

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

№ 3 (675)
Март 2015 г.

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

Редакционная коллегия:

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
Тел./факс +7 (383) 266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 27.03.15. Формат 70×108 1/16
Усл. печ. л. 10,33+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 7474

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Седова А.А., Осипов А.К., Неверов В.А., Нурлыбаев Р.Е.

Моделирование технологических режимов модификации природного диатомита для увеличения содержания аморфного диоксида кремния

5

Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., Полубарова Ю.В. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня

14

Машкин А.Н., Бердов Г.И., Виноградов С.А., Хританков В.Ф. Диэлькометрическое исследование влияния режимов тепловлажностной обработки на свойства цементного камня

23

Исламов А.М., Фахрутдинова В.Х., Абдрахманова Л.А., Старостина И.А., Ягунд Э.М., Кузнецова Л.М. Поверхностное усиление ПВХ полизицнатом

28

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Калугин Ю.Б., Жарый Д.А. Особенности оп-

тимизации календарных графиков с вероятностными временными параметрами .	34
Федосов С.В., Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Гусев Б.Н. Комплексная оценка конкурентных преимуществ предприятия по производству строительных материалов	46
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Шиляев М.И., Хромова Е.М., Богомолов А.Р., Широкова С.Н. Адаптация модели абсорбционной очистки газов в форсуночных скрубберах на хемосорбционные процессы	52
Рохлецова Т.Л., Савельев Е.Г., Кияница Л.А. Применение поэтажных коллекторов для квартирных систем отопления	59
Иванова С.Д., Амбросова Г.Т., Ксенофонтова О.В., Функ А.А., Ганзориг Шонхор, Леонова Е.Н. К вопросу определения степени рециркуляции активного ила при очистке сточных вод методом нитрификации и денитрификации	66
СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ	
Киселев В.П., Шевченко В.А., Василовская Г.В., Иванова Л.А., Ворончин В.Д. Устойчивость к старению нефтяного дорожного битума, модифицированного малокарбоксилированными полибутиданами	78
Щепотин Г.К., Машкин Н.А. Повышение морозоустойчивости земляного полотна автомобильных дорог	85
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Адегова Л.А. Применение модифицированных кривых усталости для расчетной оценки долговечности тонкостенных элементов конструкций	92
Азаров В.Н., Кошкарев С.А. К описанию сушки дисперсных строительных материалов при обеспыливании выбросов систем аспирации стройиндустрии в сепарационных устройствах с фильтрующе-взвешенным слоем	99
Коянкин А.А., Илизаров А.Г. Развитие методики расчета балки кусочно-постоянного сечения, выполняемого с использованием прерывателей Герсеванова	111

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE

OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION

OF CONSTRUCTION

HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**NEWS OF HIGHER
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal

Published since March 1958

Monthly

N 3 (675)

March 2015

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

Editorial Board:

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

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:

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

CONTENTS

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Selyaev V.P., Kupriyashina L.I., Sedova A.A., Osipov A.K., Neverov V.A., Nurlybaev R.E. Modeling of technological modes of modification of natural diatomite for increasing the content of amorphous silicon dioxide 5
Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I., Polubarova Ju.V. Integrated evaluation of quality parameters of structure and mechanics of destruction of a cement stone 14
Mashkin A.N., Berdov G.I., Vinogradov S.A., Hritankov V.F. Dielkometric research of influence of the modes heatmoist processing on properties cement stone 23
Islamov A.M., Fakhrutdinova V.Kh., Abdurakhmanova L.A., Starostina I.A., Yagund E.M., Kuznetsova L.M. Surface reinforcement of PVC by reactive oligomers 28

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

- Kalugin Yu.B., Zharyy D.A. Features of optimization of networks with imprecise durations 34
Fedosov S.V., Gruzintseva N.A., Lysova M.A., Gusev B.N. Complex esti-

mation of the competitive advantages of enterprises for manufacture of building materials	46
SANITARY ENGINEERING	
Shilyaev M.I., Khromova E.M., Bogomolov A.R., Shirokova S.N. Adaptation of the model of absorption gas treatment in the nozzle scrubbers for chemisorption processes	52
Rokhletsova T.L., Savelyev E.G., Kiyanitsa L.A. Application for collectors floor apartment heating systems	59
Ivanova S.D., Ambrosova G.T., Ksenofontova O.V., Funk A.A., Ganzorig Shonkhor, Leonova E.N. Determination of the degree of recirculation of activated sludge in the wastewater treatment method of nitrification and denitrification	66
CONSTRUCTION OF MOTOR ROADS AND BRIDGES	
Kiselev V.P., Shevchenko V.A., Vasilovskaya G.V., Ivanova L.A., Voronchikhin V.D. Ageing resistance of petroleum road asphalt modified by low carboxilated polybutadienes	78
Shchepotin G.K., Mashkin N.A. Improvement of road subgrade frost	85
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Adegova L.A. Application of the modified fatigue curve calculation for evaluating durability thin-walled elements	92
Azarov V.N., Koshkarev S.A. Model of dryin dispersed building materials for dust capturing in filtering-fluid bed' separating devices in construction industry	99
Koyankin A.A., Ilizarov A.G. Development of calculation methods of beam with piecewise-constant section made with the use of Gersevanov breakers	111

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.225:661.68

В.П. СЕЛЯЕВ, Л.И. КУПРИЯШКИНА, А.А. СЕДОВА,
А.К. ОСИПОВ, В.А. НЕВЕРОВ, Р.Е. НУРЛЫБАЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МОДИФИКАЦИИ ПРИРОДНОГО ДИАТОМИТА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать технологические решения получения аморфного диоксида кремния из природного диатомита. Установлено влияние температуры и концентрации водного раствора едкого натра на выход аморфного диоксида кремния.

Ключевые слова: диатомит, микрокремнезем, диоксид кремния, математическая модель, факторы, уровни варьирования, матрица планирования.

Развитые экономики широко используют микрокремнезем в различных отраслях: строительной, пищевой медицинской, сельскохозяйственной, атомной, газовой и др. Высокопрочные, высококачественные бетоны, растворы, теплоизоляционные материалы невозможно получить без применения микрокремнеземов. Поэтому задача получения микрокремнеземов из доступного сырья на основе простых и надежных технологий является актуальной и в поиске путей ее решения участвуют ученые разных стран.

Микрокремнезем можно получить различными методами: пирогенным, газопламенным, химическим, конденсационным и др. Наиболее доступным является золь-гель метод, сущность которого состоит в образовании геля через стадию золя и затем получение порошка из геля. Кремнеземсодержащий золь получают путем: частичной нейтрализации разбавленного раствора силиката натрия кислотой с образованием частиц диоксида кремния размером 35 нм; гидролиза тетрахлорида кремния с удалением образующейся кислоты и образованием сферических частиц размером 200 нм; гидролиза тетраэтилортосиликата в спиртовой среде (частицы 50–900 нм); дефлегмации разделения смеси, состоящей из этилсиликата и изопропилового спирта с добавлением водного раствора кислоты; обработки порошкообразного кремния плавиковой кислотой, для удаления оксидной пленки с поверхности и последующим растворением в водном растворе едкого натра с добавлением аммиака (Патент США Д.Ш. Балтиса [1]); растворением кремния в водном растворе неорганического основания (NaOH , KOH), который растворяет кремний при 50–100 °C и стабилизирует получающийся золь [2, 3].

© Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Седова А.А., Осипов А.К., Неверов В.А.,
Нурлыбаев Р.Е., 2015

Стабилизация золей производится гидроксидом натрия либо аммиаком при рН (8÷10).

Для получения порошка с высоким (более 90 %) содержанием дисперсного микрокремнезема предполагаем: растворить частицы природного диатомита в водном растворе едкого натра при температуре 20–90 °C; из полученного золя частицы отфильтровать и промыть в специальных растворах. Для изучения возможностей повышения выхода процентного содержания частиц диоксида кремния после обработки диатомита щелочным раствором проведены исследования влияния температуры и концентрации водного раствора едкого натра на процентное содержание и крупность частиц оксида кремния в порошке. При построении плана эксперимента в качестве выходных переменных рассматривались процентное содержание диоксида кремния в порошке (y_1), крупность частиц микрокремнезема (y_2). Варьируемыми переменными приняты концентрация (x_1) и температура (x_2) электролита.

При построении математической модели, описывающей зависимость выходных параметров (y_1 , y_2) от входных факторов (x_1 , x_2), приняли во внимание не только линейные эффекты факторов, но и влияние на целевую функцию синергетических взаимодействий различных порядков.

