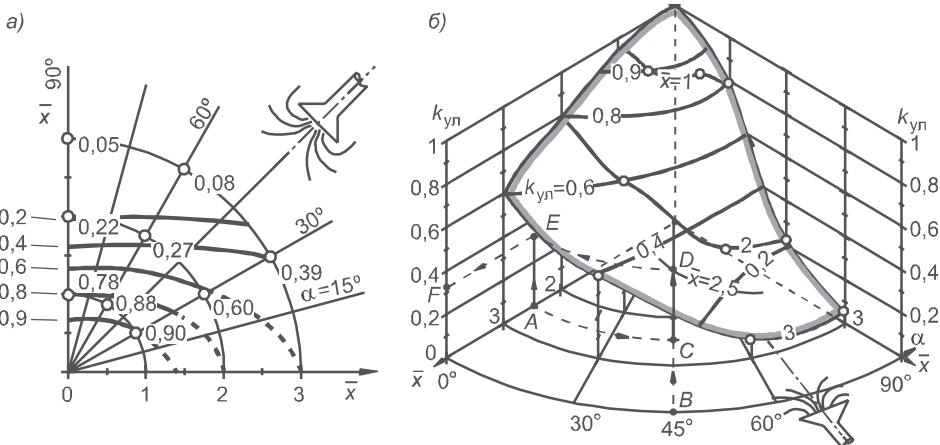


Рис. 4. Многофакторная зависимость коэффициента улавливания от относительного расстояния и угла наклона при  $L_{\text{мо}}/L_{\text{max}} = 0,33$ , построенная по опытным данным

а — график в полярных координатах; б — поверхность коэффициента улавливания

Ключ: при заданном  $L_{\text{мо}}/L_{\text{max}} = 0,33$  используем рис. 3, б, при заданных  $x/d_{\text{мо}} = 2,5$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ставим точки  $A$  и  $B$ , на их пересечении ставим точку  $C$ , из точки  $C$  поднимаемся вертикально вверх до линии  $x/d_{\text{мо}} = 2$ , точку  $D$  ставим посередине между линиями  $x/d_{\text{мо}} = 2$  и  $x/d_{\text{мо}} = 3$  (так как  $x/d_{\text{мо}} = 2,5$ ), из точки  $D$  вправо откладываем линию, равную кривой  $AC$ , и на пересечении с перпендикуляром из точки  $A$  ставим точку  $E$ , из точки  $E$  проводим линию до пересечения с осью  $k_{\text{ул}}$  (точка  $F$ ) и читаем значение —  $k_{\text{ул}} \approx 0,33$  (точнее значение  $k_{\text{ул}}$  можно определить по рис. 2, в)

ки удобны для понимания общей формы зависимости  $k_{\text{ул}} = f(x/d_{\text{мо}}, \alpha)$ . Их можно использовать для ориентировочной оценки  $k_{\text{ул}}$  при заданных  $x/d_{\text{мо}}$  и  $\alpha$ , однако для нахождения точных значений  $k_{\text{ул}}$  рекомендуются графики, изображенные на рис. 2.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гrimitlin, A.M. Отопление и вентиляция производственных помещений [Текст] / A.M. Grimilin, T.A. Datsuk, G.Ya. Krupkin, A.S. Strongin, E.O. Shil'krot. — СПб. : ABOK С-З, 2007. — 320 с.
- Сотников, А.Г. Теоретически-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции [Текст] / А.Г. Сотников, А.А. Боровицкий // Инж.-строит. журн. — 2012. — № 2. — С. 32–38.
- Эльтерман, В.М. Вентиляция химических производств [Текст] / В.М. Эльтерман. — М. : Химия, 1980. — 288 с.
- Батурина, В.В. Основы промышленной вентиляции [Текст] / В.В. Батурина. — М. : Профиздат, 1990. — 448 с.

**БОРОВИЦКИЙ Андрей Александрович, асп.,** E-mail: borovitsk@gmail.com  
**Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н. Столетовых**  
**УГОРОВА Светлана Вениаминовна, канд. техн. наук, доц.**  
**Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н. Столетовых**  
**ТАРАСЕНКО Владимир Иванович, канд. техн. наук, проф.**  
**Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н. Столетовых**

Получено 04.03.13

**Borovitskiy Andrey Alexandrovich**, post-graduate student, E-mail: borovitsk@gmail.com, Vladimir State University, Russia

**Ugorova Svetlana Veniaminovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Vladimir State University, Russia

**Tarasenko Vladimir Ivanovich**, candidate of technical sciences, professor, Vladimir State University, Russia

## **MULTIFACTOR RESEARCH OF THE CAPTURE EFFICIENCY OF LOCAL EXHAUST DEVICES**

In the given work the technique and results of experimental researches of capture coefficient of harm depending on attitude of the exhaust device and the charge of deleted air are presented. The investigated type of a local exhaust has gained the greatest extending in welding department. Theoretically-experimental dependence for definition of factor of trapping of harm is offered.

**Key words:** experiment, tracer gas, local exhaust devices, the capture coefficient.

### **REFERENCES**

1. Grimitlin, A.M. Heating and ventilation of production areas [Text] / A.M. Grimitlin, T.A. Datsyuk, G.Ya. Krupkin, A.S. Strongin, E.O. Shilkrot. — SPb. : AVOK S-Z, 2007. — 320 p.
  2. Sotnikov, A.G. Theoretical and experimental validation of the air changes in industrial ventilation optimization method [Text] / A.G. Sotnikov, A.A. Borovitskiy // Magazine of civil engineering. — 2012. — N 2. — P. 32–38.
  3. Elterman, V.M. Ventilation of chemical manufactures [Text] / V.M. Elterman. — M. : Chemistry, 1980. — 288 p.
  4. Baturin, V.V. Bases of industrial ventilation [Text] / V.V. Baturin. — M. : Profizdat, 1990. — 448 p.
-

## СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 625.7/.8

С.В. НОСОВ

### ИНТЕНСИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

На основе изменяющихся реологических свойств асфальтобетонных смесей при вакуумировании разработана технология их уплотнения вибрационными катками. Показано, что вибрационное уплотнение с вакуумированием снижает энергоемкость процесса, повышает эксплуатационные характеристики асфальтобетона, включая долговечность дорожных покрытий автодорог.

**Ключевые слова:** вибрационный каток, вакуумирование, асфальтобетонная смесь, уплотнение.

Большая потребность в строительстве новых и реконструкции существующих автодорог, в восстановлении дорожных покрытий, которые не в состоянии выдержать нормативных сроков эксплуатации по известным причинам, заставляет прибегать к разработке новых технологий строительства. Одна из наиболее ответственных операций строительства автодорог — уплотнение асфальтобетонных смесей, среди которых наибольшее применение получили горячие смеси. В связи с этим разработка интенсивных технологий их уплотнения, увеличивающих производительность комплектов дорожных уплотняющих машин, а также улучшающих качество и обеспечивающих долговечность дорожных покрытий, является важной и актуальной народнохозяйственной задачей.

Известны различные способы повышения податливости асфальтобетонных смесей при их уплотнении, среди них выделяется метод вакуумирования при одновременной укатке, теоретические основы которого разрабатывались научной школой под руководством д.т.н., проф. Н.Я. Хархуты<sup>1</sup> при непосредственном участии д.т.н., проф. А.А.Шестопалова, С.Н. Иванченко и В.П. Ложечко. Исследования [1] показали, что укатка асфальтобетонных смесей с одновременным вакуумированием обеспечивает лучшее перераспределение вяжущего в структуре материала, приводит к получению прочного, водо- и сдвигостойчивого асфальтобетонного покрытия и продлению срока его службы. Структурные изменения в асфальтобетоне, происходящие под действием вакуумирования, способствуют повышению прочности, длительной прочности при изгибе (сдвигостойчивости) и водостойкости (табл. 1, 2). На сегодняшний день нет, с научно-практической точки зрения, препятствий к использованию

<sup>1</sup> Хархута Н.Я. и др. Уплотнение асфальтобетонной смеси катком с пневмовакуумным балластным устройством // Автомобильные дороги, 1980. № 1. С. 16–18.

Таблица 1

**Результаты определения предела прочности на сжатие и статической усталости асфальтобетона (смесь марки I типа Г)**

Коэффициент уплотнения $K_y$	Способ уплотнения укаткой			
	статический	вибрационный	статический с вакуумированием	вибрационный с вакуумированием
Пределы прочности на сжатие $R_{20}$ , МПа				
0,99	—	2,91	—	3,35
0,97	2,54	—	2,61	2,96
0,96	2,45	2,66	2,63	2,79
0,94	—	—	2,11	2,14
Показатель статической усталости $t_{дл}$ , с (при напряжениях в образцах $\sigma_{дл}$ , равных 0,5 МПа)				
0,98	—	—	369	696
0,97	113	—	—	355
0,96	49	192	—	247
0,92	19	—	—	32

Таблица 2

**Результаты испытаний асфальтобетона на водостойкость  $R_v$  и длительную водостойкость  $R_{вд}$**

Коэффициент уплотнения $K_y$	Способ уплотнения укаткой			
	статический	вибрационный	статический с вакуумированием	вибрационный с вакуумированием
Водостойкость $R_v^*$				
0,99	—	<u>2,68</u> 0,92	—	<u>3,27</u> 0,98
0,97	<u>2,21</u> 0,87	—	—	<u>2,87</u> 0,97
0,96	<u>2,11</u> 0,86	<u>2,35</u> 0,89	<u>2,44</u> 0,93	<u>2,7</u> 0,96
0,94	—	—	<u>1,88</u> 0,89	<u>1,9</u> 0,9
Длительная водостойкость $R_{вд}^{**}$				
0,99	—	<u>2,53</u> 0,88	—	<u>3,11</u> 0,93
0,97	<u>2,08</u> 0,82	—	—	<u>2,61</u> 0,88
0,96	<u>1,99</u> 0,81	<u>2,17</u> 0,82	<u>2,23</u> 0,85	<u>2,46</u> 0,87
0,94	—	—	<u>1,75</u> 0,83	<u>1,79</u> 0,84

\* В числителе —  $R_v$ , МПа, в знаменателе —  $K_v$ .

\*\* В числителе —  $R_{вд}$ , МПа, в знаменателе —  $K_{вд}$ .

такой технологии в дорожном строительстве, в силу разработанной конструкции бесконтактной вакуумной камеры, устанавливаемой на раме дорожного катка [2].

Проведено углубленное изучение технологических процессов уплотнения дорожно-строительных материалов, позволяющее осуществить

развитие их реологии и основанное, с этой точки зрения, на дополнительно сформулированных принципах развития теории уплотнения грунтов земляного полотна и дорожных асфальтобетонных смесей<sup>2</sup>. В основу исследований была положена теория наследственной ползучести Больцмана — Вольтерры, согласно которой взаимосвязь между напряжениями и возникающими в уплотняемой среде деформациями описывается зависимостью

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $\varepsilon(t)$  — относительная деформация;  $\sigma(t)$  — напряжения, изменяющиеся по определенному закону;  $E$  — мгновенный модуль деформации;  $K(t-\tau)$  — функция влияния напряжений  $\sigma(t)$  в момент  $\tau$  на деформацию в момент  $t$  (или функция скорости ползучести). Известно, что эта функция убывает вместе с ростом разности  $t-\tau$ .

Экспериментальные исследования по оценке параметров кривых ползучести асфальтобетонных смесей, а также теоретические положения обосновано наводят на мысль о том, что параметры функций скоростей ползучести и релаксации, принимаемых согласно известным выражениям в виде экспоненциально-степенных функций

$$K(t) = e^{-\beta t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A\Gamma(\alpha)]^n t^{n\alpha-1}}{\Gamma(n\alpha)}, \quad S(t) = A e^{-\beta t} t^{\alpha-1}, \quad (2)$$

где  $A, \alpha, \beta$  — параметры ядер (функций скоростей) ползучести и релаксации;  $\Gamma(\alpha)$  — гамма-функция Эйлера, определенным или даже существенным образом влияют на интенсивность изменения напряженно-деформированного состояния в процессе уплотнения дорожных асфальтобетонных смесей.

При малых значениях времени  $t$  экспоненту можно приближенно принять равной единице, тогда функция становится степенной, для которой ось ординат в начальный период времени  $t = 0$  — касательная, и стремится к бесконечности. При достаточно больших значениях времени  $t$  функция описывается экспонентой с отрицательным показателем. Таким образом, представленные ядра обеспечивают два ярко выраженных и плавно переходящих один в другой участка, на которых функция является монотонной и имеет простейший вид степенной функции и экспоненты. Параметр  $A$  характеризует интенсивность нарастания деформации или падения напряжений во времени.

Рассмотрено влияние изменения параметров  $A, \alpha$  и  $\beta$  функции скорости ползучести  $K(t)$  на величину относительной деформации  $\varepsilon$  слоя материала при его уплотнении статической нагрузкой согласно закону Хевисайда. Получены графические зависимости, отражающие интенсивность изменения деформации через величину податливости  $1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau$

(рис. 1). Более интенсивное приращение деформации слоя уплотняемого материала в случае нагружения его по закону Хевисайда происходит или при увеличении параметра  $A$ , или при уменьшении параметра  $\alpha$ . Как показали исследования, влияние параметра  $\beta$  функции скорости ползучести

<sup>2</sup> Носов С.В., Бутузов Г.М. Принципы развития теории уплотнения и концептуальная модель формирования технологий уплотнения дорожно-строительных материалов // Вестн. ВолгГАСУ. 2012. Вып. 27(46). С. 16–21. (Сер. Стр-во и архитектура).

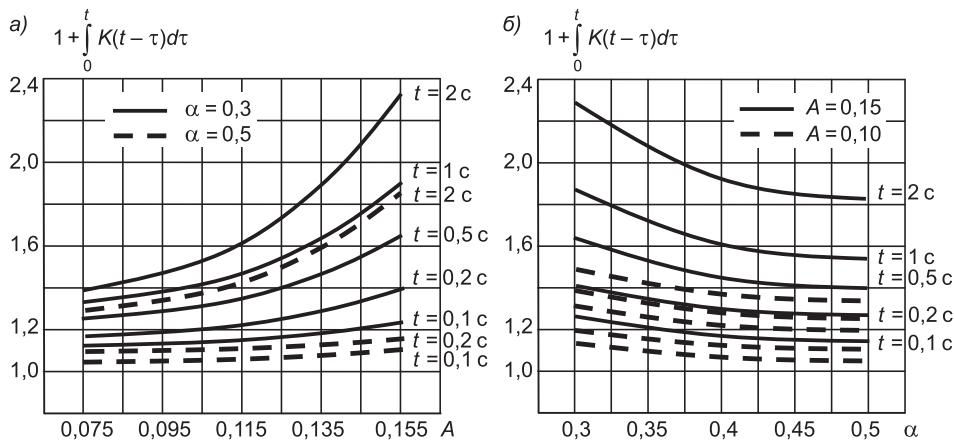


Рис. 1. Влияние параметров  $A$ (а) и  $\alpha$ (б) функции скорости ползучести на интенсивность изменения деформации (на рис. 1, б для пунктирных кривых время фиксации деформации  $t$  от 2 до 0,1 с проставляется аналогично сверху вниз)

$K(t-\tau)$  незначительно изменяет интенсивность накопления деформации уплотняемого слоя.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований ползучести слоев горячих асфальтобетонных смесей. В табл. 3 приведены пересчитанные параметры функции скорости ползучести для экспериментальных кривых ползучести. При этом отмечена следующая закономерность: повышение интенсивности развития деформации слоя под действием вибрационной нагрузки, по сравнению с развитием деформации под действием статической нагрузки, определяется, в первую очередь, увеличением параметра  $A$ , а повышение интенсивности развития деформации вакуумированного слоя смеси, по сравнению с развитием деформации невакуумированного слоя смеси, обусловлено уменьшением параметра  $\alpha$ .

Таблица 3

**Параметры функции скорости ползучести  
для экспериментальных кривых ползучести**

Параметр	Вид нагрузки			
	вибрационная	статическая	вибрационная с вакуумированием	статическая с вакуумированием
<b>Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (полная деформация)</b>				
$A$	0,7806	0,4245	0,3986	0,2299
$\alpha$	0,50	0,35	0,40	0,30
<b>Песчаная асфальтобетонная смесь (полная деформация)</b>				
$A$	0,7621	0,6982	0,3646	0,2150
$\alpha$	0,50	0,35	0,40	0,30
<b>Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (обратимая деформация)</b>				
$A$	1,7709	0,4121	0,9908	0,2672
$\alpha$	0,50	0,35	0,40	0,30
<b>Песчаная асфальтобетонная смесь (обратимая деформация)</b>				
$A$	1,6800	0,3965	0,9424	0,2597
$\alpha$	0,50	0,35	0,40	0,30

Такое разделение зависимости интенсивности развития деформации слоя от различных параметров функции скорости ползучести объясняется различным способом формирования структуры асфальтобетона, что сказывается на изменении закономерностей развития деформаций слоя асфальтобетонной смеси при различных технологических процессах уплотнения. Таким образом, развитие реологии дорожных асфальтобетонных смесей позволило выявить новые существенные закономерности в развитии деформации уплотняемых слоев на пути совершенствования технологий их уплотнения.