Математическую модель предложено принять в виде регрессионного уравнения второго порядка

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2. \quad (1)$$

Для экспериментального определения оценок коэффициентов уравнения, связывающего концентрацию, крупность частиц диоксида кремния на выходе химико-технологического процесса с температурой и концентрацией электролита на входе, предложено поставить эксперимент с применением D -оптимального плана Кифера — Коно. Критерий D -оптимальности при планировании эксперимента, состоящего из заданного N -числа опытов, выражается в определении условий (расположения точек), при которых определитель дисперсной матрицы имеет минимальную величину.

Если уравнение регрессии включает помимо линейных членов парные взаимодействия и квадраты независимых переменных, то независимые D -оптимальные планы для этого случая при количестве независимых факторов (n) от 2 до 7 построены аналитически в работах Кифера и Коно [4].

План Кифера — Коно строится путем постановки опытов в следующих точках n -мерного гиперкуба: в вершинах куба, в серединах ребер и в центрах двумерных граней.

Расположение экспериментальных точек непрерывного D -оптимального плана для $n = 2$ показано на рис. 1.

Точки d_1 , d_3 , d_7 , d_9 относятся к множеству E_0 ; d_2 , d_4 , d_6 , d_8 — точки множества E_1 ; d_5 — точка множества E_2 . Общее число точек плана — 9. Количество наблюдений в точках точного плана с учетом оптимальности будет равно для множества: E_0 — 15; E_1 — 8; E_2 — 10.

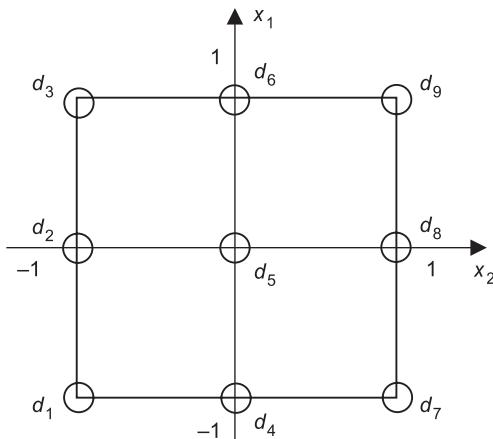


Рис. 1. Точки непрерывного D-оптимального плана Кифера — Коно при $n = 2$ для квадратных моделей

$A =$	+1	-1	-1	+1	+1	+1
	+1	-1	0	0	+1	0
	+1	-1	+1	-1	+1	+1
	+1	0	-1	0	0	+1
	+1	0	0	0	0	0
	+1	0	+1	0	0	+1
	+1	+1	-1	-1	+1	+1
	+1	+1	0	0	+1	0
	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Рис. 2. Матрица A по плану эксперимента

Переменные факторы и уровни их варьирования приведены в табл. 1. План эксперимента по Киферу — Коно и результаты опытов приведены в табл. 2. Переход к безразмерным переменным x_1, x_2 осуществляется по формулам

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1 - 20}{10}; \quad \bar{x}_2 = \frac{x_2 - 70}{20}. \quad (2)$$

Таблица 1. Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Кодовое обозначение	Значения факторов и их интервалы варьирования			
		-1	0	+1	Интервал
Концентрация водного раствора NaOH, %	x_1	10	20	30	10
Температура, °C	x	50	70	90	20

Таблица 2. Двухфакторный план эксперимента

N _o	Na(OH), %	T, °C	x_1	x_2	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	$y_i(\text{SiO}_2)$	\hat{y}_i	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	10 (-)	50 (-)	—	—	1	-1	-1	+1	+1	+1	98,9	94	4,9	24
2	10 (-)	70 (0)	—	0	1	-1	0	0	+1	0	89,7	96,6	-6,9	47,6
3	10 (-)	90 (+1)	—	+	1	-1	+1	-1	+1	+1	75,1	73,2	1,9	3,6
4	20 (0)	50 (-)	0	—	1	0	-1	0	0	+1	72,5	76,8	-4,3	18,5
5	20 (0)	70 (0)	0	0	1	0	0	0	0	0	90,8	88,3	2,5	6,25
6	20 (0)	90 (+1)	0	+	1	0	+1	0	0	+1	75,6	73,8	1,8	3,2
7	30 (+1)	50 (-)	+	—	1	+1	-1	-1	+1	+1	52,3	53,0	-0,7	0,49
8	30 (+1)	70 (0)	+	0	1	+1	0	0	+1	0	77,8	73,4	4,4	19,4
9	30 (+1)	90 (+1)	+	+	1	+1	+1	+1	+1	+1	64,0	67,8	-3,8	14,4

+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
-1	-1	-1	0	0	0	+1	+1	+1
-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
+1	0	-1	0	0	0	-1	0	+1
+1	+1	+1	0	0	0	+1	+1	+1
+1	0	+1	+1	0	+1	+1	0	+1

Рис. 3. Транспонированная матрица A

9	0	0	0	6	6
0	6	0	0	0	0
0	0	6	0	0	0
0	0	0	4	0	0
6	0	0	0	6	4
6	0	0	0	4	0

Рис. 4. Произведение матриц

5/9	0	0	0	-1/3	-1/3
0	1/6	0	0	0	0
0	0	1/6	-1	0	0
0	0	0	1/4	0	0
-1/3	0	0	0	1/2	0
-1/3	0	0	0	0	1/2

Рис. 5. Дисперсная матрица $C = (A^T \cdot A)^{-1}$

Обратная матрица $C = (A^T \cdot A)^{-1}$ приведена на рис. 5. Произведение обратной матрицы C на транспонированную A^T — на рис. 6.

Тогда согласно экспериментальным данным (см. табл. 2, 3) найдем оценки коэффициентов регрессии уравнения, описывающего выход оксида кремния (y_1)

$$b_0 = \frac{2(y_2 + y_4 + y_6 + y_8) - (y_1 + y_3 + y_7 + y_9) + 5y_5}{9}; \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{(y_7 + y_8 + y_9) - (y_1 + y_2 + y_3)}{6}; \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{(y_3 + y_6 + y_9) - (y_1 + y_4 + y_7)}{6}; \quad (6)$$

-1/9	2/9	-1/9	2/9	5/9	2/9	-1/9	2/9	-1/9
-1/6	-1/6	-1/6	0	0	0	1/6	1/6	1/6
-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
1/4	0	-1/4	0	0	0	-1/4	0	1/4
1/6	1/6	1/6	-1/3	-1/3	-1/3	1/6	1/6	1/6
1/6	-1/3	1/6	1/6	-1/3	1/6	1/6	-1/3	1/6

Рис. 6. Матрица для определения коэффициентов регрессии

$$b_{12} = \frac{y_1 - y_3 - y_7 + y_9}{4}; \quad (7)$$

$$b_{11} = \frac{(y_1 + y_2 + y_3) - 2(y_4 + y_5 + y_6) + (y_7 + y_8 + y_9)}{6}; \quad (8)$$

$$b_{22} = \frac{(y_1 + y_3 + y_4 + y_6 + y_7 + y_9) - 2(y_2 + y_5 + y_8)}{6}. \quad (9)$$

По значениям коэффициентов (формулы (4)–(9)) с учетом экспериментальных данных соответственно $b_0 = 88,3$; $b_1 = -11,6$; $b_2 = -1,5$; $b_{12} = 8,9$; $b_{11} = -3,3$; $b_{22} = -13,0$ определены расчетные значения \hat{y}_i . Очевидна хорошая сходимость экспериментальных y_i и расчетных значений \hat{y}_i выходного параметра.

Необходимо проверить адекватность полученного регрессионного уравнения вида

$$\hat{y}_1 = 88,3 - 11,6x_1 - 1,5x_2 + 8,9x_1x_2 - 3,3x_1^2 - 13x_2^2. \quad (10)$$

Суммы квадратов, характеризующие неадекватность модели S_D и ошибки наблюдений S_e , определим по соответствующим формулам:

$$S_D = \sum_{i=1}^N v(y_i - \hat{y}_i)^2 = vS_R, \quad (11)$$

$$S_e = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^v v(y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad S^2 = \frac{S_e}{v\varphi_2}, \quad (12)$$

где N — количество экспериментов (строк в матрице); v — количество опытов в точке.

Тогда количество степеней свободы φ_1 и φ_2 :

$$\varphi_1 = N - k - 1 = 3; \quad \varphi_2 = N(v - 1) = 9;$$

$$S_D = 0,0275; \quad S_e = \frac{0,05}{18} = 0,0028,$$

где k — количество слагаемых в регрессионном уравнении, для реализованного плана Кифера — Коно: $N = 9$; $v = 2$; $k = 5$.

Определим ошибку (значимость) коэффициентов регрессии из выражения

$$|\hat{a}_i - \bar{a}_i| < \sqrt{c_{ii}} S \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

где c_{ii} — член дисперсной матрицы C ; $S^2 = S_e / v\varphi_2$; ε — параметр t -распределения, который при доверительной вероятности 95 % и $\varphi_2 = 9$ будет $\varepsilon = 2,262$.

Тогда с 95 %-ной надежностью имеем:

$$|\hat{a}_0 - \bar{a}_0| < 0,09; \quad |\hat{a}_1 - \bar{a}_1| < 0,05; \quad |\hat{a}_2 - \bar{a}_2| < 0,05; \\ |\hat{a}_{12} - \bar{a}_{12}| < 0,06; \quad |\hat{a}_{11} - \bar{a}_{11}| < 0,08; \quad |\hat{a}_{22} - \bar{a}_{22}| < 0,08.$$

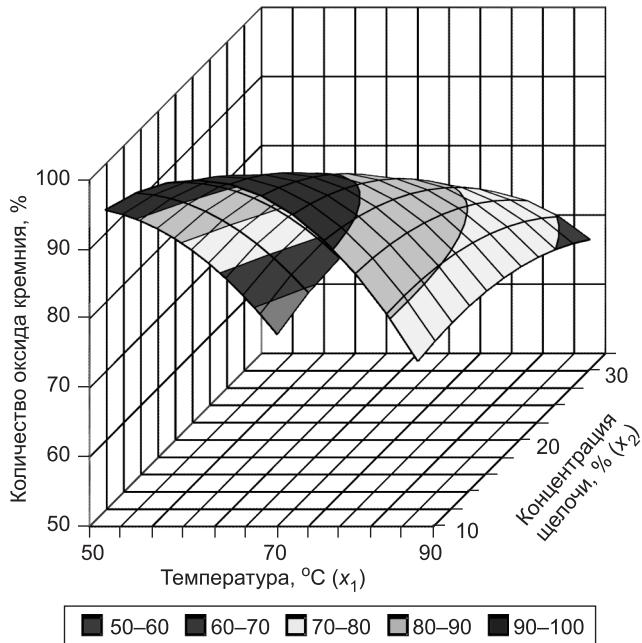


Рис. 7. Содержание диоксида кремния при разных режимах обработки y_1

Полученную точность можно считать достаточной и все коэффициенты регрессии значимыми.

Проверяем адекватность уравнения из условия Фишера:

$$F < F_{kp}; \quad F_{kp} (\varphi_1 = 3; \varphi_2 = 9) = 27,34.$$

$$\text{Критерий Фишера } F = \frac{S_D / \varphi_1}{S_e / \varphi_2} = \frac{0,0275 / 3}{0,05 / 9} = 1,7 < 27,34.$$

Таким образом проверка не противоречит предположению об адекватности модели.

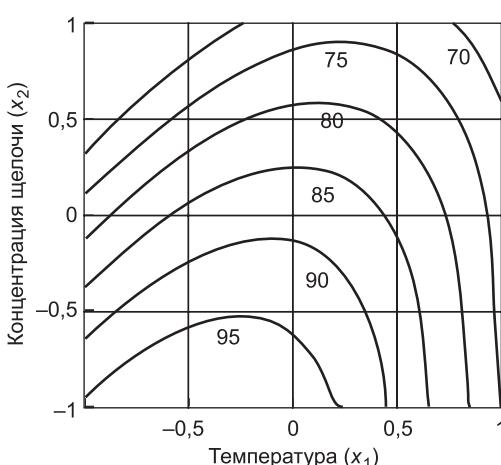


Рис. 8. Зависимость содержания диоксида кремния от концентрации (x_2) и температуры (x_1) водного раствора едкого натра

Графическая интерпретация уравнения (10) представлена на рис. 7, 8. Из анализа графиков следует, что наибольшему выходу диоксида кремния соответствует технологический режим с параметрами: концентрация едкого натра — 10 %; температура раствора — (+ 50) °C. Химический состав порошка микрокремнезема, полученного из природного диатомита, представлен в табл. 3. Крупность частиц меняется в пределах от 0,087 до 23,699 μm (табл. 4) в зависимости от параметров технологического режима. На рис. 9 показан-

Таблица 3. Химический состав порошка микрокремнезема, полученного из природного диатомита, %

N _º	Режим обработки	SiO ₂	Cl	Na ₂ O	Ar	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Ag ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	WO ₃	NiO	P	V ₂ O ₅	Pb
1	10 % (NaOH) + 50 °C	98,98	0,009	0,151	0,0162	0,0065	—	—	0,715	0,067	—	—	—	—	—	0,023	0,0056	0,0079
2	10 % (NaOH) + 70 °C	89,67	9,03	4,24	0,0159	0,0144	0,0114	0,0094	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	10 % (NaOH) + 90 °C	75,12	16,80	7,75	0,0176	0,0246	0,0161	0,0220	0,216	—	—	—	0,0190	—	—	—	—	—
4	20 % (NaOH) + 50 °C	72,46	17,43	8,63	0,0290	0,0265	0,0085	—	0,424	0,057	0,0145	—	—	0,781	0,115	—	—	—
5	20 % (NaOH) + 70 °C	90,83	5,30	3,08	0,0111	0,0500	0,0111	—	0,650	—	0,0269	0,0236	0,0102	—	—	—	—	—
6	20 % (NaOH) + 90 °C	75,56	13,96	7,79	0,0216	0,0203	0,0072	0,0118	2,58	—	0,0140	0,0134	—	—	—	—	—	—
7	30 % (NaOH) + 50 °C	52,33	32,09	14,91	0,0286	0,0094	0,0080	—	0,513	0,079	0,0104	—	—	—	—	—	—	—
8	30 % (NaOH) + 70 °C	77,80	15,02	6,75	0,0207	0,0136	0,0068	—	0,363	—	0,0083	—	—	0,009	—	—	—	—
9	30 % (NaOH) + 90 °C	64,05	22,10	11,27	0,0220	0,0314	0,0082	0,0328	2,42	—	0,0132	0,0209	0,0090	—	—	0,0118	—	—

Таблица 4. Крупность частиц диоксида кремния

№	Режим обработки		Размер полученных частиц, $\mu\text{м}$			Наибольшее содержание частиц крупностью, $\mu\text{м}$
	концентрация щелочи, %	температура, $^{\circ}\text{C}$	max	min	median	
1	10	+50	0,187	0,087	0,111	0,121 (28 %)
2	10	+70	0,563	0,291	0,378	0,404 (26 %)
3	10	+90	0,563	0,291	0,382	0,404 (27 %)
4	20	+50	0,404	0,260	0,319	0,325 (27 %)
5	20	+70	0,563	0,260	0,370	0,362 (28 %)
6	20	+90	0,563	0,260	0,376	0,404 (26 %)
7	30	+50	0,701	0,325	0,439	0,451 (25 %)
8	30	+70	0,451	0,260	0,320	0,362 (27 %)
9	30	+90	23,699	1,690	4,031	3,271 (8,4 %)

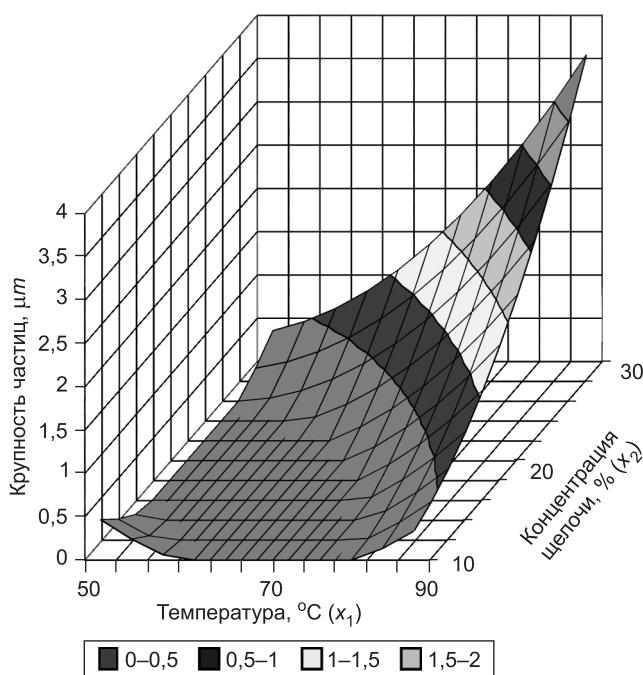


Рис. 9. Крупность частиц полученного микрокремнезема

но, что при температуре 50 $^{\circ}\text{C}$ и концентрации водного раствора едкого натра 10 % частицы микрокремнезема имеют размеры в диапазоне 87–187 нм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. США № 2614994, Baltis J.H. Du Pont (USA), 1952.
2. Пат. США № 3650977, Bobb J., Philadelphia Quartz (USA), 1972.
3. Попович, Н.В. Особенности кинетики процесса синтеза люминесцентных материалов золь-гель методом [Текст] / Н.В. Попович, В.В. Федоров // Стекло и керамика. — 2000. — № 3. — С. 8–10.