Для оценки нелинейности свойств вакуумированной асфальтобетонной смеси, в отличие от невакуумированной<sup>3</sup>, было проведено исследование при различных температурах, значения которых лежали в диапазоне 70–120 °С. Коэффициент уплотнения и толщина слоя составляли соответственно 0,9 и 5 см. Результаты эксперимента представлены на рис. 2 в относительных единицах, где  $E_{0,11}$  — модуль деформации материала, соответствующий базовым кривым ползучести при нагрузке на штамп контактным давлением 0,11 МПа. Нелинейность свойств уплотняемого материала, проявляющаяся в повышении модуля деформации при возрастании нагрузки, в большей степени выражается у вакуумированных слоев асфальтобетонной смеси, причем нелинейность тем выше, чем больше температура слоя. При температуре 70 °С вакуумирование практически не производит своего эффекта, и отношение ( $E/E_{0,11}$ ) в зависимости от приложенной нагрузки одинаково как у вакуумированных, так и у невакуумированных смесей.

В соответствии с разработанной динамической моделью вибрационного катка с вакуумным устройством [3] установлено, что вначале процесса уплотнения вакуумированной асфальтобетонной смеси требуется незначительный расход мощности на поддержание колебаний виброплатформы катка, зато, начиная с момента, соответствующего значению коэффициента уплотнения 0,96, мощность постепенно растет от прохода к проходу, и в конце процесса уплотнения составляет для легкого катка мас-

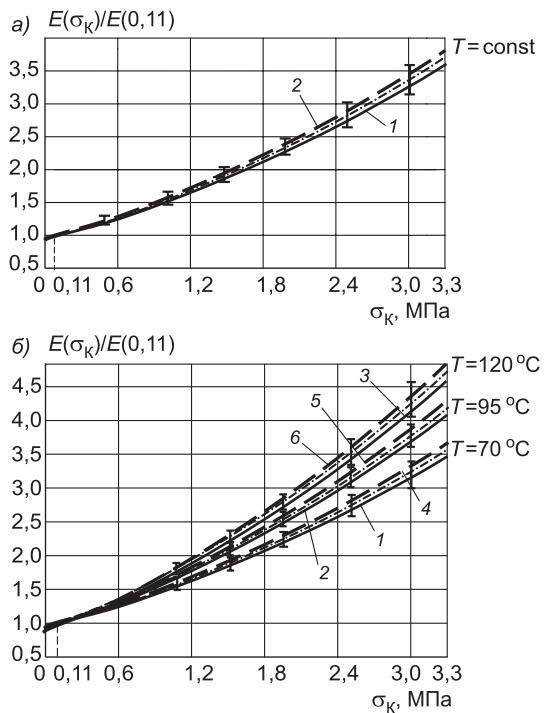


Рис. 2. Зависимость модуля деформации слоя асфальтобетонной смеси от контактных давлений в процессе уплотнения невакуумированных (а) мелкозернистой (1) и песчаной (2) и вакуумированных (б) мелкозернистой (1, 2, 3) и песчаной (4, 5, 6) асфальтобетонных смесей

<sup>3</sup> Носов С.В., Носов В.В. К вопросу по определению модуля деформации уплотняемых слоев дорожно-строительных материалов // Изв. вузов. Строительство. 1991. № 10. С. 104–108.

сой 3,5–4 т порядка 0,75–0,8 кВт. Данная мощность определялась по формуле, предложенной С.А. Варгановым [4],

$$N = \frac{1}{2} P_2 A \omega \sin \varphi, \quad (3)$$

где  $N$  — мощность, идущая на поддержание колебаний, Вт;  $P_2$  — величина вынуждающей силы, Н;  $A$  — амплитуда колебаний вибровальца, м;  $\omega$  — угловая частота вращения дебалансов,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\varphi$  — угол сдвига фаз между перемещением вибровальца и направлением вынуждающей силы.

При этом [3]

$$A = \frac{P_2}{\sqrt{\left[ E - M_2 \omega^2 + \frac{C M_1 \omega^2}{C - M_1 \omega^2} - E' D(\omega) - \frac{P_1}{A} \right]^2 + \left[ E' C(\omega) - \frac{P_1}{A} \right]^2}} \quad (4)$$

$$\text{и} \quad \varphi = \arctg \frac{-E' C(\omega) + \frac{P_1}{A}}{E - M_2 \omega^2 + \frac{C M_1 \omega^2}{C - M_1 \omega^2} - E' D(\omega) - \frac{P_1}{A}}, \quad (5)$$

где  $P_1$  — сила, действующая на раму катка со стороны вакуумной камеры;  $P_2$  — амплитудное значение вынуждающей силы вибровальца катка;  $M_1$  — масса подпрессоренной части катка, приходящейся на вибровалец;  $M_2$  — масса вибровальца;  $C$  — жесткость амортизаторов;  $\omega$  — круговая частота колебаний вибровальца;  $C(\omega)$  и  $D(\omega)$  — синус- и косинус-преобразования Фурье;  $E'$  — физико-механический параметр слоя уплотняемого материала, являющийся отображением модуля деформации на единицу толщины уплотняемого слоя

$$E' = \frac{E F_k}{\varepsilon(t) h_{\text{сл}}}. \quad (6)$$

В последнем выражении  $E$  — модуль деформации слоя уплотняемого материала;  $F_k$  — площадь штампа, с помощью которого определяется модуль деформации слоя толщиной  $h_{\text{сл}}$ ;  $\varepsilon(t)$  — относительная деформация.

Амплитуда колебаний вальца виброкатка с вакуумным устройством (ВУ) в процессе уплотнения, согласно расчетам, меняется от 0,17 до

0,4 мм, что подтвердилось при полевых испытаниях виброкатка с ВУ. Следовательно, максимальная мощность на привод вибратора без учета потерь на трение в подшипниках дебалансного вала вальца катка составляет  $N_b = 1,6$  кВт. Ускорение вальца виброкатка с ВУ имеет значение 1,01–2,27g в зависимости от частоты колебаний, величины вынуждающей силы и состояния уплотняемого слоя.

Параллельно расчетам мощности на привод вибратора виброкатка с ВУ были рассчитаны мощности и для обычного виброкатка (рис. 3). На начальном этапе процесса уплот-

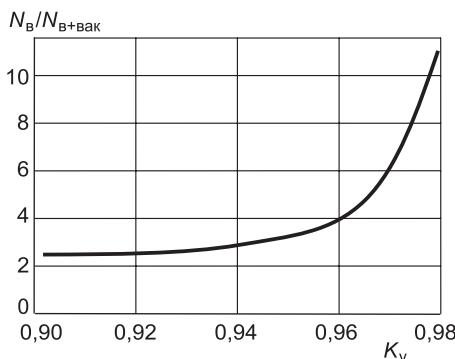


Рис. 3. Относительное значение мощности на поддержание колебаний вальца виброкатка с ВУ в зависимости от коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси

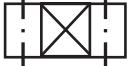
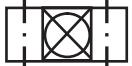
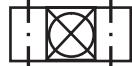
нения указанная мощность у виброкатка в 2,5–3 раза выше, чем у виброкатка с ВУ. На завершающем этапе процесса уплотнения это отношение увеличивается до 10–12. Таким образом, в технологическом процессе при уплотнении вакуумированных слоев асфальтобетонных смесей виброкатками значительно экономится мощность на привод вибратора, особенно на завершающем этапе уплотнения, и снижается энергоемкость.

Исследованиями установлено, что в случае применения на дорожном катке вакуумного устройства контактного типа перед уплотнением горячей асфальтобетонной смеси необходимо производить предварительную подкатку статическим катком без вакуумирования, что устраняет возможность возникновения задиров слоя рыхлой смеси. При использовании на дорожном катке бесконтактной вакуумной камеры (БВК) [2] предварительной подкатки не требуется. В связи с этим в табл. 4 представлены технологические схемы уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием, основанные на теоретических исследованиях с развитием реологии асфальтобетонных смесей и на экспериментальных данных, полученных в условиях эксплуатации катков (на примере смесей песчаной типа Г и мелкозернистой типа Б).

**Схема 1.** Испытания, проведенные с применением катка ДУ-47А, оснащенного вакуумным устройством контактного со слоем типа, показали,

Таблица 4

**Технологические схемы уплотнения горячих асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием**

Схема	Комплект катков с температурными интервалами их применения			
	легкий	средний	тяжелый	триплекс
1	130–110 °C  С	110–80 °C, $K_y = 0,92$ ,  С+ВУ(БВК) $n = 8\text{--}10$	80–75 °C  С	
2	130–110 °C  С	110–80 °C $K_y = 0,92$ ,  В+ВУ(БВК) $n = 6\text{--}8$	80–75 °C  С	
3	140–120 °C  С 120–85 °C, $K_y = 0,92$  В+ВУ(БВК) $M = 3,5\text{--}4 \text{ т}, n = 6\text{--}8$		85–75 °C  С	
4	130–85 °C  В+БВК $M = 3,5\text{--}4 \text{ т}, n = 6\text{--}8$		85–75 °C  С	

Примечание.  С — статический гладковальцовочный каток;  С+ВУ(БВК) — статический каток с вакуумным устройством контактного со слоем или бесконтактного типа;  В+ВУ(БВК) — вибрационный каток с ВУ или БВК;  В+БВК — виброкаток с БВК;  С — трехвальцовочный статический каток.

что для достижения требуемых оценочных показателей необходимо затратить 8–10 проходов по следу. Обязательным является применение легкого дорожного катка для предварительной подкатки слоя асфальтобетонной смеси. На завершающей стадии процесса уплотнения предусматривается использование трехвальцовового трехосного катка. Схема апробирована на объектах дорожного строительства Ленинградской области.

**Схема 2.** После предварительной подкатки слоя смеси легким статическим катком применяется виброкаток с ВУ контактного или бесконтактного типа с числом проходов 6–8. Появляется возможность увеличить производительность комплекта машин, длину захватки уплотняемого слоя и изменить скорость асфальтоукладчика на 12–15 %. При этом следует учесть, что основные оценочные показатели уплотнения (прочность, водонасыщение и т.д.) улучшаются. Схема с применением среднего виброкатка с ВУ контактного типа апробирована на объектах дорожного строительства Ленинградской области.

**Схема 3.** Позволяет улучшить показатели энергоемкости и металлоемкости комплекта машин за счет снижения массы виброкатка, переводя его в разряд легких катков. Уплотнение смеси виброкатком с ВУ или БВК начинается при температуре 120 °С. При этом увеличивается длина захватки уплотняемого слоя, производительность комплекта машин при существенном повышении показателей прочности, сдвигостойчивости и морозостойчивости асфальтобетона путем формирования более однородной структуры за счет вакуумирования смеси при более высокой температуре. Схема с применением легкого виброкатка с ВУ контактного типа апробирована на объектах дорожного строительства Ленинградской области.

**Схема 4.** Предусматривает использование только легкого вибрационного катка с БВК. Процесс уплотнения начинается без предварительной подкатки при температуре смеси 130 °С. Снижение общего числа проходов комплектом катков за счет исключения предварительной подкатки легким статическим катком повышает производительность комплекта на 25–30 %, снижает его показатели энергоемкости и металлоемкости, а также улучшает эксплуатационные свойства асфальтобетонных покрытий из-за более высокой температуры вакуумирования. Технологические режимы работы катка при уплотнении слоя асфальтобетонной смеси настраиваются со смещением на два последующих прохода динамических характеристик (частоты колебаний вибровальца и относительной вынуждающей силы вибровозбудителя колебаний), когда первые два прохода катка осуществляются без вибрации.

Схема 1 разработана с участием автора, схемы 2–4 — автором статьи лично.

Таким образом, на основе изменения реологических свойств асфальтобетонных смесей при вакуумировании разработана технология их уплотнения вибрационными катками. Показано, что вибрационное уплотнение с вакуумированием снижает энергоемкость процесса и повышает основные эксплуатационные характеристики асфальтобетона.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носов, С.В. Уплотнение асфальтобетонных смесей с вакуумированием [Текст] / С.В. Носов // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2010. — № 3. — С. 36–39.
2. Носов, С.В. Бесконтактная вакуумная камера как рабочий орган дорожного катка [Текст] / С.В. Носов // Строительные и дорожные машины. — 2001. — № 1. — С. 10–13.

3. Носов, С.В. Динамическая модель вибрационного катка с вакуумным устройством [Текст] / С.В. Носов, В.В. Носов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1991. — № 7. — С. 101–107.
4. Варганов, С.А. Теоретические и экспериментальные исследования динамики вибрационных катков [Текст] / С.А. Варганов // Тр. ВНИИСтройдормаш. — М., 1962. — № 28. — С. 55–97.

НОСОВ Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: nosovsergej@mail.ru  
Липецкий государственный технический университет

Получено после доработки 06.03.13

**Nosov Sergey Vladimirovich**, candidate of technical sciences, assistant professor;  
E-mail: nosovsergej@mail.ru, Lipetsk State Technical University, Russia

## **INTENSIVE TECHNOLOGY SEALS ROAD ASPHALT MIXES CHANGING THEIR RHEOLOGICAL PROPERTIES**

Based on changing the rheological properties of asphalt mixtures at all in the technology of their vibratory compaction rollers. It is shown that vibration seal evacuation process reduces energy consumption and increases the performance of asphalt concrete, including the durability of pavement roads.

**Key words:** vibratory roller, vacuum, asphalt mixture, seal.

### REFERENCES

1. Nosov, S.V. Compaction of asphalt mixes with pumping [Text] / S.V. Nosov // Science and Machinery in Road Industry. — 2010. — N 3. — P. 36–39.
2. Nosov, S.V. Contactless vacuum chamber as a working body road roller [Text] / S.V. Nosov // Building and Road Machines. — 2001. — N 1. — P. 10–13.
3. Nosov, S.V. A dynamic model of the vibratory roller with vacuum devices [Text] / S.V. Nosov, V.V. Nosov // News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture. — Novosibirsk, 1991. — N 7. — P. 101–107.
4. Varganov, S.A. Theoretical and experimental studies of the dynamics of vibrating rollers [Text] / S.A. Varganov // Proc. VNIIStroydormash. — M., 1962. — N 28. — P. 55–97.

## **НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ**

**УДК 711.4-167**

**Е.И. ЗАГОРОДНОВ**

### **МАЛОЭТАЖНОЕ ДОМОСТРОЕНИЕ В БОЛЬШОМ ГОРОДЕ**

Рассматриваются современные тенденции развития городского малоэтажного домостроения с точки зрения решения градостроительных задач обеспечения населения жильем в количественном измерении и по критериям доступности для большинства.

**Ключевые слова:** градостроительство, домостроение, реконструкция.

Жилая малоэтажная застройка в городе в настоящее время должна стать одним из самых массовых объектов архитектурной деятельности. С каждым годом в нашей стране расширяются масштабы и ускоряются темпы жилищного строительства, улучшается качество проектирования и застройки жилых районов. Однако продолжает оставаться актуальной задача совершенствования градостроительных, проектных решений, повышения их экономичности, архитектурной выразительности, наилучшей архитектурно-планировочной организации жилых малоэтажных районов и микрорайонов. Проблема развития малоэтажного строительства в городах рассматривается как социально-политическая и экономическая задача первостепенной важности. К разработке вопросов градостроительного зонирования и экономики планировки городов надо подходить с широких государственных позиций, во всеоружии знаний, необходимых для определения реальных экономических условий развития города на ближайший и более отдаленный периоды. Между тем вопросы экономики городского жилищного строительства наиболее слабо разработаны в градостроительных проектах, и в этом заключаются недостатки работ по планировке городов на современном уровне, основной из которых — крайне неэкономичное использование, как правило, ограниченных городских пространств.

Разные территории с течением времени развили различные типы морфологии застройки, при этом их объединяет наличие базового параметра — плотность застройки. Отталкиваясь от него, можно выделить две противоположные модели развития территорий: модель экстенсивного развития, называемая стихийным разрастанием застройки и модель интенсивного развития, называемая компактной застройкой. В связи с этим на территории Новосибирска и пригородов предстоит сделать принципиальный выбор: стать ли городу компактным образованием или превратиться в разросшуюся агломерацию. На этом фоне преимущества высокоплотной малоэтажной застройки и соответствующих проектов комплексного освоения территорий становятся очевидными, а приоритет такого рода жилья — наиболее вероятным сценарием перспективного го-

родского развития. Во-первых, малоэтажки достаточно быстро возводятся благодаря современным технологиям, весь процесс занимает от месяца до полугода. Во-вторых, для строительства используются, как правило, домокомплекты, которые почти на 90 % подготовлены в заводских условиях, что обуславливает и вполне приличное качество этих строений. В-третьих, рыночная стоимость таких домов вполне сопоставима с ценой экономжилья в многоэтажных домах, а в случае применения инновационных градостроительных проектов и гораздо ниже. Определяющим при застройке городских территорий является выбор наиболее эффективной системы расселения, ориентированной на первоочередное обеспечение доминантного слоя (среднего класса) доступным малоэтажным жильем экономкласса, исходя из перспективной нормы обеспеченности жилой площадью. Однако, анализируя практику малоэтажного домостроения, приходится констатировать определенную неразвитость планировочных решений малоэтажных жилых образований, демонстрирующую закоснелость и догматизм архитектурных и градостроительных решений, не вполне отвечающих потребностям современного городского сообщества, что приводит к низкой плотности городской застройки вообще и малоэтажной в частности, и как следствие этого:

- к неоправданно высокой территориальной и инфраструктурной ресурсоемкости и соответствующим материальным издержкам;
- затруднениям в нормативном обеспечении территории объектами социально-бытового и культурного назначения по критериям шаговой доступности;
- низкому уровню комфортности среды, обусловленному невозможностью создания приемлемых условий ввиду чрезмерной просматриваемости и проветриваемости, а также низкой степени сезонного использования территории;
- ограничению возможностей социализации населения, столь характерной для индивидуального способа расселения, вызванного его неоднородным составом как по возрастным, так и профессиональным признакам;
- гипертрофированному масштабу застройки на базе архаичной, микрорайонной планировочной структуры жилых поселений, присущей многоэтажной застройке периода расширенной индустриализации.