4. Kono, K. Optimum designs for quadratic regression on k-cube [Text] / K. Kono // Memoirs of the Faculty of Science. Series A. Mathematics 16. — Kunshu univ., 1962. — P. 114–122.

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
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
СЕДОВА Анна Алексеевна, канд. хим. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
ОСИПОВ Анатолий Константинович, канд. хим. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
НЕВЕРОВ Вячеслав Александрович, канд. физ.-мат. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
НУРЛЫБАЕВ Руслан Ергалиевич, докторант
Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

Получено 27.02.15

Selyaev Vladimir Pavlovich, academician of RAACS, doctor of technical sciences, professor, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

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

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

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

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

Nurlybaev Ruslan Ergalievich, doctoral candidate, Kazakh National Technical University K.I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan

MODELING OF TECHNOLOGICAL MODES OF MODIFICATION OF NATURAL DIATOMITE FOR INCREASING THE CONTENT OF AMORPHOUS SILICON DIOXIDE

The developed mathematical model allows to optimize technological solutions for producing amorphous dioxide of flint from natural diatomite. Installed the influence of temperature and concentration of an aqueous solution of sodium hydroxide on the yield of amorphous silicon dioxide.

Key words: diatomite, silica, silicon dioxide, mathematical model, factors, levels of variation, the planning matrix.

REFERENCES

1. Patent US N 2614994, Baltis J.H. Du Pont (USA), 1952.
2. Patent US N 3650977, Bobb J., Philadelphia Quartz (USA), 1972.
3. Popovich, N.V. Features of the kinetics of the synthesis of luminescent materials by the Sol-gel method [Text] / N.V. Popovich, V.V. Fedorov // Glass and ceramics. — 2000. — N 3. — P. 8–10.
4. Kono, K. Optimum designs for quadratic regression on k-cube [Text] / K. Kono // Memoirs of the Faculty of Science. Series A. Mathematics 16. — Kunshu univ., 1962. — P. 114–122.

УДК 691.327:539.4

**И.Н. МАКСИМОВА, В.Т. ЕРОФЕЕВ, Н.И. МАКРИДИН,
Ю.В. ПОЛУБАРОВА**

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ*

На основе комплексной оценки параметров качества структуры и анализа механического поведения цементного камня разной плотности и возраста при кратковременном нагружении опытных образцов получены численные значения критерии прочности, деформативности, трещиностойкости, энергии акустической эмиссии на кривой нагружения, а также коэффициента внутреннего трения и регрессионные зависимости основных физико-механических свойств, которые можно использовать как прогностические функции, позволяющие судить о динамике влияния плотности и возраста цементного камня на характер изменения его конструкционных свойств.

Ключевые слова: прочность, динамический модуль упругости, коэффициент внутреннего трения, критический коэффициент интенсивности напряжений, акустическая эмиссия.

Многочисленными исследованиями показано, что цементный камень или клей, являясь матричным компонентом структуры конструкционного бетона, предопределяет его механическое поведение как при силовом, так и несиловом воздействии [1–7].

В этой связи для оценки качества цементного камня и бетона на его основе важна в первую очередь конструкционная прочность — как комплексная механическая характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности. Основными показателями конструкционной прочности в физико-механическом аспекте являются пределы прочности, деформативности, трещиностойкости (вязкости разрушения) материала.

Создание конструкционных строительных материалов (КСМ) с определенными свойствами является важнейшей задачей современной науки о материалах, в основу решения которой положено описание связей эффективных свойств КСМ разных типов с характеристиками компонентов, которые можно получить только экспериментальным путем, и анализ особенностей механического поведения композитов как с позиций механики деформирования сплошной среды, так и с позиции структурной механики разрушения [8]. К сожалению, для анализа особенностей механического поведения конструкционных бетонов и особенно современных высокопрочных высококачественных бетонов нового поколения (БНП) экспериментальных исследований по изучению их деформативных особенностей на диаграмме нагружения в отечественной литературе весьма

* Выполнено в рамках гранта РФФИ №13-08-97182 «Исследование механизмов разрушения бетона при моделировании климатического воздействия в лабораторных условиях ускоренными методами».

мало, что сдерживает накопление базы данных по механике разрушения БНП.

Для комплексного изучения кинетики изменения предела прочности на осевое сжатие $R_{сж}$ и растяжение при изгибе $R_{п.и}$, динамического модуля упругости E_d и коэффициента внутреннего трения $K_{в.т}$, критического коэффициента интенсивности напряжений K_c^* , генерации ультразвуковых импульсов акустической эмиссии на диаграмме нагружения и плотности ρ цементного камня в зависимости от водоцементного отношения и возраста был использован быстротвердеющий портландцемент (БТЦ) марки 400 с нормальной густотой, равной 27–28 %. БТЦ содержал 15 % добавки из опоки. Минералогический состав БТЦ, %: C_3S — 54; C_2S — 20; C_3A — 9 и C_4AF — 13. Начало схватывания — 2 ч 10 мин, конец схватывания — 4 ч.

Оценку перечисленных выше параметров качества механических свойств цементного камня проводили по методикам ГОСТ 10180–90, ГОСТ 29167–91, инструкции прибора по измерению коэффициента внутреннего трения типа ИКВТ-2, энергию акустической эмиссии при разрушении образцов оценивали по методике [9].

Было изготовлено пять серий образцов цементного камня размером $4 \times 4 \times 16$ см с водоцементным отношением, равным 0,27; 0,32; 0,37; 0,42 и 0,47, т. е. с водоцементным отношением в диапазоне от нормальной густоты (НГ) до 1,65 НГ, по И.Н. Ахвердову, т. е. до максимальной водоудерживающей способности цементного теста. В каждой серии было изготовлено по 30 образцов.

После суточного хранения в формах над водой образцы распалубливали, взвешивали и помещали в воду при нормальной температуре на дальнейшее твердение.

Испытание образцов проводили в контрольные сроки в возрасте цементного камня 3, 14, 28, 60 и 90 сут. В каждый контрольный срок испытывали по шесть образцов каждой серии. С целью повышения достоверности получаемых результатов перечисленные характеристики качества цементного камня определяли на каждом образце.

Решение о хранении образцов в воде во время всего периода испытаний было принято с целью исключения влияния влажностных усадочных напряжений на контролируемые в эксперименте структурно-чувствительные параметры цементного камня.

В табл. 1 приведены численные значения характеристик качества цементного камня, полученные в наших опытах, по которым построены графические зависимости, приведенные в табл. 2.

В табл. 2 представлены результаты исследований по определению аналитических и графических зависимостей основных характеристик качества цементного камня, а также значения эмпирических коэффициентов уравнений регрессии и коэффициентов корреляции этих уравнений в зависимости от его возраста (τ) при постоянном значении его водоцементного отношения.

Математическая обработка результатов эксперимента позволила получить зависимости K_c^* от $R_{п.и}$ и E_d от $R_{сж}$ в виде соответствующих уравнений регрессии.

Таблица 1. Численные значения характеристик качества цементного камня

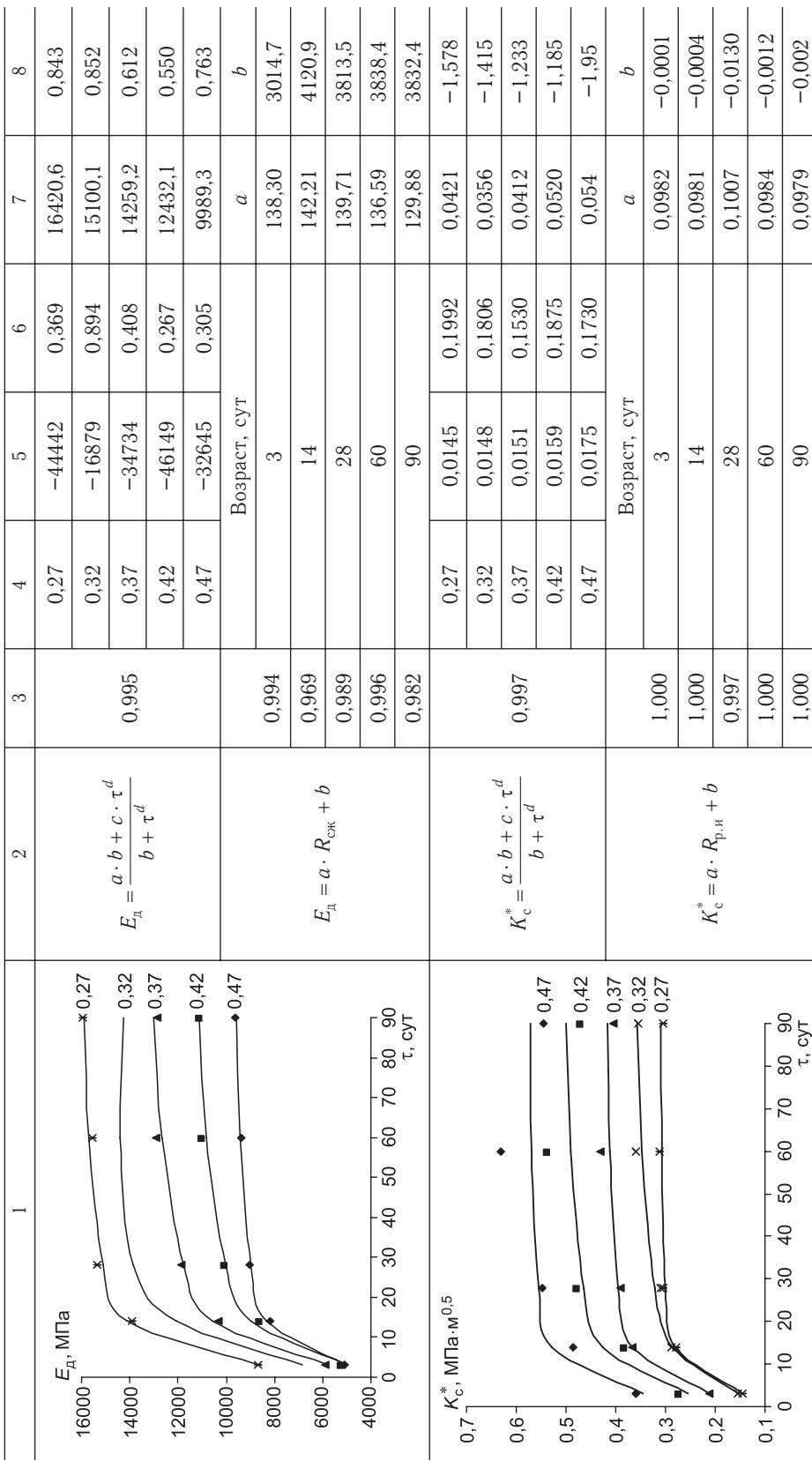
Возраст цементного камня, сут	Характеристики цементного камня						$\Theta_{a, \vartheta}$, B^2/cm^{-2}
	ρ , кг/ m^3	$R_{cж}$, МПа	$R_{p.i.}$, МПа	E_d , МПа	K_c^* , МПа · $m^{0.5}$	$K_{B.T}$	
$B/I = 0,27$							
1	2030	—	—	—	—	—	—
3	2060	41,1	3,67	8680	0,360	0,0274	0,08
14	2060	70,9	4,94	13930	0,485	0,0166	0,15
28	2070	80,4	5,57	15340	0,547	0,0144	0,175
60	2080	86,3	6,43	15550	0,632	0,0148	0,12
90	2090	91,2	5,55	15970	0,545	0,0148	0,11
$B/I = 0,32$							
1	1990	—	—	—	—	—	—
3	2010	27,8	2,8	6850	0,275	0,0260	0,06
14	2016	53,9	3,9	12070	0,384	0,0175	0,145
28	2023	74,4	4,87	13850	0,478	0,0153	0,15
60	2025	77,9	5,47	14390	0,537	0,0150	0,12
90	2030	84,2	4,8	14260	0,471	0,0154	0,11
$B/I = 0,37$							
1	1920	—	—	—	—	—	—
3	1930	19,5	2,17	5900	0,213	0,0316	0,04
14	1960	39,6	3,74	10340	0,367	0,0210	0,134
28	1960	57,0	3,99	11890	0,391	0,0166	0,14
60	1965	64,4	4,38	12900	0,430	0,0160	0,12
90	1970	67,0	4,12	12850	0,405	0,0163	0,11
$B/I = 0,42$							
1	1810	—	—	—	—	—	—
3	1840	16,9	1,58	5240	0,155	0,0374	0,040
14	1860	33,6	2,92	8620	0,287	0,0231	0,120
28	1860	45,9	3,28	10050	0,309	0,0187	0,130
60	1870	52,3	3,67	11040	0,360	0,0177	0,1
90	1875	56,4	3,6	11110	0,354	0,0168	0,08
$B/I = 0,47$							
1	1770	—	—	—	—	—	—
3	1790	15,5	1,48	5110	0,145	0,0398	0,035
14	1810	31,2	2,83	8170	0,278	0,0254	0,06
28	1810	36,5	3,1	9040	0,305	0,0200	0,06
60	1810	41,8	3,18	9390	0,312	0,0189	0,05
90	1815	45,2	3,1	9650	0,305	0,0190	0,04

Из анализа численных значений коэффициентов корреляции следует, что между рассматриваемыми величинами наблюдается достаточно тесная связь, а сами функции регрессии могут быть использованы как прогностические для оценки изменения характеристик качества цементного камня во времени.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить уравнения регрессии названных выше характеристик качества цементного камня от его водоцементного отношения (табл. 3), установить значения эмпирических коэффициентов уравнений регрессии для 3, 14, 28, 60 и 90-суточного возраста цементного камня и установить численные значения эмпирических коэффициентов корреляции уравнений регрессии.

Таблица 2. Аналитические и графические зависимости основных характеристик качества цементного теста

Свойство цементного камня	Вид функции	r	В/Ц	Значения коэффициентов			
				a	b	c	d
1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{p,u}$, МПа	$R_{p,u} = \frac{a \cdot b + c \cdot \tau^d}{b + \tau^d}$	0,945	0,27 0,32 0,37 0,42 0,47	-31,12 -32,51 -4,81 -8,43 -1,06	0,19 0,16 0,91 0,48 2,99	6,0 5,5 4,4 4,1 3,2	0,885 0,654 0,964 0,601 1,358
R_{ck} , МПа	$R_{ck} = \frac{a \cdot b + c \cdot \tau^d}{b + \tau^d}$	0,947	0,27 0,32 0,37 0,42 0,47	0,27 -129,2 -47,9 -108,8 -91,4	-326,7 0,878 1,99 0,958 0,651	99,91 114,04 96,98 105,08 60,05	0,559 0,408 0,464 0,263 0,387
			0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 τ , сут	10 20 30 40 50 60 70 80 90 τ , сут	10 20 30 40 50 60 70 80 90 τ , сут	10 20 30 40 50 60 70 80 90 τ , сут	10 20 30 40 50 60 70 80 90 τ , сут