Отсюда приоритетами градостроительного и социально-экономического развития крупного города являются:

1. Ограничение использования новых неосвоенных территорий, жесткое ограничение территориального расплазания вновь образуемых малоэтажных микрорайонов за счет повышения нормативной плотности застройки, без ущерба для качества среды обитания на базе перехода к инновационным градостроительным технологиям — квартальному принципу застройки городских селитебных территорий и массовому применению эффективных форм высокоплотной малоэтажной застройки.

2. Возведение компактного города с высокоплотной малоэтажной застройкой. «Растягивание» города чрезмерно увеличивает расходы на содержание социальной и инженерной инфраструктуры. Плотная застройка характеризуется более низкими энергетическими затратами, интенсивной социальной жизнью и возможностями для обеспечения безопасности жителей, она позволяет эффективно использовать системы общественного транспорта. Градостроительство сегодня — это не освоение новых, а реабилитация промышленных зон и конверсия обширных городских деградирующих территорий.

3. Возвращение к квартальной структуре. Современное градостроительство отказывается от архаичной микрорайонной структуры в пользу компактных малоэтажных кварталов. Достижения квартала в гармоничном балансе «общественное—частное». Улицы по фронту квартала становятся общественными пространствами с магазинами, кафе и проч. Внутри кварталов создаются уютные дворы. Квартальная застройка обеспечивает большую транспортную проницаемость города. Но самое главное: кварталы значительно меньше микрорайонов и в отличие от последних стимулируют создание полноценных коммунальных зон.

4. Строительство нового «старого» типа социального жилья — государственного арендного. В последнее десятилетие правительства европейских государств стали резко увеличивать бюджеты, отведенные на возведение социальных типов жилья (не коммерческая аренда), что доказывает: либеральная модель, когда человек зарабатывает и сам покупает себе жилье, не работает для большей части населения. Для поддержания необходимого баланса между спросом и предложением властям необходимо сформировать соответствующее современному состоянию общественных отношений новое предложение на рынке в целях удовлетворения массового спроса на доступное жилье. Ничто не мешает либо вернуть госсобственность, либо организовать государственные строительные компании, либо разместить госзаказ на государственное арендное жилье в частных строительных компаниях по приемлемым ценам и предложить его на рынке, тем самым сбив спекулятивные цены. За счет снижения перечисленных расходов можно добиться кардинального уменьшения издержек строительных компаний.

5. Государственное регулирование. Любой план инновационного развития территории обречен на провал, если не имеет экономической основы, ибо совершенно очевидно, что ему не суждено воплотится в жизнь без жесткого государственного управления и надзора, поскольку сложные технически и затратные экономически инновации исчезнут в саморегулируемых, а значит фактически непредсказуемых и неуправляемых процессах, стремящихся и настроенных в первую очередь на быстрое получение максимальной прибыли с минимальными усилиями.

Предлагаемая модель градостроительного развития раскрывает пути достижения максимального эффекта от возрастающих государственных капиталовложений, одновременно создает условия и предпосылки для «правильного» развития рынка недвижимости с наибольшей пользой для общества. Роль местных властей наряду с государственными институтами в процессе реализации модели является определяющей. Необходимо сформировать и осуществлять специальную политику, направляющую развитие в соответствии с моделью компактного города, на основании разработанных и утвержденных градостроительных документов, учитывающих массированное применение в городе эффективных малоэтажных технологий.

Принимая во внимание преимущества и недостатки традиционных форм обустройства малоэтажных жилых поселков, перед специалистами-градостроителями встает задача поиска новых форм, учитывающих современные тенденции жилищного строительства на следующих базовых принципах: эффективность, энергосбережение, экономичность, экологичность и эргономичность (принцип «5Э»). По сути дела речь идет о разработке универсальной градостроительной системы квартального типа за счет применения комбинаций из различных типов малоэтажных зданий (многоквартирных, блокированных, индивидуальных) и как след-

ствие этого получении новых потребительских свойств или нового содержания.

Наглядным примером такого подхода к решению конкретной градостроительной задачи может служить разработанный автором вариант универсальной системы малоэтажного строительства «КоловоротЪ», позволяющей получить положительный баланс между преимуществами и недостатками как малоэтажного, так и многоэтажного принципа расселения, и в первую очередь нормативно высокой плотности и соответственно достаточной эффективности малоэтажной застройки городского типа.

Принципиально новый композиционный эффект достигается благодаря оптимальному объемно-планировочному решению жилого квартала «КоловоротЪ», образованного оригинальной постановкой четырех жилых строений в разных вариантах (многоквартирные, блокированные и индивидуальные). Такой планировочный прием позволяет добиться композиционного единства квартальной застройки при достаточно высокой обособленности отдельных строений. Другими словами, это попытка архитектурными средствами разрешить основное цивилизационное противоречие между общественным и частным, стереть грань между городом и деревней, т.е. фактически добиться гармоничного сочетания и мирного сосуществования этих противоположностей, объединенных в единое целое.

Дальнейшее пространственное развитие системы на базе типовых кварталов «КоловоротЪ» предполагает трансформацию кварталов в жилой микрорайон «КоловоротЪ», с необходимой и достаточной для населения коммунальной инфраструктурой. И наконец, как закономерный итог этого движения: квартал — микрорайон, возникновение следующей структурной единицы универсальной планировочной системы — жилой район «КоловоротЪ», образованный слиянием нескольких микрорайонов с обустройством территории для размещения объектов общего назначения.

Инновационность универсальной планировочной системы «КоловоротЪ» заключена в оптимальном использовании принципов мало- и многоэтажной застройки при одновременном исключении присущих этим видам строительства недостатков. «КоловоротЪ» — система высокоплотной, малоэтажной городской застройки, вполне сопоставимая с многоэтажной и превосходящая ее по эффективности (таблица) — реальная конкурентоспособная альтернатива, позволяющая применять в единой градостроительной, планировочной и конструктивной системе все известные типы малоэтажных зданий для достижения новых, более высоких потребительских свойств, в том числе:

- высокой конкурентоспособности за счет высоких технико-экономических показателей малоэтажной застройки городского типа и, как следствие, низкой ресурсоемкости, прежде всего территориальной;

- выхода на новый, более высокий уровень комфорtnости среды благодаря созданию оригинальной системы полузамкнутых дворовых пространств (внутренних двориков), выразительного фасада путем обустройства озелененных фрагментов территории (внешних двориков), работающих на общую композицию;

- социализации населения на базе создания межквартальных и межрайонных коммунальных зон для размещения объектов соцкультбыта, отдыха и спорта;

- высокой степени унификации, универсальности и вариативности малоэтажной застройки без существенного изменения конструктивной и планировочной структуры.

### Эффективность типов градостроительных систем

Показатель	Тип застройки	
	микрорайонный	квартальный
Многоквартирный жилой дом	Многоэтажный	Малоэтажный
Тип	Башенный (24×24 м)	«КоловоротЪ»
Площадь расчетного земельного участка — микрорайона, га	1,0 (микрорайон 100×100 м)	1,0 (4 типовых квартала «КоловоротЪ» 50×50 м)
Количество строений (секций) на расчетном участке	1	16
Нормативная дворовая территория (СНиП 2.07.01-89)	9,9 м <sup>2</sup> /чел.	30 м <sup>2</sup> /квартиру
Приведенная дворовая территория (с учетом внутридворовых проездов), м <sup>2</sup> /чел.	12,87*	11,5
Фактическая дворовая территория (с учетом муниципального норматива), м <sup>2</sup>	7696,0	7488,0
Количество жителей, чел.	364**	499
Количество квартир	140	192
Количество этажей расчетное	14	3
Общая площадь жилых домов, м <sup>2</sup>	8064,0	8428,5
Общая площадь квартир, м <sup>2</sup>	5645,0	6925,0
Отношение полезной площади дома к общей площади (к.п.д. жилого дома)	0,7 (70 %)	0,84 (84 %)

\* С учетом нормы озеленения микрорайона — 6 м<sup>2</sup>/чел.

\*\* Коэффициент семейности — 2,6 чел./квартиру (данные Мэрии г. Новосибирска).

**Выводы.** Выход полезных площадей при прочих равных условиях у системы «КоловоротЪ» значительно выше обычного многоэтажного строительства (в среднем до 23 %, в зависимости от типов применяемых домов серии «КоловоротЪ»). Это преимущество достигается более мягкими нормативными требованиями к планированию дворовых территорий малоэтажного строительства и, как следствие, более эффективного использования земельных ресурсов, а также оптимального объемно-планировочного решения жилого квартала в системе «КоловоротЪ».

*ЗАГОРОДНОВ Евгений Иванович, проф.; E-mail: e.zagorodnov@gmail.com  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено после доработки 18.03.13

**Zagorodnov Evgeniy Ivanovich**, professor; E-mail: e.zagorodnov@gmail.com,  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

### **LOW-RISE BUILDING CONSTRUCTION IN A BIG CITY**

Issues on modern trends of urban low-rise house building are considered in terms of completing urban planning goals focused on dwelling provision to population in quantitative and availability terms based on the fulfillment.

**Key words:** urban planning, haus bilding, reconstruction.

УДК 72.01(571.1/.5)

М.В. БЕЖАНОВА

**КОМПОЗИЦИОННО-СТИЛЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ  
АРХИТЕКТУРНЫХ АНСАМБЛЕЙ  
В ИСТОРИЧЕСКИХ ЦЕНТРАХ  
КРУПНЫХ СИБИРСКИХ ГОРОДОВ**

Рассматриваются композиционно-стилевые особенности архитектурных ансамблей в исторических центрах крупных сибирских городов: Омска, Барнаула, Новосибирска, сложившихся в XX в.

**Ключевые слова:** архитектурный ансамбль, система застройки, исторический центр, вертикальные доминанты, площади, система композиционных связей.

Центр — важнейший структурный элемент, связывающий между собой все части градостроительной системы. Большинство центров городов представляют собой разностилевую, но гармоничную систему застройки, объединяющую несколько архитектурных ансамблей. Они формируют главные планировочные узлы и оси композиции всего города с доминантами — высотными значимыми зданиями, образующими систему визуальной ориентации. Понятие архитектурный ансамбль подразумевает взаимно согласованное расположение и соразмерность открытых пространств, растительности, зданий и сооружений. В крупных сибирских городах композиции ансамблей на магистралях, торговых и главных площадях обусловлены своеобразными природно-ландшафтными, инфраструктурными особенностями, спецификой застройки в различные исторические периоды. Для каждого этапа развития городов были характерны свои особенности, отразившиеся в масштабах площадей, магистралей, в выделении доминант как отдельных сооружений или их комплексов, в соотношении массивов застройки и открытых пространств.

К началу XX в. в крупных городах Сибири выделились наиболее выразительные архитектурные ансамбли с доминирующими отдельными сооружениями, несущими определенный архитектурно-художественный стиль. Архитектурные ансамбли в этот период были связаны с застройкой главных магистралей, со сложившимися площадями с соборами, с формированием торговых площадей и улиц. Так, в Омске образовалась Соборная площадь с композиционным центром — Успенским собором, возведенным в 1898 г. Трапециевидная в плане площадь имела периметральную застройку с центром, пятиглавым собором по проекту Э.Ф. Вирриха в «русском стиле». Он выделялся обилием декора, полихромией фасадов, мощным центральным куполом и был одной из главных высотных и градостроительных доминант города, замыкая на себе перспективы нескольких улиц.

В Новониколаевске доминировал объем собора Александра Невского. Возведенный по проекту К.К. Лыгина в «неовизантийском» стиле он стал одним из первых кирпичных зданий в городе, выделяясь среди низкой деревянной застройки, и одновременно подчеркивая направление главного городского проспекта и открывавшуюся речную панораму

центра города. Несколько позже, в 1914 г., в Новониколаевске была возведена часовня Николая Чудотворца, высотный объем которой подчеркнул направление главной городской магистрали. Ей стал Николаевский, позже Красный проспект.

В Барнауле (исторически город — промышленный центр) к началу XX в. выделялся ансамбль Соборной площади с центром — Петропавловским собором, построенным в конце XVIII в. В архитектурном ансамбле площади крупный объем собора подчинял себе окружающую застройку площади и окрестных улиц, замыкая перспективу Соборного переулка. На главной городской магистрали Барнаула, Московском проспекте, постепенно формировались ансамбли культовых зданий различных конфессий: Богородице-Одигитриевская церковь (1795–1815 г., снесенная в советское время), лютеранская церковь (1861 г., уничтожена в 1970-е гг.), Никольская полковая церковь (1903–1906 гг.), католический костел (1913 г.). Наряду с Петропавловским собором в начале XX в. они поддерживали вертикальный ритм и определяли акценты в композиционной системе центра.

В архитектурно-художественной системе исторических центров всех рассматриваемых городов к началу XX в. выделялись значимые планировочные образования — площади: торговые, главные общественные. Они отличались по типу (замкнутые, открытые), форме (прямоугольные, квадратные и др.), расположению в планировочном каркасе. Если в Барнауле и Новосибирске главные городские площади формировались на основной магистрали, то в Омске — смежно с ней (она проходила по касательной с одной из сторон площадей). Центральные площади Омска отличались «перетеканием» пространств, так, территории Соборной и торговой площадей создали единую центральную зону.

В центре Новониколаевска сформировалась огромная Ярмарочная площадь, плотно застроенная по периметру торговыми сооружениями, в основном, деревянными лабазами, лавками и магазинами (частью каменными). Она представляла собой торговый городок, занимавший площадь в восемь городских кварталов [1]. К 1912 г. по проекту А.Д. Крячкова по красной линии Николаевского проспекта был возведен Городской торговый корпус в стиле «модерн». Он дал начало будущему ансамблю «центральной» площади и явился крупнейшим общественным и торговым зданием центра того времени.

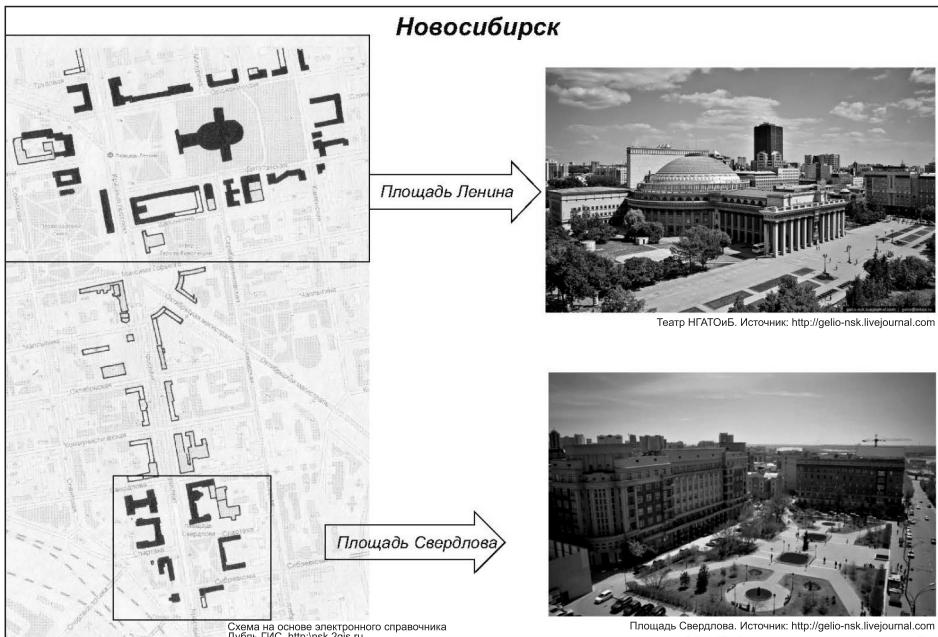
Наряду с площадями, складывались целые «торговые» улицы, например, Любинский проспект в Омске. Свое начало улица брала от моста через Омь. Восточная сторона проспекта была застроена одно-, двухэтажными зданиями купеческих магазинов, последним сооружением ее явился магазин Марии Шаниной, открытие которого состоялось в 1900 г. На противоположной стороне проспекта были возведены крупные здания Московских торговых рядов (1904), гостиницы «Россия» с рестораном (1906), чуть позднее построены кинематограф и Торговые дома братьев Овсянниковых и А. Ганшина с сыновьями, магазин В. Морозова. Фронтальная застройка из торговых зданий, несмотря на наличие построек разных архитектурных стилей: от модерна до неоклассики, несет единство, неповторимую образность и своеобразие [2], подчеркивая системность застройки. Эта улица и в наше время сохраняет единственный по своим масштабам, стилистике, пластической проработке и градостроительной значимости архитектурный ансамбль конца XIX — начала XX вв.

Экономические и политические преобразования в России после 1917 г. отразились и в архитектурно-художественной системе центров сибирских городов. Изменились их планировочные структуры, архитек-

тура, масштабы площадей, стали формироваться главные магистрали и улицы. Композиционно-пространственная структура центров сибирских городов в это время складывается на основе генеральных планов. Характерной особенностью центральных площадей в 1920–1930-е гг. в крупных сибирских городах является размещение доминирующего объекта или ансамбля, которыми становятся новые виды общественных сооружений: дворцы труда, культуры, науки; дома советов, союзов, — в центре композиции. Особо ярко отразилось это на формировании архитектурного ансамбля главной площади в Новониколаевске по предложению И.И. Загривко, выдвинувшего идею создания центральной площади между существующими уже разностильными зданиями Городского торгового корпуса (модерн), Промбанка и зданиями госучреждений, Крайпотребсоюза (конструктивизм). Основной архитектурной и планировочной доминантой площади становится Дом науки и культуры (позже театр НГАТОиБ). Уникальны конструкции здания, его купол, галерея с амфитеатром внутри. Пространственная композиция здания объединена ритмом мощных пилонов, переходящих в двенадцатиколонный портик главного фасада. Задуманное в стиле конструктивизма, здание позже получило декоративные классицистические элементы, что придало ему особый масштаб и монументальность. Оно стало центром композиции гармонично связанных разностильных зданий и обозначило ядро архитектурного ансамбля замкнутой площади Ленина.

Отметим, что в рассматриваемых городах выделяются главные магистрали, на которых начинает постепенно появляться система центральных площадей и скверов. Пространственно-композиционный центр в Новосибирске формируют ансамбли участка Красного проспекта, который в это время застраивается общественными и административными зданиями, и площадей Ленина и Свердлова, последняя становится административным центром города (рис. 1).

Площадь представляет собой замкнутое уширенное вдоль Красного проспекта пространство, застроенное зданиями разных архитектурных



*Rис. 1. Архитектурные ансамбли центра Новосибирска*

стилей: Реального училища, «Стоквартирного дома», Крайисполкома (сейчас здание правительства Новосибирской области), Сибревкома (сейчас Художественный музей), Запсибзолота. Так, пропорциональное симметричное решение главного фасада здания Сибревкома, увенчанного куполом и скульптурой, является памятником рационалистического модерна с классическим наполнением. Напротив, построенное в стиле конструктивизма здание Крайисполкома выделяется акцентом — полуокруглым ризалитом. Доминирует на площади расположенное в глубине от проспекта здание «Стоквартирного дома», построенное в стиле «неоренессанса», с богато декорированными фасадами. Его несколько «уравновешивает» конструктивистское здание Запсибзолота (архитектор А.И. Бобров) с фронтом, украшенным барельефом. Таким образом, завершенные композиции площадей Свердлова и Ленина в Новосибирске, сформированные в первой половине XX в., и соединяющий их отрезок Красного проспекта образовали единую архитектурно-художественную систему исторического центра, объединив разностивевую застройку.

Формирование системы центральных ансамблей Барнаула происходило в соответствии с генеральным планом, разработанным В.К. Александровым. Ленинский проспект выделился как главная композиционная ось, в узловых точках которой появились новые площади — Октябрьская и Советов, носящие определенный планировочный характер (рис. 2). Архитектурный ансамбль площади Октября создавался с 1937 г. многофункциональными, разностивевыми зданиями: школой, клубом, жилыми зданиями. Первоначально была построена школа (ныне Государственный художественный музей Алтайского края), главным фасадом обращенная к пространству площади. Здание классического стиля отличается богатым пластическим развитием фасадов, включающих ризалиты, портики, лоджии и аркады. Клуб Меланжевого комбината (ныне Алтайский молодежный театр) — важнейший элемент ансамбля площади, решенный в русле парадной монументальной архитектуры общественных сооружений той эпохи, занимает лидирующую позицию в ансамбле площади Октября, поскольку зрительно замыкает проспект Строителей.

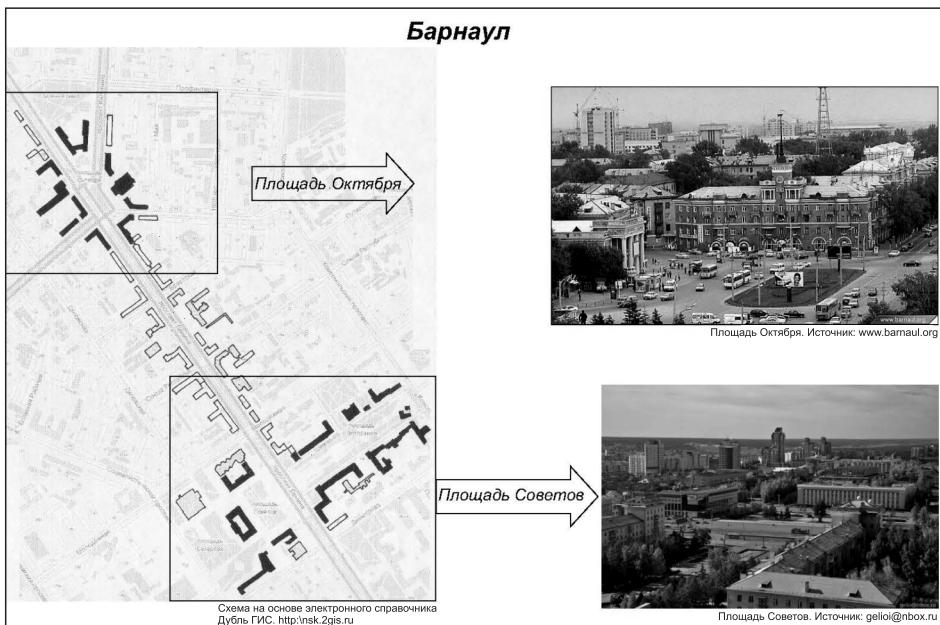


Рис. 2. Архитектурные ансамбли центра Барнаула

На основе генерального плана 1951 г. на площади был построен жилой дом с башней и шпилем («Дом под шпилем», архитектор Ф.К. Додица) с торговыми помещениями. Площадь Октября — главная транспортная артерия города, представляет собой законченный градостроительный ансамбль, по периметру она застроена. В плане площадь Октября имеет сложную «лучевую» конфигурацию, обусловленную выходом на нее нескольких улиц. Несмотря на то что все постройки на площади Октября появлялись в разное время, архитекторам удалось сохранить стилевое пластическое и колористическое единство всех строений.

Площадь Советов — вторая центральная площадь Барнаула и его административный центр — расположена между улицами Димитрова и Молодежной на оси проспекта Ленина. В отличие от площади Октября она представляет собой незавершенный архитектурный ансамбль, лишенный стилевого единства. Доминирует здание краевой администрации, перед фасадом которого в 1967 г. был установлен памятник Ленину и разбит сквер. В середине XX в. в северо-восточной части площади были возведены 5-этажные с угловыми башенными объемами и 7-этажные жилые дома. Слева и справа от здания краевой администрации в перспективе выделяются фасады Дворца спорта и зрелищ, Алтайского краевого театра драмы им. В.М. Шукшина, один из корпусов АлтГУ [3]. Пространству площади не хватает высотной доминанты, композиционно объединившей бы разностивлевую и разноэтажную застройку; она предусматривалась генпланом, но не была построена.

Отметим, что скверы, парки на территориях исторических центров способствуют зрительному акцентированию высотных доминант и созданию более контрастного силуэта центра города. Так, относительно небольшая территория площади Советов, благодаря переходу ее в открытое пространство Обского бульвара, получила значительное пространственное развитие. Характерная особенность центральных ансамблей Барнаула — их необычное яркое колористическое решение, которое в сочетании с большим количеством зелени (скверы, бульвар на главной улице) создает неповторимое своеобразие городского центра.

Во второй половине XX в. в результате роста городов и масштабного строительства застраиваются и расширяются как главные магистрали, сложившиеся ранее, так и новые. Формируются площади как узловые центры в системе городского каркаса, а общая композиция систем архитектурных ансамблей характеризуется поликентрическим развитием. Архитектурными доминантами становятся уникальные здания театров, учебных, торговых учреждений, вокруг которых располагаются кварталы и площади.

Так, в Омске в 1981 г. строится здание музыкального театра (архитекторы Д.Е. Лурье, Н.Н. Стужин, Н.Н. Белоусова), его интересный запоминающийся объем стал одним из символов города и главной доминантой театральной площади. В 1980 г. был построен Омский торговый центр (архитектор Ю. Земцов) в стиле «постмодернизма». Здание планировалось в виде крытой улицы с торговыми рядами. Многофункциональность торгового центра предопределила его сложную объемно-пространственную структуру: ядром является центральная улица-площадь, с южной и северной стороны которой устроены входные зоны, а в средней части — большой атриум, через перекрытия которого в здание попадает огромное количество света [4]. В XX в. архитектурные ансамбли исторического центра Омска представляют собой взаимосвязанную поликентрическую систему площадей и магистралей, сформированных разностивлевыми зданиями.

В начале XXI в. в крупных городах Сибири центры — гармоничные планировочные образования с ансамблями площадей, объединенные об-

щей композиционной осью — городской магистралью, также представляющей собой ансамблевую застройку. В каждом из рассматриваемых городов выделяется главная площадь, сформированная ансамблем уникальных зданий. Композиционно-стилевые особенности центров крупных городов Сибири заключаются:

- в сложении уникальных гармоничных композиций, состоящих из ансамблей магистралей и площадей;
- полицентрическом развитии архитектурных ансамблей;
- соотношении застроенных и открытых пространств в исторических центрах при создании контрастного силуэта города;
- выявлении главной вертикальной доминанты ансамбля, подчиняющей окружающую застройку, вносящей единство в общий архитектурный ансамбль;
- соразмерности, иерархичности, соподчиненности всех элементов (фронтальной застройки, доминант) единому ансамблю;
- гармоничной взаимосвязи разностилевых зданий в составе ансамблей площадей и магистралей городских исторических центров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баландин, С.Н. Новосибирск. История градостроительства [Текст] / С.Н. Баландин. — Новосибирск, 1978. — 80 с.
2. Открытое омское справочное бюро. Памятники [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rmx.ru/omsk>
3. История главной улицы Барнаула [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://revolution.allbest.ru>
4. ТЦ Омский [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://aliksumim.livejournal.com/6398.html>

*БЕЖАНОВА Марина Викторовна, асп.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

Получено 11.03.13

**Bezhanova Marina Victorovna**, post-graduate student, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

#### **COMPOSITE AND STYLE FEATURES IN ARCHITECTURAL AND ART SYSTEM OF THE HISTORICAL CENTERS OF SOME SIBERIAN CITIES**

In article composite and style features of architectural complexes in the historical centers of the large Siberian cities are considered: Omsk, Barnaul, Novosibirsk, developed in XX century.

**Key words:** architectural complex, building system, historical center, vertical dominants, areas, system of composite communications.

#### REFERENCES

1. Balandin, S.N. Novosibirsk. Town planning history [Text] / S.N. Balandin. — Novosibirsk, 1978. — 80 p.
2. Open Omsk information bureau. Monuments [Electronic resource]. — Access mode: <http://rmx.ru/omsk>
3. History of the main street of Barnaul [Electronic resource]. — Access mode: <http://revolution.allbest.ru>
4. Shopping Center Omsky [Electronic resource]. — Access mode: <http://aliksumim.livejournal.com/6398.html>

## **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

**УДК 628.925**

**Р.С. ЗАКИРУЛЛИН**

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ОКНО С УГЛОВЫМ СЕЛЕКТИВНЫМ СВЕТОПРОПУСКАНИЕМ**

Представлен решеточный оптический фильтр с угловым селективным регулированием направленного светопропускания, описан графоаналитический метод расчета его характеристик. Показано, что применение фильтра в качестве интеллектуального окна позволяет достичь оптимальных условий естественного освещения и инсоляции помещения в зависимости от географических координат местности, времени года и суток, ориентации окна по сторонам света без использования специальных устройств перераспределения световых потоков.

**Ключевые слова:** направленное светопропускание, оптический фильтр, решетка с чередующимися полосами, угловое селективное регулирование, азимут и высота стояния солнца.

Понятие «интеллектуальное» окно<sup>1</sup> связано с применением смарт-стекла различных видов с тонкопленочными низкоэмиссионными покрытиями<sup>2</sup> и с фото-, термо-, электрохромными или жидкокристаллическими слоями. Смарт-стекла обеспечивают контроль за интенсивностью и спектром проходящего излучения, однако не позволяют достичь селективного регулирования свето- и теплопропускания по диапазонам углов падения солнечных лучей. Для такого регулирования с адаптацией к траектории движения солнца используются дополнительные устройства перераспределения световых потоков (жалюзи и т.п.). Они же защищают от заглядывания внутрь помещения. В работе<sup>3</sup> для достижения невидимости через окно при определенных углах наблюдения предлагается применять эффект поляризации света. Новые подходы к расчету характеристик светопропускания многослойных пленочных оптических покрытий и оконных конструкций с жалюзи приведены в [1, 2].

В данной работе раскрывается новый способ углового селективного регулирования направленного светопропускания окна без использования дополнительных устройств. Задачи достижения оптимальных условий естественного освещения, инсоляции и защиты от заглядывания решаются с помощью решеточного оптического фильтра, в качестве которого выступает один из слоев оконного остекления. На обе поверхности плоско-параллельного листового стекла наносятся поглощающие, отражающие или рассеивающие полосы, чередующиеся с полосами чистой поверхности

<sup>1</sup> Табунников Ю.А. Окно как интеллектуальный элемент конструкции здания // Энергосбережение. 2008. № 2. С. 16–21.

<sup>2</sup> Horowitz F., Pereira M.B., Azambuja de G.B. Glass window coatings for sunlight heat reflection and co-utilization // Appl. Opt. 2011. Vol. 50. P. C250–C252.

<sup>3</sup> Schechner Y.Y., Shamir J., Kiryati N. Polarization and statistical analysis of scenes containing a semireflector // J. Opt. Soc. Am. A. 2000. N 17. P. 276–284.

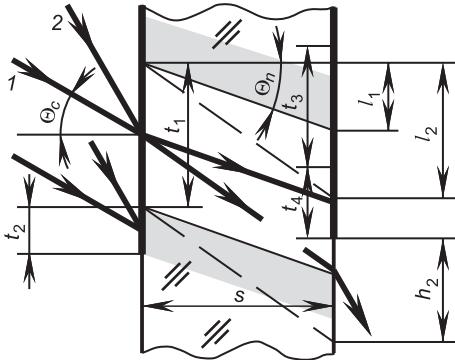


Рис. 1. Схема решеточного оптического фильтра

ков 1 и 2. Пучок 1 падает под характеристическим углом фильтра — углом падения  $\Theta_c$  луча, проходящего через центры чередующихся полос входной и выходной решеток. Этот угол определяет сдвиг решеток фильтра относительно друг друга. Для равномерного регулирования светопропускания по всей поверхности окна шаги полос (суммарные ширины двух соседних чередующихся полос) на входной и выходной решетках должны быть одинаковы.

Угловые селективные характеристики светопропускания фильтра рассчитываются графоаналитическим методом [3, 4]. Расчетный коэффициент светопропускания  $\tau$  плоскопараллельного фильтра определяется по формуле

$$\tau = h / (t_1 + t_2), \quad (1)$$

где  $h$  — ширина светопропускания (общая ширина той части пропускающих полос выходной решетки, через которую преломленные лучи проходят направленно в пределах одного шага полос);

$t_1$  и  $t_2$  — ширины пропускающих и поглощающих полос входной решетки.

Из рис. 1 видно, что для падающих под разными углами пучков 1 и 2 ширина светопропускания будет разной (указана ширина  $h_2$  для пучка 2). Эта ширина рассчитывается на основе функции смещения  $l$  преломленного луча [3] — расстояния, на которое при данном угле падения  $\Theta$  преломленный под углом  $\Theta_n$  луч смещается на выходной поверхности относительно непреломленного луча при нормальном угле падения (на рис. 1 смещения  $l_1$  и  $l_2$ )

$$l = \frac{s \sin \Theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}}. \quad (2)$$

Формула получена для фильтра плоскопараллельной формы с учетом закона Снелла. Сущность графоаналитического расчета заключается в определении ширины светопропускания во всем диапазоне возможных углов падения 0–90° и последующем расчете коэффициента по формуле (1).

На рис. 2 линия 1 представляет собой расчетную угловую характеристику светопропускания для фильтра со следующими параметрами: ширины пропускающих и поглощающих полос  $t_1 = 3$  мм и  $t_2 = 1$  мм на входной решетке,  $t_3 = 2,5$  мм и  $t_4 = 1,5$  мм на выходной решетке, показатель преломления стекла  $n = 1,5$  и толщина  $s = 4$  мм. Шаги полос входной

стекла, пропускающими излучение направленно. Угловая селективность светопропускания обеспечивается за счет взаимного расположения пропускающих полос входной и выходной поверхностей — при изменении углов падения меняется доля излучения, проходящего через обе решетки фильтра.

На рис. 1 приведена схема фильтра с чередующимися пропускающими и поглощающими полосами. Указаны границы направленного светопропускания через входную решетку фильтра при падении пуч-

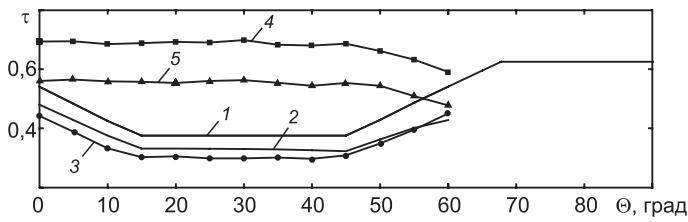


Рис. 2. Угловые характеристики светопропускания фильтра  
1 — графоаналитический расчет; 2 — коррекция с учетом отражения и поглощения; 3 — эксперимент для фильтра; 4 — эксперимент для входной решетки; 5 — эксперимент для выходной решетки

и выходной решеток одинаковы:  $t_1 + t_2 = t_3 + t_4 = 4$  мм. Характеристический угол фильтра  $\Theta_c = 30^\circ$ .

Таким образом, при анализе рис. 1 выделены четыре селективных диапазона углов падения с одинаковым характером изменения ширины светопропускания, для которых получены следующие расчетные формулы:

- 1) 0–14,22°: ширина светопропускания уменьшается по формуле  $h = 0,5t_1 - 0,5t_4 + l_c - l$ , где  $l_c$  — смещение преломленного луча при характеристическом угле;
- 2) 14,22–45,55°: ширина светопропускания постоянна  $h = t_1 - t_4$ ;
- 3) 45,55–68,53°: ширина светопропускания увеличивается по формуле  $h = 0,5t_1 - 0,5t_4 - l_c + l$ ;
- 4) 68,53–90°: ширина светопропускания постоянна  $h = t_3$ .