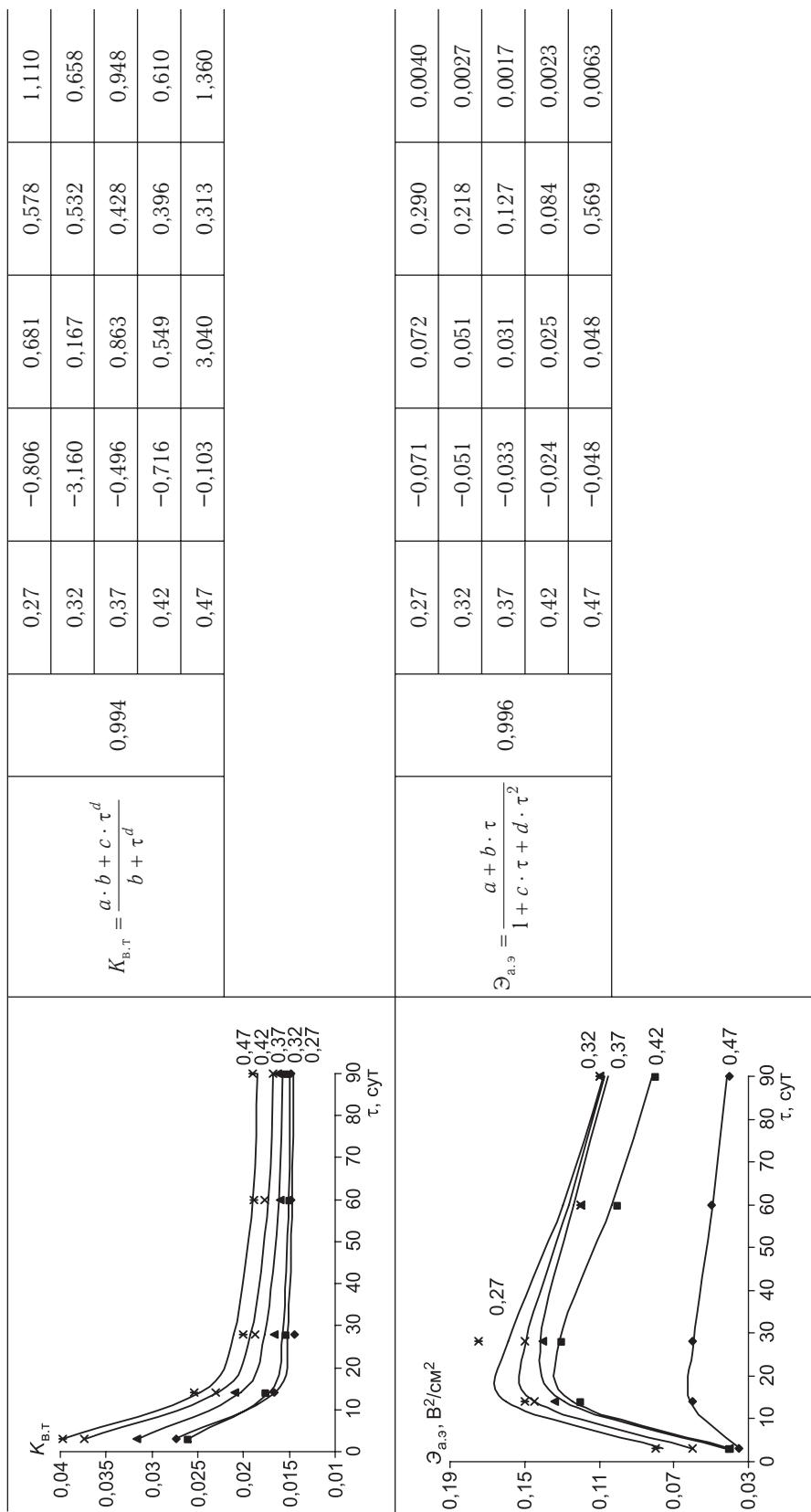


Таблица 3. Значения эмпирических коэффициентов уравнений регрессии

Свойство цементного камня	Вид функции	r	Возраст, сут	Значения коэффициентов		
				a	b	c
Предел прочности при растяжении, МПа	$R_{p,i} = a \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^b$	0,992	3	0,38	-1,74	—
			14	1,26	-1,03	—
			28	1,31	-1,12	—
			60	1,24	-1,27	—
			90	1,48	-1,02	—
Предел прочности при сжатии, МПа	$R_{сж} = a \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^b$	0,947	3	2,96	-1,99	—
			14	8,38	-1,62	—
			28	14,71	-1,34	—
			60	18,50	-1,21	—
			90	20,17	-1,18	—
Динамический модуль упругости, МПа	$E_d = a \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^b$	0,991	3	2170,82	-1,04	—
			14	3743,04	-1,01	—
			28	4495,70	-0,95	—
			60	5288,28	-0,85	—
			90	5251,50	-0,86	—
Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа · м ^{0,5}	$K_c^* = a \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right)^b$	0,977	3	0,0373	-1,737	—
			14	0,1239	-1,032	—
			28	0,1267	-1,128	—
			60	0,1209	-1,275	—
			90	0,1457	-1,016	—
Коэффициент внутреннего трения	$K_{в.т} = a + b \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right) + c \cdot \left(\frac{Ц}{B}\right)^2$	0,981	3	-0,0307	0,1382	0,0015
			14	0,0015	0,0501	0,0001
			28	-0,0013	0,0428	0,0003
			60	-0,0028	0,0421	0,0005
			90	0,0002	0,0359	0,0004
Энергия акустической эмиссии, В ² /см ²	$\Theta_{a.э} = a + b \cdot \left(\frac{B}{Ц}\right) + c \cdot \left(\frac{Ц}{B}\right)^2$	0,968	3	-0,0563	0,1216	0,0076
			14	0,6640	-1,117	-0,016
			28	0,5926	-1,001	-0,011
			60	0,6430	-1,085	-0,017
			90	0,6158	-1,064	-0,016

Проверка значимости коэффициентов корреляции показала, что во всех рассматриваемых зависимостях коэффициенты корреляции являются значимыми с надежностью вывода не менее 0,94.

Проведенные комплексные исследования оценки качества структуры и механического поведения цементного камня с водоцементным отношением от нормальной густоты до максимальной водоудерживающей способности цементного камня в возрастном диапазоне от 3 до 90 сут позволили получить регрессионные зависимости основных свойств цементного

камня, функции которых могут быть использованы, с одной стороны, как прогностические, а с другой, — как расчетные параметры цементного камня (клея) в достаточно широком диапазоне его плотности и возраста.

По экспериментальной акустической ветви энерговыделения представляется возможным прогнозировать предразрушающее состояние, судить о степени хрупкости и осуществлять рецептурно-технологическую оптимизацию структуры цементного камня. Использованный в исследовании подход к оценке трещиностойкости цементного камня с помощью методов внутреннего трения и акустической эмиссии открывает новые экспериментальные возможности совершенствования структуры цементного камня (клея).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы [Текст] / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. — 2014. — № 3. — С. 6–14.
2. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд. [Текст] / В.Г. Батраков // М. : Стройиздат, 1998. — 768 с.
3. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны [Текст] / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. — М. : АСВ, 2006. — 368 с.
4. Бондаренко, В.М. Физические основы прочности бетона [Текст] / В.М. Бондаренко, В.П. Селяев, П.В. Селяев // Бетон и железобетон. — 2014. — № 4. — С. 2–5.
5. Бабков, В.В. Структурообразование и разрушение цементных бетонов [Текст] / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Комохов. — Уфа : Уфимский полиграфкомбинат, 2002. — 371 с.
6. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов [Текст] / В.И. Калашников // Технология бетонов. — 2007. — № 5. — С. 8–10; № 6. — С. 8–11; 2008. — № 1. — С. 22–26.
7. Орешкин, Д.В. Механика разрушения и современные научные исследования строительных материалов [Текст] / Д.В. Орешкин // Вестн. Моск. гос. строит. ун-та. — 2013. — № 12. — С. 180–183.
8. Максимова, И.Н. Методологические аспекты комплексной оценки механического поведения цементных композитов [Текст] / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.В. Полубарова // Региональная архитектура и строительство. — 2015. — № 1 (22). — С. 28–33.
9. Макридин, Н.И. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении [Текст] / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова // Строительные материалы. — 2007. — № 3. — С. 26–29.

МАКСИМОВА Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: maksimova@pguas.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: pgs@mrsu.ru
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
МАКРИДИН Николай Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: techbeton@pguas.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ПОЛУБАРОВА Юлия Владимировна, студ.; E-mail: techbeton@pguas.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 03.02.15

Maksimova Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: maksimova@pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Erofeev Vladimir Trofimovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: pgs@mrsu.ru, Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Makridin Nikolay Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: techbeton@pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia
Polubarova Yulija Vladimirovna, student; E-mail: techbeton@pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

INTEGRATED EVALUATION OF QUALITY PARAMETERS OF STRUCTURE AND MECHANICS OF DESTRUCTION OF A CEMENT STONE

On the basis of a comprehensive evaluation of quality parameters of structure and analysis of mechanical behavior of cement stone of different density and age with short-term loading tests of the prototypes are the numerical values of the criteria of durability, deformativnosti, crack-resistance, energy of acoustic emission on a curve of loading, as well as the coefficient of internal friction, and regression on the main physical and mechanical properties that can be used as a predictive functionality that allows to judge about the dynamics of influence of density and age of a cement stone at the nature of the change in its structural properties.

Key words: strength, modulus of elasticity, coefficient of dynamic internal friction, the critical stress intensity factor, acoustic emission.