Точные значения экстремальных углов падения, при которых меняется характер регулирования, вычислены по формуле

$$\Theta = \arcsin\left(\frac{nl}{\sqrt{s^2 + l^2}}\right) \quad (3)$$

при подстановке значений смещения  $l$  при экстремальных углах. Эти значения для углов 14,22, 45,55 и 68,53° определены соответственно по формулам  $l = -0,5t_1 + 0,5t_4 + l_c$ ;  $l = 0,5t_1 - 0,5t_4 + l_c$  и  $l = -0,5t_1 + t_3 + 0,5t_4 + l_c$ . Данные формулы получены путем приравнивания расчетных формул ширины светопропускания для соседних с экстремальными углами диапазонов.

Расчетные характеристики фильтров с другими геометрическими параметрами также представляют собой ломаные линии с максимальным или минимальным постоянным, возрастающим или убывающим коэффициентом светопропускания<sup>4</sup>. Значения ширин чередующихся полос и характеристического угла влияют на расположение селективных угловых диапазонов регулирования и коэффициентов светопропускания в этих диапазонах. Расчетные формулы ширины светопропускания и значений смещений при экстремальных углах аналогичны приведенным выше.

На рис. 2 представлена расчетная характеристика светопропускания, скорректированная с учетом угловой зависимости отражения и поглощения для наиболее интересного с практической точки зрения диапазона углов падения от 0 до 60° (линия 2). Формула для коррекции коэффициента

<sup>4</sup> Закируллин Р.С. Угловое селективное регулирование светопропускания оптического фильтра // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. 2012. № 9. С. 101–106.

пропускания для фильтра плоскопараллельной формы получена из формулы Френеля и закона Бугера–Ламберта

$$\tau = (1-\rho)^2 \exp(-\alpha s \sqrt{1 + \sin^2 \Theta / (n^2 - \sin^2 \Theta)}), \quad (4)$$

где  $\rho$  — суммарный коэффициент отражения с учетом перпендикулярно и параллельно поляризованных составляющих падающей световой волны;  $\alpha$  — натуральный коэффициент поглощения стекла.

Эксперименты для фильтра с принятыми оптическими и геометрическими параметрами проведены с использованием расширенного коллимированного пучка лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Азимут плоскости поляризации лазера равен  $\delta = 45^\circ$ , т.е. суммарный коэффициент отражения вычисляется так же, как для естественного (неполяризованного) света. Скорректированная и экспериментальная характеристики светопропускания дополнительных образцов фильтра со входной и выходной решетками (линии 4 и 5). Эти линии горизонтальны, что показывает независимость светопропускания от угла падения при использовании только одной решетки. При приближении к  $60^\circ$  светопропускание этих образцов начинает падать из-за увеличения коэффициента отражения.

Графоаналитический расчет позволяет найти необходимые параметры решеток фильтра для удовлетворения требуемым в конкретном случае угловым характеристикам светопропускания. При регулировании проходящего через окно солнечного излучения данный способ обеспечит оптимальные характеристики при любом азимуте ориентации окна по сторонам света, так как в отличие от жалюзи с горизонтальными или вертикальными ламелями чередующиеся полосы решеток фильтра можно располагать под любым углом. Поиск оптимального угла наклона решеток фильтра при заданных толщине и показателе преломления стекла, географической широте  $\phi$  и долготе  $\lambda$  местности, азимуте ориентации окна  $A_0$  для выбранного периода года проводится в следующем порядке.

По любой из множества известных компьютерных программ рассчитываются высота стояния  $h$  и азимут  $A$  солнца через каждый час относительно положения солнца в зените для дней весеннего и осеннего равноденствия и летнего и зимнего солнцестояния. Определяется азимут солнца  $\alpha$  для данного окна, отсчитанный от перпендикуляра к плоскости окна в точке падения луча (азимуты солнца и ориентации окна отсчитываются по часовой стрелке от севера)

$$\alpha = A - A_0. \quad (5)$$

Угол падения луча на вертикальное плоское окно рассчитывается по частному случаю первой теоремы косинусов для трехгранного угла (когда двугранный угол напротив искомого плоского угла равен  $90^\circ$ )

$$\cos \Theta = \cos h \cos \alpha,$$

откуда с учетом формулы (5)

$$\Theta = \arccos(\cos h \cos(A - A_0)). \quad (6)$$

Устанавливается угол преломления луча

$$\Theta_n = \arcsin(\sin \Theta / n). \quad (7)$$

Определяются координаты  $x$  и  $y$  следа точки  $O$  падения луча, оставляемого после преломления на выходной поверхности фильтра (рис. 3). При известном горизонтальном следе точки  $O$  ее фронтальный след находится: для падающего в вертикальной плоскости луча 1 ( $\alpha = 0^\circ$ ) — по углу преломления, для падающего под произвольным углом луча 2 — по методу определения истинной длины отрезка. Формулы для расчета координат следа получены из анализа рис. 3:

$$x = stg \beta; \quad (8)$$

$$y = -((stg(\Theta_n - |\beta|)) / \cos \beta), \quad (9)$$

где  $\beta$  — угол преломления, соответствующий азимутальному углу падения  $\Theta$ , находится из пропорции

$$\beta = \Theta_n \alpha / \Theta. \quad (10)$$

Строятся траектории следа точки падения лучей для дней равноденствия и солнцестояния. На рис. 4 приведены траектории по результатам расчетов для г. Оренбурга с географическими координатами  $52,28^\circ$  с. ш. и  $55,17^\circ$  в. д. без учета перехода на летнее время (GMT+05:00) для окон с разными азимутами.

Следы точки с одинаковым временем соединяются изохронами (точечные линии). Для определения оптимального угла наклона решеток фильтра устанавливаются дата с максимальными требованиями к солнцезащитным мерам и время суток. На рис. 4 штриховыми линиями указаны оптимальные углы наклона для 15 июля для момента нахождения солнца в зените. Эти линии проведены по нормалям к изохронам в точках, найденных путем интерполяции между весенне-осенними и летними траекториями для 15 июля.

В заключение следует отметить, что результаты позволяют придать интеллектуальным окнам дополнительные функции углового селективного регулирования светопропускания без специальных устройств перерас-

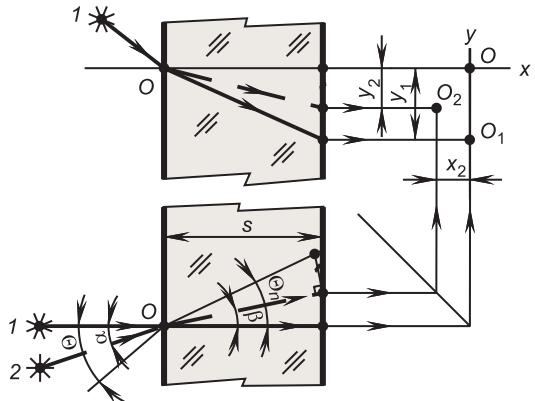


Рис. 3. Схема определения следа точки падения луча на выходной поверхности

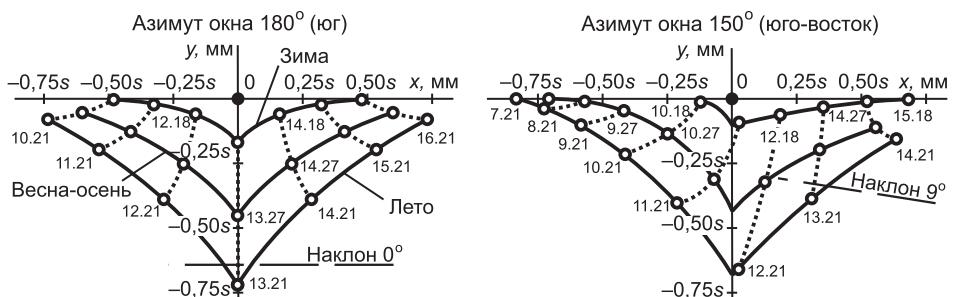


Рис. 4. Траектории следа точки падения луча с азимутом окна  $180^\circ$  (а) и  $150^\circ$  (б)

пределения световых потоков. Решеточный оптический фильтр в оконных конструкциях позволит оптимально регулировать двустороннее светопропускание за счет возможности предварительной адаптации характеристик фильтра к известной траектории солнца относительно заданного окна.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mazilu, M. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures [Text] / M. Mazilu, A. Miller, V.T. Donchev // Appl. Opt. — 2001. — Vol. 40. — P. 6670–6676.
2. Andersen, M. Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations [Text] / M. Andersen, M. Rubin, R. Powles, J.-L. Scartezzini // Solar Energy. — 2005. — N 78 (2). — P. 187–198.
3. Закируллин, Р.С. Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей [Текст] / Р.С. Закируллин // ЖТФ. — 2012. — Т. 82, вып. 10. — С. 134–136.
4. Закируллин, Р.С. Способ углового селективного регулирования направленного светопропускания [Текст] / Р.С. Закируллин // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. — 2013. — № 3 (85). — С. 17–22.

*ЗАКИРУЛЛИН Рустам Сабирович, канд. техн. наук, доц.  
Оренбургский государственный университет*

Получено 18.03.13

**Zakirullin Rustam Sabirovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Orenburg State University, Russia

#### A SMART WINDOW WITH THE ANGULAR SELECTIVITY OF LIGHT TRANSMISSION

A grating optical filter with angular selective regulation of the directional light transmission is presented, a graphic-analytical method of calculation of its characteristics is described. It is shown that the use of the filter as a smart window allows achieving optimal conditions of natural lighting and insolation of a room, depending on the geographical coordinates of terrain, time of day and year, orientation of the windows to the cardinal without the use of special devices for redistribution of light streams.

**Key words:** directional light transmission, optical filter, gratings with alternating strips, angular selective regulation, azimuth and elevation of the sun.

#### REFERENCES

1. Mazilu, M. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures [Text] / M. Mazilu, A. Miller, V.T. Donchev // Appl. Opt. — 2001. — Vol. 40. — P. 6670–6676.
2. Andersen, M. Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations [Text] / M. Andersen, M. Rubin, R. Powles, J.-L. Scartezzini // Solar Energy. — 2005. — N 78 (2). — P. 187–198.
3. Zakirullin, R.S. Selective Beam Incidence Angle Control over Directional Light Transmission [Text] / R.S. Zakirullin // J. Technical Physics. — 2012. — Vol. 57, N 10. — P. 1456–1458.
4. Zakirullin, R.S. Method of angular selective regulation of directional light transmission [Text] / R.S. Zakirullin // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. — 2013. — N 3 (85). — P. 17–22.

**УДК 625.76.08**

**В.Н. ИВАНОВ, Л.С. ТРОФИМОВА**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ  
И РАЗВИТИЯ СИСТЕМ МАШИН ДОРОЖНЫХ  
ОРГАНИЗАЦИЙ  
С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ  
ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
И В СООТВЕТСТВИИ СО СПРОСОМ**

Представлена математическая модель, позволяющая формировать и развивать системы машин, состоящие из технологических комплексов, на продолжительный период эксплуатации, тем самым открывая возможность к их стратегическому планированию. Эта возможность достигается за счет учета в модели требований к контролируемым показателям качества выполнения технологического процесса и спроса на виды работ.

**Ключевые слова:** математическая модель, система машин, дорожная организация, параметры дорожных машин, контролируемые показатели качества, спрос, дисконтирование, эффективность.

Формированием и развитием систем машин дорожных организаций занимались такие видные ученые, как Л.В. Канторович, С.Е. Канторер, П.П. Нефедов, С.Я. Луцкий, Е.М. Кудрявцев, В.Б. Пермяков, А.Я. Ландсман и др., которые создали методики, полностью отвечающие требованиям времени и используемые в современных условиях. Подходы авторов к оптимизации строились в основном на минимизации затрат. Однако, согласно Федеральной целевой программе [1], условия модернизации и технологического развития экономики России выдвигают дополнительные требования к качеству производства дорожных работ с учетом региональных особенностей Российской Федерации. Следует учитывать основные направления развития отрасли, отмеченные в докладе министра транспорта И. Левитина [2], которые предполагают начало работы по долгосрочному планированию на основе «контрактов жизненного цикла» с тем, чтобы этот механизм стал одним из инструментов для привлечения инвестиций в строительство. Современные экономические условия заставляют руководителей принимать управленческие решения, направленные на обеспечение требований к качеству технологического процесса. Поэтому решение проблемы формирования и развития систем машин предполагает разработку нового концептуального подхода, связанного с учетом требований к качеству выполнения технологического процесса в соответствии со спросом.

В математической модели предполагается формирование и развитие систем машин, состоящих из технологических комплексов, продолжительность функционирования которых на рынке определена средним амортизационным периодом (сроком полезного использования). Учет требований к контролируемым показателям качества и спроса позволят функционировать технологическим комплексам в долгосрочном периоде. Математическая модель формирования и развития систем машин дорож-

ных организаций может применяться не только для компоновки систем машин с целью выполнения разовых заявок, но и для стратегического планирования путем создания рациональных комплексов на длительный период в соответствии с прогнозируемым спросом, обеспечивающих качество выполнения технологического процесса.

Целевая функция (1) представляет собой эффект от работы системы машин, состоящей из технологических комплексов, за средний амортизационный период машин, входящих в них. Разработанная математическая модель призвана дать оценку эффективности выполнения производственных процессов системами машин дорожных организаций. Для этого целесообразно использовать методы, в которых разновременные затраты и результаты приводят к одному моменту времени посредством их дисконтирования. Согласно результатам исследования, наиболее универсальным среди методов оценки экономической эффективности является метод, основанный на расчете чистого дисконтированного дохода. Использование данного метода позволяет отследить изменение экономических показателей во времени.

Величина эффекта от выполнения технологического процесса (2) учитывает планируемую величину дополнительных затрат, связанную с вероятностью того, что в результате выполнения некоторого объема работ не будет обеспечен требуемый уровень качества.

Математическая модель позволяет связать воедино показатели качества дорожной конструкции и параметры дорожных машин, используемые для выполнения технологических процессов, тем самым определяет подход к системе управления качеством. Продолжительность функционирования технологического комплекса машин обусловливается средним амортизационным периодом (3).

Система машин дорожной организации состоит из единиц техники, каждой из которых может быть присвоен индивидуальный номер для удобства идентификации при моделировании. Каждая машина может одновременно включаться только в один технологический комплекс, выполняющий технологический процесс (6). В соответствии с определенной технологией предусмотрены технологические операции, которые осуществляются при участии машин, имеющих конкретный номер. Машины в парке при назначении в технологические комплексы являются взаимозависимыми рабочими единицами, вся работа проводится ими в составе комплекса, который определяет требования к эксплуатационным показателям машин. Математическая модель позволяет рассматривать выбор машин в комплексе с выбором технологии производства работ, учитывая при этом спрос и требования к качеству. Эффективность производства обеспечивается за счет прямой зависимости темпа работ и спроса на выполнение технологического процесса (5). Выбор эффективных вариантов технологических решений и средств механизации с учетом спроса и сроков работ позволяет рассматривать организацию технологического процесса работ как вероятностную систему.

Общая величина затрат на выполнение технологического процесса включает в себя не только затраты на материалы, эксплуатационные затраты, затраты на арендные операции, но и на контроль его качества (8). Величина тарифа на выполнение единицы объема работ приобретает достаточную «прозрачность» для заказчика, так как позволяет учитывать все затраты.

При расчете затрат на материал, необходимый для выполнения технологического процесса, устанавливается конкретный объем работ (10). Эксплуатационные затраты конкретной машины при выполнении техно-

логического процесса учитывают себестоимость часа ее работы (11). В себестоимость часа работы машины включаются затраты на заработную плату оператора-машиниста с отчислениями на социальные нужды, энергоноситель, техническое обслуживание и ремонт, амортизационные отчисления, накладные расходы машины при выполнении конкретной технологической операции в технологическом процессе (12).

Применение часовой тарифной ставки в расчете затрат на заработную плату оператора-машиниста позволяет учитывать особенности выполнения конкретной технологической операции (13), затраты на контроль качества — затраты на трудовые ресурсы и оборудование, необходимое при выполнении технологического процесса (18). В случае невозможности использовать машину конкретного номера в комплексе машин из существующего парка в модели предусмотрены арендные операции (19).

Приведем математическую модель формирования и развития систем машин дорожных организаций с учетом требований к качеству выполнения технологических процессов и в соответствии со спросом (1–19).

$$\Theta = \sum_{i=1}^I V_i \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$V_i = \sum_{t=0}^{w_i} [(R_{t,i} - Z_{t,i} - D_{t,i}) T_i \frac{1}{(1+E)^t}]; \quad (2)$$

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^J a_{j,i}}{\sum_{j=1}^J n_{j,x,i}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad x = \overline{1, X}; \quad (3)$$

$$R_{t,i} = \left[ \min_{x=\overline{1, X}} \left[ \sum_{j=1}^J (P_{j,x,i} n_{j,x,i}) \right] \right] C_{t,i}, \quad i = \overline{1, I}, \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (4)$$

$$\min_{x=\overline{1, X}} \left[ \sum_{j=1}^J (P_{j,x,i} n_{j,x,i}) \right] \geq \frac{Q_{t,i}}{T_i}, \quad i = \overline{1, I}, \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (5)$$

$$\sum_{x=\overline{1, i}} \sum_{j=1}^J n_{j,x,i} \leq 1, \quad j = \overline{1, J}; \quad (6)$$

$$n_{j,x,i} = \text{int}(n_{j,x,i}), \quad j = \overline{1, J}; \quad x = \overline{1, X}; \quad i = \overline{1, I}; \quad (7)$$

$$Z_{t,i} = W_{t,i} + S_{t,i} + B_{t,i} + G_{t,i}, \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (8)$$

$$D_{t,i} = p_i \left( \left[ \min_{x=\overline{1, X}} \left[ \sum_{j=1}^J (P_{j,x,i} n_{j,x,i}) \right] \right] \prod_{j=1}^J q_{i,j} \right) \left( m_{t,i} + d_{t,i} + \sum_{j=1}^J s_{t,i,j} \right), \\ i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (9)$$

$$W_{t,i} = \left[ \min_{x=\overline{1, X}} \left[ \sum_{j=1}^J (P_{j,x,i} n_{j,x,i}) \right] \right] M_{t,i}, \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (10)$$

$$S_{t,i} = \sum_{x=\overline{1, i}} \sum_{j=1}^J (n_{j,x,i} c_{t,j,x,i}), \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (11)$$

$$c_{t,j,x,i} = F_{t,j,x,i} + N_{t,j,x,i} + U_{t,j,x,i} + A_{t,j,x,i} + H_{t,j,x,i}, \quad (12)$$

$$j = \overline{1, J}; \quad x = \overline{1, X}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i};$$

$$F_{t,j,x,i} = f_{t,j,x,i} k_1 k_2, \quad j = \overline{1, J}; \quad x = \overline{1, X}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (13)$$

$$N_{t,j,x,i} = u_{t,j,x,i} z_{t,j,x,i}, \quad j = \overline{1, J}; \quad x = \overline{1, X}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (14)$$

$$U_{t,j,x,i} = \frac{v_{t,j,x,i} r_{t,j,x,i}}{\Pi_{t,j,x,i}}, \quad j = \overline{1, J}; \quad x = \overline{1, X}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (15)$$

$$A_{t,j,x,i} = \frac{Y_{t,j,x,i} l_{t,j,x,i}}{\Pi_{t,j,x,i} 100}, \quad j = \overline{1, J}; \quad x = \overline{1, X}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (16)$$

$$H_{t,j,x,i} = (F_{t,j,x,i} + N_{t,j,x,i} + A_{t,j,x,i} + U_{t,j,x,i}) o_{t,j,x,i}, \quad (17)$$

$$j = \overline{1, J}; \quad x = \overline{1, X}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i};$$

$$B_{t,i} = \frac{K_{t,i}}{\Phi_{t,i}} y_i k_1 k_2 + \frac{e_{t,i}}{L_{t,i} 100}, \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}; \quad (18)$$

$$G_{t,i} = \sum_{j=1}^J O_{t,j,i} \cdot \sum_{x=1}^X (n_{j,x,i} \cdot g_{t,j,x,i}), \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, w_i}, \quad (19)$$

здесь  $i$  — индекс технологического процесса;

$I$  — количество рассматриваемых технологических процессов (соответственно и комплексов машин);

$\Theta$  — эффект от работы системы машин, состоящей из технологических комплексов, руб.;

$V_i$  — эффект от выполнения  $i$ -го технологического процесса, руб.;

$t$  — текущий временной шаг расчета в годах;

$w_i$  — устанавливаемая по среднему амортизационному периоду продолжительность функционирования  $i$ -го технологического комплекса машин;

$R_{t,i}$  — часовой результат выполнения  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета, руб./ч;

$Z_{t,i}$  — часовая величина затрат на выполнение  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета, руб./ч;

$D_{t,i}$  — планируемая часовая величина дополнительных затрат при выполнении  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета, руб./ч;

$T_i$  — планируемый годовой фонд рабочего времени  $i$ -го технологического комплекса за вычетом периодов свертывания потока комплекса машин за год, ч/год;

$E$  — норма дисконта;

$j$  — порядковый номер машины в парке;

$J$  — количество машин в парке;

$a_{j,i}$  — амортизационный период (срок полезного использования)  $j$ -й машины, назначаемой для выполнения  $i$ -го технологического процесса;

$x$  — номер технологической операции;

$X$  — количество технологических операций в технологическом процессе;

$n_{j,x,i}$  — булева переменная назначения с учетом возможности применения  $j$ -й машины в  $i$ -й технологический комплекс машин на  $x$ -ю технологическую операцию,  $n_{j,x,i} = 0,1$ ;

$P_{j,x,i}$  — часовая эксплуатационная производительность  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе;

$C_{t,i}$  — величина тарифа на единицу объема работ  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$Q_{t,i}$  — установленный годовой объем работ в соответствии со спросом на выполнение  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$W_{t,i}, S_{t,i}, B_{t,i}, G_{t,i}$  — соответственно затраты на материалы, эксплуатационные затраты, затраты на контроль качества, аренду при выполнении  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$p_i$  — вероятность того, что в результате выполнения часовогого объема работ  $i$ -го технологического процесса требования к качеству не будут обеспечены;

$q_{i,j}$  — коэффициент, учитывающий отношение часовогого объема работ, который необходимо будет выполнить при необеспечении требуемого уровня качества  $j$ -й машиной в  $i$ -м технологическом процессе к общему часовому объему работ по  $i$ -му технологическому процессу;

$m_{t,i}$  — средние затраты на материалы (с учетом затрат на доставку до приобъектного склада и заготовительно-складских затрат) по единице объема работ при дополнительных работах по обеспечению требуемого уровня качества  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$d_{t,i}$  — затраты на демонтаж готовой конструкции по единице объема работ при дополнительных работах по обеспечению требуемого уровня качества  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$s_{t,i,j}$  — средние затраты на работу  $j$ -й машины по единице объема работ при дополнительных работах по обеспечению требуемого уровня качества  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$M_{t,i}$  — стоимость материалов с учетом затрат на доставку до приобъектного склада и заготовительно-складских затрат, используемых для выполнения часовогого объема единицы работ  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$c_{t,j,x,i}$  — себестоимость часа работы  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$F_{t,j,x,i}, N_{t,j,x,i}, U_{t,j,x,i}, A_{t,j,x,i}, H_{t,j,x,i}$  — соответственно затраты на заработную плату оператора-машиниста с отчислениями на социальные нужды, энергоноситель, профилактическое обслуживание, амортизационные отчисления, накладные расходы  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$f_{t,j,x,i}$  — часовая тарифная ставка оператора-машиниста  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$k_1$  — районный коэффициент (размер районного коэффициента и порядок его применения для расчета заработной платы работников организаций, расположенных в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях, устанавливаются Правительством Российской Федерации и определяются Трудовым кодексом РФ, гл. 50, ст. 316);

$k_2$  — коэффициент, учитывающий размер страховых взносов во внебюджетные фонды (порядок уплаты страховых взносов во внебюджетные фонды определяется законом от 24.07.2009 № 212-ФЗ. Согласно п. 19 ст. 12 № 212-ФЗ, общая страховая нагрузка в 2013 г. составляет 30 %,  $k_2 = 1,3$ );

$u_{t,j,x,i}$  — часовая норма расхода энергоносителя, необходимого для  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$z_{t,j,x,i}$  — стоимость энергоносителя, необходимого для  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$v_{t,j,x,i}$  — стоимость профилактического мероприятия для  $j$ -й машины, выполняющей  $x$ -ю технологическую операцию в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$r_{t,j,x,i}$  — количество профилактических мероприятий, необходимых в период годовой продолжительности работы для  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$\Pi_{t,j,x,i}$  — годовая продолжительность работы  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$Y_{t,j,x,i}$  — стоимость  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$l_{t,j,x,i}$  — норма амортизационных отчислений с учетом отчислений, учитывающих отраслевую и региональную специфику, а также интенсивность использования, предусмотренная для  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$o_{t,j,x,i}$  — доля накладных расходов к эксплуатационным затратам  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$K_{t,i}$  — размер оклада работника, выполняющего контроль качества  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$\Phi_{t,i}$  — фонд рабочего времени работника в месяц, контролирующего качество  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$y_i$  — количество работников, необходимое для контроля качества  $i$ -го технологического процесса;

$e_{t,i}$  — норма амортизационных отчислений на оборудование, необходимое для контроля качества  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$L_{t,i}$  — годовая продолжительность эксплуатации оборудования, необходимого для контроля качества  $i$ -го технологического процесса на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$g_{t,j,x,i}$  — стоимость арендной платы часа работы  $j$ -й машины при выполнении  $x$ -й технологической операции в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета;

$O_{t,j,i}$  — булева переменная необходимости арендных платежей для  $j$ -й машины в  $i$ -м технологическом процессе на  $t$ -м текущем временном шаге расчета,  $O_{j,i} = 0; 1$ .

Математическая модель разработана для дорожных организаций на стадии формирования систем машин или при развитии систем машин. В соответствии с прогнозом спроса на выполнение конкретного технологического процесса в заданные сроки (по ретроспективным данным рассматриваемой организации и организаций-конкурентов) подбираются машины не только по эксплуатационной производительности, но и по критерию эффективности их использования в данном технологическом процессе с учетом обеспечения требований к качеству.

В математической модели предусмотрена возможность расчета затрат на аренду конкретной машины и подбор арендованных машин в комплекс для выполнения технологического процесса с заданными сроками строительства. Сформированный на долгосрочный период технологический комплекс позволит практическим работникам осуществлять стратегическое планирование деятельности и выходить на рынок с предложением, соответствующим исследуемому спросу, технологически возможным темпам строительства, что обеспечит эффективность деятельности дорожной организации и удовлетворение потребностей заказчиков.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010–2015 годы)». Подпрограмма «Автомобильные дороги» : утв. Постановлением Правительства РФ от 20 мая 2008 г. № 377. — М. : ИНФОРМАВТОДОР, 2008. — 136 с.
2. Об основных итогах социально-экономического развития транспортного комплекса в 2011 году и задачах на 2012 год и среднесрочную перспективу : Доклад министра транспорта Российской Федерации И. Левитина на расширенном заседании коллегии Минтранса РФ 27 марта 2012 г. — М. : М-во транспорта России, 2012. — 13 с.
3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / Ин-т системного анализа РАН, Центр. экономико-матем. ин-т РАН и др. — 3-е изд., перераб. и доп. [Текст]. — М., 2004. — 221 с.

*ИВАНОВ Виталий Николаевич, д-р техн. наук, проф.*

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

*ТРОФИМОВА Людмила Семеновна, канд. техн. наук; E-mail: trofimova\_ls@mail.ru  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),  
г. Омск*

Получено после доработки 05.03.13

**Ivanov Vitaly Nicolaevich**, doctor of technical sciences, professor, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

**Trofimova Ludmila Semenovna**, candidate of technical sciences; E-mail: trofimova\_ls@mail.ru, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

#### MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF SYSTEMS OF MACHINES ROAD ORGANIZATIONS TO MEET THE REQUIREMENTS TO THE QUALITY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND IN LINE WITH DEMAND

The paper presents a mathematical model to construct and develop a system of machines, consisting of technological systems for a long period of operation, thus opening up the possibility for strategic planning of machine systems. This capability is achieved by taking

into account in the model of the requirements for quality of performance indicators monitored the process and the demand for jobs.

**Key words:** mathematical model, a system of machines, traffic organization, the parameters of road cars, controlled quality, demand, discounting, efficiency.

#### REFERENCES

1. Federal Target Program «Development of transport system of Russia (2010–2015 g.)» Subroutine «Highways»: approved. Government Decree of 20 May 2008 № 377. — M. : Informavtodor, 2008. — 136 p.
  2. Report of the Minister of Transport of the Russian Federation Igor Levitin, «On the main outcomes of the social — economic development of the transport sector in 2011 and tasks for 2012 and the medium term» in the extended session of the Ministry of Transportation March 27, 2012. — M. : Russian Ministry of Transport, 2012. — 13 p.
  3. Guidelines for the evaluation of investment projects / Authors academic institutions / Institute of Systems Analysis, Central Economics and Mathematics Institute, etc. — 3<sup>rd</sup> ed., Rev. and add. [Text]. — M., 2004. — 221 p.
-

УДК 539.3

В.Е. МИРЕНКОВ, В.А. ШУТОВ, В.А. ПОЛУЭКТОВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ\*

Рассматривается процесс деформирования образцов при растяжении с образованием шейки. Формулируется новый класс обратных задач по идентификации упругих характеристик, граничных условий и геометрии дефектности с использованием переопределенных условий по замерам смещений и акустической эмиссии. Обсуждается проблема жестких и мягких прессов. Приводятся примеры расчета.

**Ключевые слова:** образец, деформирование, интегральные уравнения, обратная задача, решение, механические характеристики, граница, смещения, акустическая эмиссия.

Управлять деформированием — значит воздействовать на границу изучаемой области через контакт с другими телами, который характеризуется в механике нормальными и касательными напряжениями (смещениями или их комбинацией), поэтому ниже, явно или неявно, говоря о нормальных и касательных напряжениях на контакте, будем чисто теоретически подразумевать присутствие других тел (не обсуждая их), обеспечивающих рассчитанные напряжения (смещения). Процедура определения всех констант и функций материала предполагает использование экспериментальных данных, полученных при механических испытаниях, как правило, в условиях максимально приближенных к одноосному деформированию.

Классические экспериментальные методы определения деформационных характеристик материалов основываются на испытаниях представленных образцов и часто оказываются малоэффективными в связи с существенным влиянием на результаты измерений условий закрепления, способа нагружения, технологических трудностей изготовления образцов и т.п. Следовательно, достоверную информацию о механических свойствах материалов можно получить лишь при испытаниях, контролирующих не только усилие и удлинение образца, но и смещения его períметра, что приводит к необходимости получения приближенных решений обратных задач с выходом на проблему регуляризации.

Для описания критического поведения и разрушения твердого тела необходимо точное моделирование этого процесса с учетом таких важных факторов, как внутренние дефекты, зарождение и рост их, зависимость от граничных условий и т.д. Известно, что если растягивать цилиндрический образец с нанесенной круговой выточкой до разрушения, то он окажется более прочным, чем гладкий образец, если площади наименьшего сечения у них одинаковы. Это лишний раз подтверждает, что сложное напряженное состояние в первом случае в отличие от близкого к одноосному во вто-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00133).

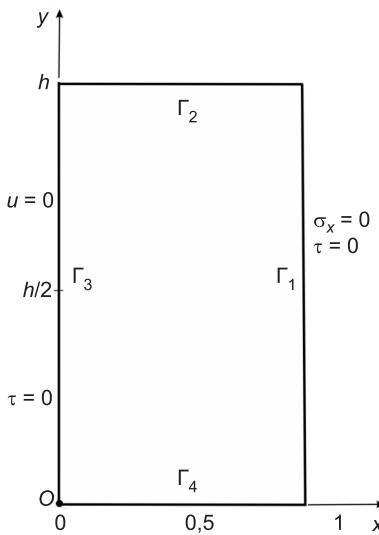


Рис. 1. Расчетная схема четверти пластины

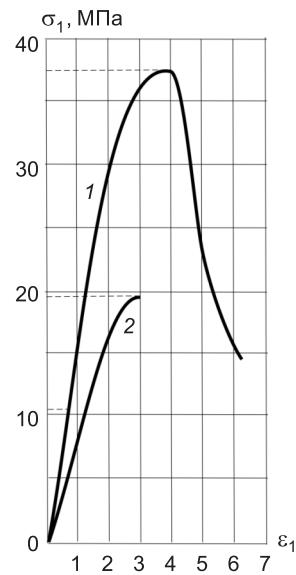


Рис. 2. Диаграмма напряжения — смещения получена на прессе

1 — жестком при  $\frac{d\varepsilon_1}{dt} = 0,01 \text{ мм/с}$ ;  
2 — мягком при  $\frac{d\sigma_1}{dt} = 0,35 \text{ МПа/с}$

ром увеличивает предел прочности, соотнося этот факт с изменением модуля Юнга материала, т.е. изменением свойств. Аналогичная картина наблюдается, когда гладкий образец подвергается обжатию гидростатическим давлением, после чего прикладывается дополнительное одноосное усилие, приводящее к увеличению предела прочности. Однако при этом не обращается внимание на изменение граничных условий в процессе всех манипуляций и необходимости формулировки обратных задач для идентификации их.

Для однородной прямоугольной пластины рассмотрим 4 варианта симметричных граничных условий, которые для ее четверти (рис. 1) сформулируем следующим образом:

на \$\Gamma\_1\$, \$\Gamma\_3\$, \$\Gamma\_4\$ — граничные условия одинаковы для всех задач, т.е.

$$v = 0, \tau = 0 \text{ на } \Gamma_4; \sigma_x = 0, \tau = 0 \text{ на } \Gamma_1; u = 0, \tau = 0 \text{ на } \Gamma_3; \quad (1)$$

на \$\Gamma\_2\$ имеем:

$$\sigma_y = \sigma_0, \tau = 0 \text{ на } \Gamma_2, \quad (2)$$

или

$$v = v_0, \tau = 0 \text{ на } \Gamma_2, \quad (3)$$

или

$$v = v_0, u = 0 \text{ на } \Gamma_2, \quad (4)$$

или

$$\sigma_y = \sigma_0, u = 0 \text{ на } \Gamma_2. \quad (5)$$

Здесь \$\Gamma = \Gamma\_1 + \Gamma\_2 + \Gamma\_3 + \Gamma\_4\$ — периметр рассматриваемой четверти пластины; \$u\$, \$v\$ — компоненты смещений в направлении осей \$x\$ и \$y\$;

\$\sigma\_x\$, \$\sigma\_y\$, \$\tau\$ — компоненты напряжений, \$\sigma\_0 = \text{const}\$.

Все величины, имеющие размерность длины, отнесены к \$\Gamma\_4\$, а размерность напряжений — к характерной величине напряжений на \$\Gamma\_2\$.