REFERENCES

1. Bazhenov, Yu.M. Construction of modern concrete structures: define principles and technology platforms [Text] / Yu.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh // Stroitel'nye materialy. — 2014. — N 3. — P. 6–14.
2. Batrakov, V.G. Modified concretes. Theory and practice. 2 edit. [Text] / V.G. Batrakov // M. : Stroyizdat, 1998. — 768 p.
3. Bazhenov, Yu.M. Modified high performance concretes [Text] / Yu.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. — M. : ASV, 2006. — 368 p.
4. Bondarenko, V.M. Physical basis of concrete strength [Text] / V.M. Bondarenko, V.P. Selyaev, P.V. Selyaev // Beton i zhelezobeton. — 2014. — N 4. — P. 2–5.
5. Babkov, V.V. Structure formation and destruction of cement concrete [Text] / V.V. Babkov, V.N. Mokhov, S.M. Kapitonov, P.G. Komokhov. — Ufa : Ufimskiy poligrafskombinat, 2002. — 371 p.
6. Kalachnikov, V.I. Through rational reologii to the future concrete [Text] / V.I. Kalachnikov // Technologiya betonov. — 2007. — N 5. — P. 8–10; N 6. — P. 8–11; 2008. — N 1. — P. 22–26.
7. Orechkin, D.V. Fracture mechanics and modern research of building materials [Text] / D.V. Orechkin // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta. — 2013. — N 12. — P. 180–183.
8. Maksimova, I.N. Methodological aspects of the integrated assessment modelling the mechanical behavior of cement composites [Text] / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Ju.V. Polubarova // Regional'naya architektura i stroitel'stvo. — 2015. — N 1 (22). — P. 28–33.
9. Makridin, N.I. Acoustic emission method in construction materials [Text] / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova // Stroitel'nye materialy. — 2007. — N 3. — P. 26–29.

УДК 691.542:666.97.035.55

А.Н. МАШКИН, Г.И. БЕРДОВ, С.А. ВИНОГРАДОВ, В.Ф. ХРИТАНКОВ

ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Установлено влияние температуры и длительности тепловлажностной обработки на диэлектрические свойства и механическую прочность цементного камня. Показано отрицательное воздействие понижения температуры тепловлажностной обработки на указанные характеристики. Выявлено наличие корреляционной связи между диэлектрическими свойствами и прочностью цементного камня.

Ключевые слова: портландцемент, тепловлажностная обработка, прочность, диэлектрические свойства, диэлькометрия.

При изготовлении бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях для ускорения набора прочности обычно используется тепловлажностная обработка в различных установках, преимущественно в пропарочных камерах периодического действия. При прогреве изделий подъем температуры до 80–90 °C осуществляется в течение 1,5–3 ч, затем проводится изотермическая выдержка при постоянной температуре и охлаждение в течение 2–3 ч. Общая длительность обработки составляет 6–15 ч [1].

В данной работе для исследования влияния температуры и длительности прогрева на структуру и свойства цементного камня использован диэлькометрический метод [2]. При этом производилось определение диэлектрических свойств образцов цементного камня: диэлектрической проницаемости ϵ , добротности Q , диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. Диэлькометрия успешно применима в тех случаях, когда одним из компонентов, участвующих во взаимодействии, является вода. Это характерно для процесса взаимодействия вяжущих веществ с водой и формирования структуры искусственного камня.

Диэлектрические свойства воды подробно изучены. При температуре 20 °C и частоте около 1 МГц $\epsilon = 78$, $\operatorname{tg}\delta = 0,4$ [3]. Диэлектрические свойства портландцемента в исходном и гидратированном состояниях мало исследованы. Об их значениях можно судить по аналогии с другими силикатами и гидросиликатами такими, как волластонит, форстерит, слюда, тальк. У керамики, основу которой составляет волластонит ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), при частоте 1 МГц и температуре 20 °C $\epsilon = 6,5\text{--}7$, $\operatorname{tg}\delta = 0,0003\text{--}0,0004$. У керамики на основе форстерита ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) при тех же условиях $\epsilon = 6,8\text{--}7,1$, $\operatorname{tg}\delta = 0,0001\text{--}0,0005$ [4]. У кристаллических тел, содержащих полярные молекулы воды, диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери больше, чем у безводных веществ. Так, в работе [5] для кристаллического гипса на частоте 1,5 МГц приведено значение $\epsilon = 26$, для кристаллического талька $\epsilon = 18$.

В процессе твердения цемента вода переходит в болееочно связанное состояние в составе кристаллогидратов, структура цементного камня

совершенствуется. Это неизбежно приводит к изменению диэлектрических свойств.

В работе исследован портландцемент производства ОАО «Искитимцемент» (Новосибирская область) марки ПЦ 500 Д 20. Его минералогический состав, мас. %: C_3S — 60–65; C_2S — 16–20; C_3A — 8–13; C_4AF — 10–13. Удельная поверхность 4100 $\text{см}^2/\text{г}$. Химический состав цемента, мас. %: SiO_2 — 19,1; Al_2O_3 — 6,3; Fe_2O_3 — 4,4; CaO — 68,2; MgO — 1,2; SO_3 — 0,4, п.п. — 0,5.

Образцы цементного камня имели размеры 20×20×20 мм. Определена их прочность и диэлектрические свойства в процессе твердения в течение 3, 7, 14 и 28 сут в нормальных условиях после тепловлажностной обработки по различным режимам.

Диэлькометрические исследования проведены с использованием измерителя добротности Tesla BM-560 на частоте 1,5 МГц при температуре 20 °С. Такая частота наиболее информативна при изучении веществ, содержащих полярные молекулы воды [5].

На торцевые поверхности образца наносились графитовые электроды, подключение к измерителю добротности осуществлялось посредством стальных пластин, плотно контактирующих с графитовыми электродами. Каждый образец испытан не менее 4 раз, в каждой серии изучалось не менее 3 образцов. После диэлектрических измерений те же образцы испытывались на прочность при сжатии. Это позволяет корректно сопоставлять значения прочности и диэлектрических свойств цементного камня.

Для оценки влияния режимов тепловлажностной обработки цементных образцов на их свойства при последующем твердении изменялись температура обработки T и длительность изотермической выдержки τ . При всех режимах подъем температуры осуществлялся в течение 3 ч, охлаждение — 2 ч. Использованы следующие режимы: № 1: $T = 80$ °С; $\tau = 7$ ч; № 2: $T = 80$ °С; $\tau = 0$ ч; № 3: $T = 50$ °С; $\tau = 11$ ч.

В табл. 1–3 приведены средние значения исследуемых свойств для каждой серии испытаний.

У образцов, прошедших тепловлажностную обработку по режиму № 1, при дальнейшем твердении в нормальных условиях прочность увеличивается, возрастает добротность, а тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость снижаются (табл. 1).

Такое изменение свойств цементного камня обусловлено повышением упорядоченности его структуры и увеличением степени энергетической связи в ней полярных молекул воды.

Таблица 1. Изменение прочности и диэлектрических свойств образцов цементного камня при твердении после тепловлажностной обработки по режиму № 1 ($T = 80$ °С; $\tau = 7$ ч)

Свойства	Время твердения, сут			
	3	7	14	28
Прочность при сжатии, МПа	54,3	57,1	58,3	60,1
Диэлектрическая проницаемость ϵ	29,2	26,8	25,9	25,4
Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$	0,735	0,746	0,731	0,719
Добротность Q	29,2	31,4	32,9	34

Вода в цементном камне может находиться в следующих состояниях:

- 1) в составе гидратных новообразований;
- 2) в адсорбированном состоянии на поверхности твердых частиц;
- 3) в свободном состоянии в порах и капиллярах [6].

Снижение диэлектрической проницаемости при твердении является отражением вклада молекул воды в поляризацию материала вследствие упорядочения ее связи в структуре.

После термообработки по режиму № 2 значения прочности цементного камня ниже, чем при обработке с изотермической выдержкой (табл. 2). Особенno это проявляется в первые сроки твердения (3, 7 сут) после тепловлажностной обработки.

Таблица 2. Изменение прочности и диэлектрических свойств образцов цементного камня при твердении после тепловлажностной обработки по режиму № 2 ($T = 80^{\circ}\text{C}$; без изотермической выдержки)

Свойства	Время твердения, сут			
	3	7	14	28
Прочность при сжатии, МПа	38	45,6	51,6	57,9
Диэлектрическая проницаемость ϵ	28,7	26,8	25,9	25,0
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$	0,824	0,788	0,753	0,732
Добротность Q	27,5	30	32	33,7

Следует отметить, что диэлектрические свойства образцов цементного камня при твердении после термообработки по режимам № 1 и 2 практически одинаковы, т.е. такая степень связывания полярных молекул воды в структуре цементного камня достигается самим нагревом до 80°C . Различие значений механической прочности обусловлено, по-видимому, физическими процессами, способствующими упрочнению структуры: сращивание кристаллов, перекристаллизация новообразований. При этом значения механической прочности цементного камня, обработанного по указанным режимам, после 14 и 28 сут твердения близки между собой.