Система уравнений, связывающая граничные значения всех таких задач, имеет вид [1]

$$\begin{aligned} f(t_0) + 2\mu g(t_0) &= \frac{1}{\pi i} \int_t^{\bar{t}} \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_0}, \\ k\bar{f}(t) - 2\mu g(t_0) &= \frac{1}{\pi i} \int_t^{\bar{t}} \frac{\bar{f}(t) - 2\mu \bar{g}(t)}{t - t_0} dt - \frac{1}{\pi i} \int_t^{\bar{t}} [f(t) + 2\mu g(t)] d \frac{\bar{t} - t_0}{t - t_0}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $k = 3 - 4\nu$ ,  $\mu = E[2(1+\nu)]^{-1}$ ,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $E$  — модуль Юнга;

$t \in \Gamma$ ,  $t_0$  — аффикс точки границы  $\Gamma$ ;

$i$  — мнимая единица;

$g = u + iv$ .

$$f = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds = f_1 + if_2, \quad (7)$$

$X_n, Y_n$  — компоненты напряжений в направлении осей  $x$  и  $y$ ;

черточка над функцией обозначает комплексно-сопряженное значение.

Результаты расчета задач (1)–(5) для периметра  $\Gamma$  показали, что условия (2), (3) и (1) обеспечивают одноосное напряженно-деформированное состояние, граничные условия (4), (5) и (1) — качественно подобное деформирование, которое уже не является одноосным. Возникают касательные напряжения на  $\Gamma_2$  и нормальные напряжения  $\sigma_x$  на  $\Gamma_3$ . Растворяющие нормальные напряжения  $\sigma_x(y)$  образуются на  $y = h$ ,  $x = 0$ , убывают до нуля и переходят в сжимающие, убывающие до нуля в окрестности  $y = 0$ ,  $x = 0$ . Условие  $u = 0$  в (4), (5) начинает сказываться в окрестности  $y = h$ , а в окрестности  $y = 0$  отличия в смещениях нет во всех случаях (1)–(5).

Судить о результатах экспериментов по деформированию образцов без учета типа испытательных машин, которые в разных лабораториях меняются в широких пределах, нельзя. Особенno это касается появления «жестких» машин. Диаграммы с участками разупрочнения (падающая ветвь) не является характеристиками материала и не могут использоваться в этом качестве в расчетах разрушения в рамках математической теории упругопластичности: во-первых, ниспадающая ветвь характеризует не поведение материала в точке, а интегральную диаграмму деформирования образца, т.е. демонстрирует не реологическую неустойчивость, а конструкционную; во-вторых, краевые задачи для системы уравнений упругопластичности на участках разупрочнения становятся не корректными (из-за нарушения на этих участках критерия Друккера устойчивости материала), т.е. имеет место потеря свойства непрерывной зависимости решения от входных данных. При численном счете происходит переполнение арифметического устройства или получаются бессмысленные результаты, демонстрирующие отсутствие сходимости решения. Поэтому математические упражнения по использованию диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  с ниспадающей ветвью (жесткий пресс) некорректны.

Пресс, например INSTRON-8802, позволяет вести нагрузления как по осевой силе — «мягкий режим» (задается скорость нагрузления в кгс/с), так и по перемещениям «жесткий режим» (задается скорость перемеще-

ния траверсы пресса в  $\text{мм}/\text{с}$ ). К расхожей фразе: практика — критерий истины — привыкли все. Это достаточно качественное определение, нуждающееся в уточнении. Действительно, эксперименты проводят с той или иной точностью, которая, как правило, почти не уточняется (хотя многое говорится о точности измерения и что на нее влияет); полученные в неопределенных условиях результаты используются в пересчете (смещения в напряжения), а это уже обратная задача и во всех известных методах определения, скажем напряжений, некорректность не обсуждается; при определении в лабораторных условиях механических характеристик на образцах, когда постулируется одномерность деформирования, совсем не ясно, какие граничные условия выдает установка (мягкие и жесткие прессы — результаты разные и несравнимые).

Отношение значений прочности на растяжение и сдвиг может достигать 40:1 (например, в композитах), отсюда сложности при соединении образца с нагружающим механизмом. Даже для плоских образцов из таких материалов еще не создано такого способа крепления образца в испытательной установке, который бы не оказывал влияние на результат определения прочности. Еще более сложной является проблема крепления образцов круглого сечения. На рис. 2 приведены диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ , полученные на жестком (кривая 1) и на мягком прессе (кривая 2), заимствованные из [2].

Существенное различие результатов, получаемых на жестком и мягком прессе, связано с различием закрепления образцов. По существу можно провести аналогию между этими прессами и видами идеальных связей: жесткая заделка и, скажем, шарнирно неподвижная. Жесткая заделка (жесткий пресс) исключает взаимное смещение соединяемых тел. Значит на жестком прессе модуль Юнга больше, чем на мягком, т.е. фактически другой материал или сложное напряженное состояние. В жестком прессе в какой-то мере исключается сдвиг, т.е. сразу повышается предел прочности или увеличивается модуль Юнга. В мягком прессе сама конструкция крепления допускает поворот образца, т.е. реализуется сдвиг, а прочность на сдвиг наименьшая и запускается процесс разрушения.

В жестком прессе более специфические, трудно реализуемые и плохо контролируемые условия нагружения. Поэтому предел прочности на жестком прессе для одинаковых образцов примерно в 2 раза больше, чем на мягком (см. рис. 2). Возникает вопрос, какая из этих возможностей используется в реальной конструкции? Сравнение граничных условий, точно неизвестных, определит сложность их реализации, так как всегда реализуется промежуточный вариант и нужно учитывать промежуточные значения механических характеристик, лежащие между значениями, полученными на жестких и мягких прессах.

Таким образом, все от начала деформирования до разрушения управляет граничными условиями, от которых зависят и проблемы предельных напряжений. Для увеличения предела прочности (приближающегося к теоретическому) нужно исключить вращение образца и как следствие обеспечить такие же граничные условия для конструкции. Сложное напряженное состояние, в принципе, дает возможность материалу приблизиться к теоретической прочности и увеличить модуль Юнга, характеризуемый одноосным нагружением (или близким к нему). Чем дальше напряженное состояние от чисто одноосного нагружения, тем больше

модуль Юнга зависит от тензора напряжений, создаваемых в образце, т.е.  $E = E(\sigma_{ij})$ . Обжатие образца можно трактовать как уменьшение возможности образца поворачиваться, а значит оно эквивалентно увеличению жесткости захватов установки.

Нанотехнологии связаны с созданием уникальных свойств материалов с использованием наночастиц. Аналогичный и более дешевый вариант этого эффекта можно достичнуть образованием нужного сложного напряженного состояния в конкретной детали. Верно и обратное — если созданную из наночастиц деталь нагрузить соответствующими усилиями, то она поведет себя как обычная деталь, т.е. если почти идеальный скелет нагружать так, чтобы развивалось отличие от идеальности, то это приведет к быстрому разрушению.

Согласно результатам работ [1, 3] и решениям задач (1)–(5) при растяжении плоского образца поры концентрируются в окрестности  $y = 0, 0 \leq x \leq \varepsilon$ , вызывая изменение модуля Юнга в этом месте (величина  $\varepsilon$  может определяться с использованием результатов, например акустической эмиссии (АЭ)). Моделируя этот отрезок математическим разрезом со связями (перемычки между порами) и усредняя значения  $\sigma_y = \sigma_{00} = \text{const}$  на  $0 \leq x \leq \varepsilon$ ,  $y = 0$ , можно посчитать изменение деформирования образца. Конечно, более точно наличие перемычек и пор можно установить по результатам АЭ, т. е. определять  $\sigma_y = \sigma_{00}(x)$ . На рис. 3 приведены результаты расчета деформирования грани  $\Gamma_1$  (см. рис.1), где кривым 1, 2, 3, 4 соответствуют различные значения  $\sigma_{00} = 0,98; 0,9; 0,8; 0,7$  и  $\varepsilon = 0,25$  для задачи (1), (2) при  $\sigma_0 = 1$ . Другими словами, в задаче (1), (2) граничные условия на  $\Gamma_4$  для  $0 \leq x \leq \varepsilon$ ,  $y = 0$  вместо  $v = 0$  заменены на  $\sigma_y = \sigma_{00}$ . Как следует из рис. 3 образование пор, регистрируемых АЭ, приводит к оформлению и развитию шейки при растяжении образца или выпучиванию при сжатии. Рассмотренная последовательность операций, приводящая к результатам, представленным на рис. 3, является алгоритмом метода математического моделирования процесса накопления и реализации дефектов в образцах.

Таким образом, предложен алгоритм формирования трещин в области ослабленных связей. Область ослабленных связей моделируется трещиной со связями, свойства которых изменяются в процессе нагружения. Напряжения в связях и протяженность ослабленных связей определяются по результатам, например АЭ, т.е. концентрации пор. АЭ относится к числу прямых методов определения дефектности. Измерение интенсивности потока АЭ позволяет исследовать процесс накопления повреждений. Однако АЭ, как и любому экспериментальному методу, присущи различные недостатки, сильно сужающие область использования. Улучшение условий применения АЭ возможно при рассмотрении обратных задач аналогично [4], позволяющих расшифровать показания АЭ.

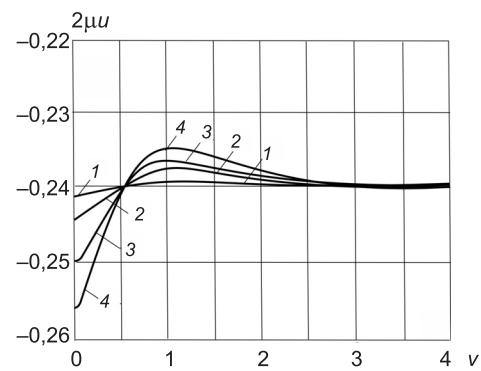


Рис. 3. Смещение грани  $\Gamma_1$

Итак, используемый в расчетах на прочность модуль Юнга, должен определяться на мягком прессе при контроле за выполнением условия одностороннего нагружения. Ниспадающая ветвь (см. рис. 2), т.е. разупрочнение, характеризует структуру материала (накопление повреждений) и не может использоваться в расчетах разрушения в рамках классической теории и упругопластичности. Предложен алгоритм моделирования процесса накопления дефектов математическим разрезом со связями, регистрируемыми АЭ. Появляется возможность использовать результаты АЭ по определению меры дефектности образца и расшифровывать показания ее из анализа решений обратных задач, переопределенность которых связана с натуральными замерами смещений в доступных точках контура. Создание уникальных свойств материалов возможно не только с использованием нанотехнологий, но и с созданием сложного напряженного состояния в конкретной детали, что в ряде случаев дешевле.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миренков, В.Е. О повреждаемости пластин при нагружении [Текст] / В.Е. Миренков, В.А. Шутов, В.А. Полуэктов // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 6. — С. 13–20.
2. Шейнин, В.И. Исследования особенностей проявления термомеханических эффектов при одноосном сжатии образцов каменной соли [Текст] / В.И. Шейнин, Д.И. Блохин // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 46–53.
3. Ужик, Г.В. Метод определения сопротивления материалов разрушению от отрыва [Текст] / Г.В. Ужик // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. — 1948. — № 10. — С. 1547–1560.
4. Шутов, В.А. Восстановление физических характеристик кусочно-однородных пластин [Текст] / В.А. Шутов, В.А. Полуэктов, В.Е. Миренков // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 12. — С. 16–24.

*МИРЕНКОВ Валерий Егорович, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия  
ШУТОВ Валерий Алексеевич, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия  
ПОЛУЭКТОВ Вячеслав Александрович, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

Получено после доработки 06.03.13

**Mirenkov Valery Egorovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

**Shutov Valery Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

**Poluektov Vyacheslav Alexandrovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

#### MODELING OF THE SAMPLE DEFORMATION PROCESS

The process of sample deformation under tension, including necking, is considered. A new class of inverse problems is formulated, dealing with identification of elastic parameters, boundary conditions, and geometry of the defects, given the over-determined data on measured displacements and acoustic emission. The problem of stiff and soft presses is discussed. Numerical examples are provided.

**Key words:** sample, deformation, inverse problem, integral equation, solution, mechanical properties, boundary, displacements, acoustic emission.

## REFERENCES

1. Mirenkov, V.E. On the damage of a plate under loading [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov, V.A. Poluektov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 6. — P. 13–20.
  2. Sheinin, V.I. Features of thermomechanical effects in rock salt samples under uniaxial compression [Text] / V.I. Sheinin, D.I. Blokhin // J. Mining Science. — 2012. — N 1. — P. 46–53.
  3. Uzhik, G.V. A method to determine the material resistance against breakoff [Text] / G.V. Uzhik // Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Technicheskikh Nauk [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, Department of Technical Sciences]. — 1948. — N 10. — P. 1547–1560.
  4. Shutov, V.A. Determination of physical characteristics of piecewise-homogeneous plates [Text] / V.A. Shutov, V.A. Poluektov, V.E. Mirenkov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 12. — P. 16–24.
-

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 624.072.2.014.2.042.8

Б.И. ПИНУС, **В.В. БЕЗДЕЛЕВ**, Г.И. ГРЕБЕНЮК, П.С. СОЗОНОВ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ СТАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Описано текущее состояние нормативных документов по вопросу учета физической нелинейности с учетом истории нагружения. Приведены наиболее распространенные методы учета нелинейности. На основе выполненных экспериментов предложена методика построения билинейной модели деформирования стального стержня при одноосном значительном нагружении.

**Ключевые слова:** физическая нелинейность, расчет во временной области, моделирование материалов, билинейная модель, изотропное упрочнение.

В последнее время произошли значительные изменения в сфере нормативного регулирования в строительстве. На основании ФЗ № 184 правительством было выпущено распоряжение № 1047-р, регламентирующее список строительных норм, обязательных на территории РФ. Одним из таких документов является СНиП II-7-81\* «Строительство в сейсмических районах» [1].

Новая редакция данного документа регламентирует две расчетные ситуации для большинства зданий и сооружений: проектное землетрясение (ПЗ) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ). При этом согласно п. 5.2.6 [1]: «Формирование расчетных моделей сооружений следует проводить с учетом возможности развития в несущих и ненесущих элементах конструкций неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений». Дальнейшие разъяснения по тому, как учитывать эти факторы, в другом обязательном документе — ГОСТ Р 54257-2010 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования» [2] отсутствуют.

Документ предписывает учитывать нелинейность, но не предоставляет данных для составления моделей поведения материалов. Что касается нормативных документов, непосредственно регламентирующих порядок расчета конструкций из соответствующих материалов, то ни СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции»<sup>1</sup>, ни СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции»<sup>2</sup> не описывают порядок выполнения такого расчета. Присутствующие в упомянутых СП положения позволяют провести только расчет конструкции на выносливость, что не

<sup>1</sup> СП 63.13330.2012 (СНиП 52-01-2003 Актуализированная редакция). Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Введ. 01.01.2013 // Свод правил / НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. М., 2012. 155 с.

<sup>2</sup> СП 16.13330.2011 (СНиП II-23-81\* Актуализированная редакция). Стальные конструкции. Введ. 05.20.2011 // Свод правил / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 2011. 173 с.

соответствует фактически возникающей амплитуде напряжений и деформаций и количеству циклов нагружения.

Таким образом, при текущем состоянии нормативной базы отсутствует возможность выполнения корректного расчета МРЗ. Для решения этой проблемы в нормах должна быть закреплена методика данного расчета, а также приведены модели материалов, позволяющие учесть их нелинейные свойства и их деградацию.

Согласно приведенным в документах требованиям, расчетная модель здания должна отличаться от классической, используемой при упругом расчете. К такой модели не может быть применен линейно-спектральный метод, поскольку поведение здания противоречит его основным принципам и базовым предположениям. В связи с этим должны быть приняты иные методы расчета. Для случая МРЗ уже фактически указан метод расчета — расчет во временной области [1, п. 5.22], хотя не дано поясняющих комментариев и нет ссылок на потенциальные источники исходных данных, как это сделано, например, в работе<sup>3</sup>.

Для учета физической нелинейности существует два подхода: моделирование нелинейных свойств материала (распределенная пластичность); моделирование нелинейных свойств элемента (концентрированная пластичность) (рис. 1)<sup>4</sup>. При первом подходе пластические деформации оказываются распределенными по элементу или системе, а при втором — сосредоточенными в пластических шарнирах.

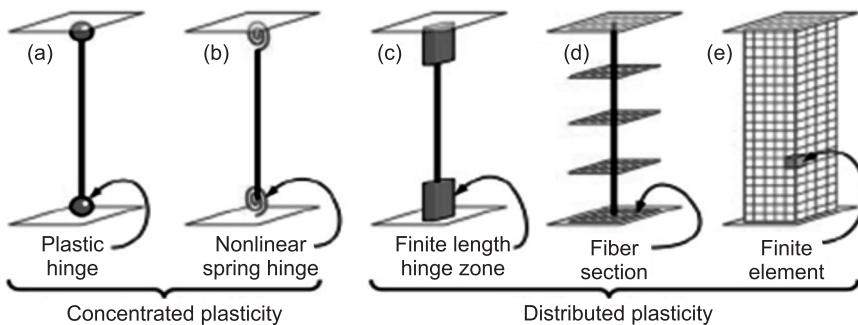


Рис. 1. Моделирование нелинейного поведения элементов<sup>3</sup>

Подход с концентрированной пластичностью используется в большинстве разработанных расчетных моделей, достаточно легко проверяется в эксперименте и удобен при численной реализации. Распределенная пластичность позволяет точнее описать поведение конструкции, но расчеты сопровождаются значительным повышением вычислительных затрат. Метод более универсальный, однако, более сложный в экспериментальной интерпретации.

Вне зависимости от способа моделирования физически нелинейных свойств при использовании МКЭ для каждого элемента должна быть получена матрица касательной жесткости, элементы которой в общем виде определяются как:

$$D_{i,j} = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{i,j}}, \quad (1)$$

где  $f$  — закон деформирования материала в виде  $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, C_1, C_2, \dots, C_n)$ .

<sup>3</sup> Deierlein G.G., Reinhard A.M., Willford M.R. Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design // NEHRP Seismic Design Technical Brief N. 4. Gaithersburg, MD, 2010. 32 p.

<sup>4</sup> Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. 224 с. с ил.

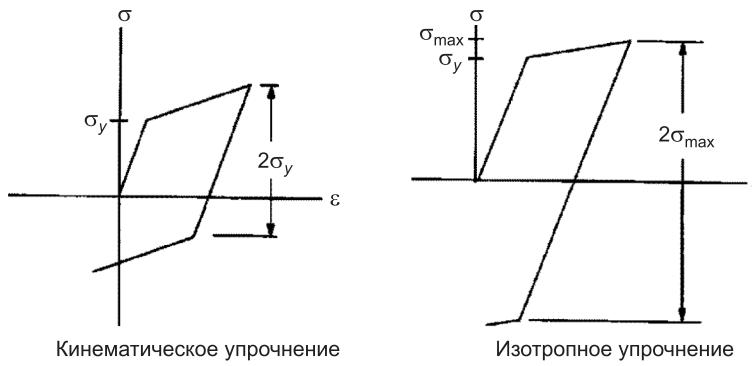


Рис. 2. Кривые  $\sigma$ - $\epsilon$  пластического поведения материала

В наиболее используемой модели Прандтля и в производных от нее моделях пластические деформации предполагаются возникающими мгновенно, т.е. не зависящими от времени. Критерием текучести выступает условие пластичности Губера — Мизеса — Генки. Для ветви разгрузки применяется принцип Мазинга. Деградация свойств не учитывается.

Поведение поверхности пластичности при знакопеременном нагружении описывается введением одного из законов упрочнения. Выделяют два закона упрочнения<sup>5</sup>: изотропное и кинематическое (трансляционное) (рис. 2). При изотропном упрочнении поверхность текучести сохраняет неизменное положение своего центра и только увеличивается в размерах по мере развития пластических деформаций.

Весьма удобной для численных расчетов с учетом физической нелинейности является принятая в данной работе билинейная модель. Закон деформирования для билинейной модели в случае одноосного деформирования может быть записан в виде

$$\begin{cases} f = E\epsilon & \text{при } |\sigma| < \sigma_y, \\ f = E_t\epsilon & \text{при } \sigma \geq \sigma_y \text{ и } \dot{\epsilon} > 0 \text{ или } \sigma \leq -\sigma_y \text{ и } \dot{\epsilon} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sigma_y$  — предел текучести,

$E$  — модуль упругости,

$E_t$  — модуль пластической упругости.

Для определения требуемых физико-механических параметров стали при знакопеременном нагружении, а также схемы упрочнения, были проведены эксперименты. Испытания на растяжение производились по ГОСТ 1497-84<sup>6</sup>, но с некоторыми изменениями. Эти изменения были вызваны следующей особенностью эксперимента: каждый образец должен быть испытан и на растяжение, и на сжатие. Так как образец не должен потерять устойчивость в ходе испытаний, предъявляются требования к его гибкости. Испытания на сжатие производились по ГОСТ 25.503-97 [3]. Поскольку на данный момент отсутствует оснастка, позволяющая испытать один и тот же образец как на растяжение, так и на сжатие (а это является необходимым условием для определения справедливости гипотезы кинематического либо изотропного упрочнения), было принято решение провести эксперимент, подобный описанному в [4].

<sup>5</sup> Khan A.S. Continuum theory of plasticity. John Wiley & Sons, Inc., 1995. 421 p.

<sup>6</sup> ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88). Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.01.1986 // Стандарты на методы контроля / М-во черной металлургии СССР. М., 1997. 34 с.

Высота образцов  $h$  для испытаний на сжатие определялась из условий обеспечения их устойчивости. Из кривых Ясинского следует, что при гибкости  $\lambda \leq 40$  потеря устойчивости происходит при напряжениях больших предела текучести. Исходя из этого, высоту образца принимаем равной  $2d$ . На метод вырезания образца также накладывается ограничение — вырезание образца не должно сопровождаться значительным повышением его температуры, поскольку при этом возникает изменение напряженно-деформированного состояния в зоне резания. Промежуток времени между испытаниями на растяжение и испытаниями на сжатие был максимально минимизирован.

Испытания проводились в два этапа. На первом этапе было испытано 4 образца диаметром 10 и длиной 150 мм, на втором этапе — 15 образцов диаметром 12 длиной 200 мм, все из стали Ст3. Стержни доводились до разного уровня деформаций — от 9 % до разрушения. Образцы для сжатия вырезались из всех образцов, в том числе из недеформированных.

Испытания проводились на прессе INSTRON-5982 с использованием ПО Bluehill 3.0, автоматически измерялись время испытания (с), перемещение траверсы (мм), прикладываемое усилие (Н).

Если верна гипотеза о кинематическом упрочнении, то предел текучести для образцов будет равен

$$\sigma_{yc} = \sigma_{yt} - \Delta\sigma_h = \sigma_y - (\sigma_b - \sigma_{yt}) = 2\sigma_y - \sigma_b. \quad (3)$$

В свою очередь, если верна гипотеза об изотропном упрочнении, то предел текучести для образцов составит

$$\sigma_{yc} = \sigma_{yt} + \Delta\sigma_h = \sigma_y + (\sigma_b - \sigma_{yt}) = \sigma_b. \quad (4)$$

На рис. 3 представлены результаты испытаний в абсолютных напряжениях.

Упрочненные образцы не имеют площадки текучести, характерной для контрольного образца. Кроме того, пластическая деформация упрочненных образцов возникает позднее, чем у контрольных, что свидетельствует об упрочнении стали на сжатие. При аппроксимации кривой двумя линиями видим, что величина этого упрочнения примерно соответствует степени наклепа при растяжении. Отсюда можно сделать следующие выводы: во-первых, обнаружен эффект изотропного упрочнения стали Ст3,

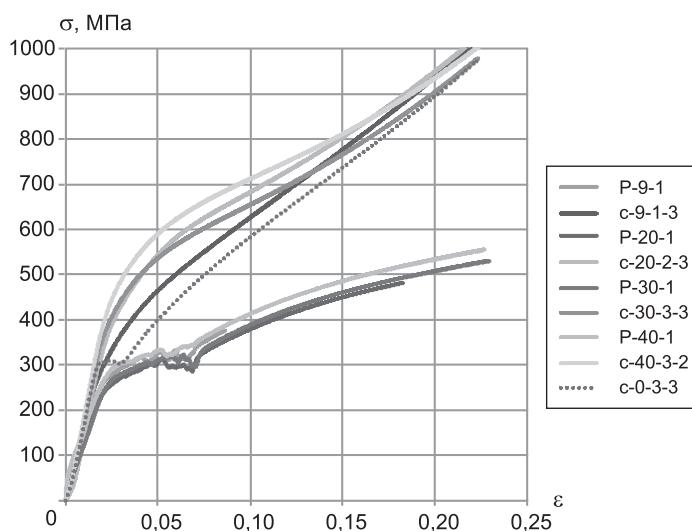


Рис. 3. Результаты испытаний образцов

во-вторых, для получения адекватной модели поведения материала следует строить ее в абсолютных напряжениях и деформациях. Это позволяет, используя описанную выше методику, построить модель деформирования стали Ст3 для случая растяжения-сжатия.

Для того чтобы сравнить модели, построенные в абсолютных и относительных деформациях, определим для них основные константы. Для описания модели необходимо задать три константы:  $E$ ,  $E_T$  и  $\sigma_y$ . Модуль упругости определялся из графиков и принимался одинаковым для обеих моделей.

За деформацию, соответствующую пределу временного сопротивления (предшествующему образованию шейки), принимаем  $\varepsilon_b = 30\%$ , поскольку это значение продиктовано опытом и не сильно отличается от значения по ГОСТ 25.503–97 (28 %). Предел текучести  $\sigma_y$  и предел временного сопротивления моделей в относительных  $\sigma_{b,отн}$  и абсолютных  $\sigma_{b,абс}$  напряжениях также берем по результатам опытов:  $\sigma_y = 260$  МПа,  $\sigma_{b,отн} = 445$  МПа,  $\sigma_{b,абс} = 600$  МПа. Деформация начала текучести соответствует величине

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} = \frac{260}{2,5 \cdot 10^4} = 0,01.$$

Модуль упрочнения  $E_T$  определяется из графика напряжение — деформация по двум точкам: первая — предел текучести ( $\varepsilon_y$ ,  $\sigma_y$ ), вторая — предел временного сопротивления ( $\varepsilon_b$ ,  $\sigma_b$ )

$$E_T = \frac{\sigma_b - \sigma_y}{\varepsilon_b - \varepsilon_y}. \quad (5)$$

Определим модуль упрочнения для моделей в относительных  $E_{T,отн}$  и абсолютных  $E_{T,абс}$  деформациях

$$E_{T,отн} = \frac{445 - 260}{0,30 - 0,01} = 638 \text{ МПа},$$

$$E_{T,абс} = \frac{600 - 260}{0,30 - 0,01} = 1172 \text{ МПа}.$$

Построим искомые модели деформирования в виде графиков в осях напряжение — деформация и наложим их на графики, полученные в ходе испытания образцов. В качестве опорных значений принимаем максимальные деформации образцов. Результат отражен на рис. 4.

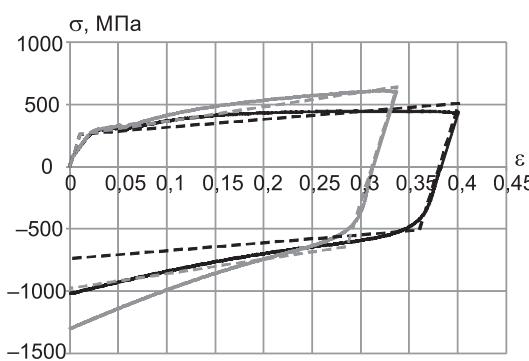


Рис. 4. Модель материала Ст3 в относительных и абсолютных значениях

Как можно видеть из рис. 4, модели достаточно хорошо отражают поведение металла при растяжении, но при сжатии кривая модели оказывается выше кривой фактических значений. Это может быть вызвано как несовершенством методов испытаний или вычислений, так и несовершенствами самой модели.

Ожидаемое совпадение результатов моделирования с результатами опыта появляется,

если требуемые для построения модели вычисления производить в абсолютных деформациях, переводить значения в относительные деформации и строить диаграмму деформирования материала. Здесь

$$\varepsilon_{\text{отн}} = e^{\varepsilon_{\text{абс}}} - 1, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{отн}} = \sigma_{\text{абс}} e^{-\varepsilon_{\text{абс}}}. \quad (7)$$

Полученный график приведен на рис. 5. Модель удовлетворительно описывает поведение образца при знакопеременном нагружении.

Оценка адекватности модели производилась сравнением удельной энергии деформирования (сравнивались площади под кривыми):

$$\omega = \frac{u_{\text{оп}} - u_{\text{мод}}}{u_{\text{оп}}} = \frac{411,9 - 391,2}{411,9} = 0,05 = 5\%. \quad (8)$$

Различие модели и опыта лежит в пределах 5 %, наибольшее различие по удельной энергии деформирования — в области растяжения. Использование трехлинейной диаграммы устранило бы данный недостаток, но усложнило бы вычисления. Значительное различие также наблюдается при разгрузке в области высоких деформаций. Этот недостаток можно устранить, если до наступления текучести обратного знака не применять описанную методику, т.е. расчет и построения вести как для упругого случая.

**Выводы.** 1. Разработана методика получения исходных экспериментальных данных и построения билинейной модели, позволяющей проводить адекватные расчеты элементов и конструкций при знакопеременном нагружении.

2. В результате испытаний не был получен эффект Баушингера, хотя его наличие изначально предполагалось, в том числе в соответствии с [4]. Возможно, его отсутствие объясняется характером испытаний — за время разрыва между испытаниями образца на растяжение и сжатие в стали успели пройти процессы релаксации напряжений.

3. Для того чтобы окончательно убедиться в характере работы стали при знакопеременном нагружении в дальнейшем, предполагается скорректировать методику эксперимента и выполнить серию испытаний при непрерывном знакопеременном деформировании образцов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 14.13330.2011 (СНиП II-7-81\* Актуализированная редакция). Строительство в сейсмических районах [Текст]. — Введ. 05.20.2011 // Свод правил / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. — М., 2011. — 84 с.
2. ГОСТ Р 54257–2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования [Текст]. — Введ. 01.09.2011 // Национальный стандарт Российской Федерации / ОАО «НИЦ «Строительство». — М., Стандартинформ, 2011. — 14 с.
3. ГОСТ 25.503–97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие [Текст]. — Введ. 01.07.1999 // Стандарты на методы контроля / Госстандарт России. — М., 1999. — 27 с.
4. Калпин, Ю.Г. Сопротивление деформации металла при сложной траектории нагрузки [Текст] / Ю.Г. Калпин, В.А. Рябов, А.С. Анохин // Материалы междуна-

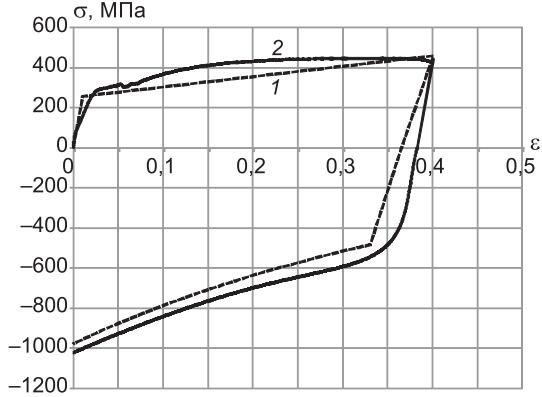


Рис. 5. Моделирование в абсолютных значениях с переводом в относительные значения

родной научно-технической конференции ААИ «Автомобилем- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». — М., 2010. — С. 139–140.

*ПИНУС Борис Израилевич, д-р техн. наук, проф.*

*Национальный исследовательский иркутский государственный технический университет*

**БЕЗДЕЛЕВ Владимир Викторович**, канд. техн. наук

*ОАО «Иркутский Промстройпроект», зам. генерального директора по качеству, начальник технического отдела*

**ГРЕБЕНЮК Григорий Иванович, д-р техн. наук, проф.**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

**СОЗОНОВ Павел Сергеевич, асп.**

*Национальный исследовательский иркутский государственный технический университет*

Получено 06.03.13

**Pinus Boris Izrailevich**, doctor of technical sciences, professor, National Research Irkutsk State Technical University, Russia

**Bezdelev Vladimir Victorovich**, candidate of technical sciences, JLC «Irkutskiy Promstroyproekt», deputy director general of quality, chief of technical department, Russia

**Grebenuk Grigory Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Sozonov Pavel Sergeevich**, post-graduate student, National Research Irkutsk State Technical University, Russia

## **MODELLING OF PHYSICAL NONLINEARITY OF THE STEEL ROD UNDER UNIAXIAL LOAD WITH DEFORMATION HISTORY ACCOUNT**

In the article the current state of Russian building codes concerning physical nonlinearity account with the deformation history taken into consideration is described. The most widespread methods of the account of nonlinearity are discussed. On the basis of provided experiments the bilinear model construction technique of the steel rod under uniaxial sign-variable load is offered.

**Key words:** physical nonlinearity, time-history analysis, modeling of materials, bilinear model, isotropic hardening.

### REFERENCES

1. SP 14.13330.2011. Seismic Building Design Code [Text] // Building codes / TSNIISK. — M., 2011. — 84 p.
2. State Standard R 54257–2010. Reliability of constructions and foundations. Basic principles and requirements [Text] // Russian Federation National Standard / FSRC «Construction». — M., 2011. — 14 p.
3. State Standard 25.503–97. Design calculation and strength testing. Methods of mechanical testing of metals. Method of compression testing [Text] // Control method standards / Federal agency on technical regulation and metrology. — M., 1999. — 27 p.
4. Kalpin, Yu.G. Metal strain resistance considering complex trajectory of loading [Text] / Yu.G. Kalpin, V.A. Ryabov, A.S. Anokhin // Materials of international scientific-and-technical conference AAI «Automobile and tractor construction in Russia: priorities of development and education», dedicated to 145-year anniversary of Moscow State University of Mechanical Engineering. — M., 2010. — P. 139–140.

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

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 статьи<sup>2</sup> за подписью автора или руководителя представляющей статью организацией. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;**

— рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и e-mail авторов;

— название статьи на английском языке;

— аннотацию на английском языке;

— ключевые слова на английском языке;

— библиографический список на английском языке.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением \*.cdr (предпочтительно) или \*.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстраций, в том числе фотографий, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2013 г. — из расчета 750 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

**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](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

**10.** Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

**11.** Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

**12.** Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

**13.** Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

**14.** Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

## ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 1-е полугодие 2013 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции  
Теория инженерных сооружений  
Строительные материалы и изделия  
Экономика и организация строительства  
Автоматизация и технология строительного производства  
Гидротехническое строительство  
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов  
Строительные и дорожные машины  
Научные проблемы архитектуры и экологии  
Научно-методический В лабораториях вузов  
Внедрение научных достижений в производство  
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 1800 р.

Цена отдельного номера — 300 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**

**№ 5 (653) 2013**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*  
Технический редактор *Г.П. Рыжкова*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*