Снижение температуры тепловлажностной обработки цементного камня даже при увеличении длительности изотермической выдержки (режим № 3) приводит к уменьшению прочности цементного камня (табл. 3). Диэлектрическая проницаемость образцов повышена, т.е. вклад полярных молекул воды в поляризацию цементного камня в высокочас-

Таблица 3. Изменение прочности и диэлектрических свойств образцов цементного камня при твердении после тепловлажностной обработки по режиму № 3 ($T = 50^{\circ}\text{C}$; изотермическая выдержка 11 ч)

Свойства	Время твердения, сут			
	3	7	14	28
Прочность при сжатии, МПа	20,5	34,9	48,3	51,4
Диэлектрическая проницаемость ϵ	36,3	38,6	30,6	29,2
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$	0,810	0,773	0,751	0,723
Добротность Q	23,2	22,4	29,5	30,2

тотном поле возрастают. Это может быть обусловлено меньшей степенью гидратации портландцемента в рассматриваемых условиях и менее прочной связью молекул воды в структуре образующихся кристаллогидратов. Экспериментально определяемые значения добротности цементного камня в этом случае понижены, а расчетные величины $\operatorname{tg}\delta$ увеличены.

С течением времени твердения прочность образцов, обработанных по режиму № 3, возрастают, тем не менее после 28 сут твердения она ниже, чем прочность образцов, твердевших в течение 3 сут, прошедших обработку по режиму № 1.

Таким образом, проявляется тесная корреляционная связь между значением прочности при сжатии цементного камня и его диэлектрическими свойствами, наибольшее влияние на эти свойства оказывает температура тепловлажностной обработки. Диэлькометрия может быть успешно использована для определения оптимальных режимов тепловлажностной обработки бетона. Результаты диэлькометрических измерений, коррелирующие со значениями механической прочности цементного камня, могут являться основой неразрушающего метода оценки этой прочности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горчаков, Г.И. Строительные материалы [Текст] / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. — М. : Стройиздат, 1986. — 681 с.
2. Заринский, В.А. Диэлькометрия [Текст] / В.А. Заринский // Химическая энциклопедия. — М. : Сов. энцикл., 1990. — Т. 2. — С. 210.
3. Хиппель, А.Р. Диэлектрики и их применение [Текст] / А.Р. Хиппель. — М.; Л. : Госэнергоиздат, 1959. — 336 с.
4. Будников, П.П. Химическая технология керамики и огнеупоров [Текст] / П.П. Будников, В.Л. Балкевич, А.С. Бережной и др. — М. : Стройиздат, 1972. — 552 с.
5. Водопьянов, К.А. Температурно-частотная зависимость для диэлектрических потерь в кристаллах с полярными молекулами [Текст] / К.А. Водопьянов // Докл. АН СССР. — 1952. — Т. 94, № 5. — С. 919–921.
6. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст] / Т.В. Кузнецова, И.В. Куряшов, В.В. Тимашев. — М. : Высш. шк., 1989. — 384 с.

МАШКИН Алексей Николаевич, канд. техн. наук

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

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

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ВИНОГРАДОВ Семен Алексеевич, асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

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

Новосибирский государственный аграрный университет

Получено 26.02.15

Mashkin Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

Vinogradov Semen Alexeevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

DIELKOMETRIC RESEARCH OF INFLUENCE OF THE MODES HEATMOIST PROCESSING ON PROPERTIES CEMENT STONE

Influence of temperature and duration of heatmoist processing on dielectric properties and mechanical durability of a cement stone is established. Negative impact of fall of temperature of heatmoist processing on this characteristics is shown. Existence of correlation communication between dielektric properties and durability of a cement stone is revealed.

Key words: portland cement, heatmoist processing, durability, dielektric properties, dielkometric.

REFERENCES

1. Gorchakov, G.I. Construction materials [Text] / G.I. Gorchakov, Yu.M. Bazhenov. — M. : Stroyizdat, 1986. — 681 p.
 2. Zarinskiy, V.A. Dielcometric [Text] / V.A. Zarinskiy // Khimicheskaya enciklopedia. — M., 1990. — Vol. 2. — P. 210.
 3. Hippel, A.R. Dielectrics and their application [Text] / A.R. Hippel. — M.; L. : Gosenergoizdat, 1959. — 336 p.
 4. Budnikov, P.P. Chemical technology of ceramics and refractories [Text] / P.P. Budnikov, V.L. Balkevich, A.S. Berezhnoy, etc. — M. : Stroyizdat, 1972. — 552 p.
 5. Vodopianov, K.A. Temperature-frequency dependence for dielektical losses in crystals with polar molecules [Text] / K.A. Vodopianov // Reports Academy of sciences USSR. — 1952. — Vol. 94, N 5. — P. 919–921.
 6. Kuznetsova, T.V. Physical chemistry binders [Text] / T.V. Kuznetsova, I.V. Kudryashov, V.V. Timashev. — M. : Vish. Shk, 1989. — 384 p.
-

УДК 691.175 : 678.743.22

**А.М. ИСЛАМОВ, В.Х. ФАХРУТДИНОВА, Л.А. АБДРАХМАНОВА,
И.А. СТАРОСТИНА, Э.М. ЯГУНД, Л.М. КУЗНЕЦОВА**

ПОВЕРХНОСТНОЕ УСИЛЕНИЕ ПВХ ПОЛИИЗОЦИАНАТОМ

Представлены результаты диффузионного модифицирования поливинилхлорида полиизоцианатом. Показано, что отверждение олигомера в среде линейных макромолекул поливинилхлорида приводит к изменению полярности и усилению его поверхности. Методом ИК-Фурье спектроскопии выявлены основные соединения, образующиеся при отверждении полиизоцианата в поверхностных слоях поливинилхлорида.

Ключевые слова: поливинилхлорид, полиизоцианат, полузаимопроникающие сетки, свободная поверхностная энергия.

Современное материаловедение достигло больших успехов в создании новых полимерных композиционных материалов с комплексом позитивных физико-химических свойств, в том числе на основе поливинилхлорида (ПВХ). Материалы на его основе нашли широкое применение в строительной индустрии благодаря сочетанию высоких технико-эксплуатационных свойств с низкой стоимостью, не характерных для других крупнотоннажных полимеров.

Как правило, структура и свойства материалов неодинаковы по сечению изделий и конструкций. Поверхностные слои реальных материалов отличны от внутренних областей, так как содержат больше локальных перенапряжений, дефектов структуры, возникающих из-за несовершенства технологии переработки [1, 2]. Это важно, так как поверхностные слои в первую очередь подвергаются основным воздействиям внешних эксплуатационных факторов (механическим, тепловым и химическим), которые инициируют механическое разрушение, коррозию, старение материала.

Для устранения данных недостатков необходима модификация материала, максимально усиливающая ответственную часть полимерного изделия — его поверхностный слой. Один из путей решения данной проблемы — поверхностная диффузионная модификация ПВХ реакционноспособными олигомерами (РСО). Данный способ заключается в пропитке полимеров в определенных олигомерах с последующей термообработкой с целью отверждения последних. Ранее была показана эффективность данного способа модификации реакционноспособными фурановыми [3] и эпоксидными олигомерами [4]. Кроме того, была показана эффективность поверхностной модификации неорганическими диффузантами, например, гидрозолями поликремниевой кислоты [5].

Высокими термомеханическими свойствами, стойкостью к абразивному износу обладают полимеры на основе олигомерных изоцианатов [6], поэтому они также могут быть эффективными в качестве диффузантов ПВХ.

**© Исламов А.М., Фахрутдинова В.Х., Абдрахманова Л.А., Старостина И.А.,
Ягунд Э.М., Кузнецова Л.М., 2015**

Исследования проводились на блочных ПВХ-образцах размерами $20 \times 20 \times 4$ мм, полученных вальцеванием и последующим прессованием композиции, состоящей из 100 м.ч. ПВХ С-7058-М (ГОСТ 14332-78) и 3 м.ч. стеарата кальция (ТУ 6-09-4104-87). В качестве изоцианатного олигомера был использован полиизоцианат (ПИЦ) марки Lupranate M20S, представляющий собой темно-коричневую жидкость с вязкостью при 25°C — $170 \div 250$ МПа · с, являющуюся смесью дифенилметан-4,4' диизоцианата (МДИ) с полиметиленполифенилизоцианатом (полимерный МДИ) при соотношении 2:3 с содержанием NCO-групп — $30 \div 32\%$ по массе.

Закономерности диффузии полиизоцианатного олигомера в матрицу ПВХ изучались при различных температурно-временных режимах. Кинетика поглощения диффузанта определялась по изменению массы блочных образцов, пропитанных со всех сторон. Из представленных кривых на рис. 1 видно, что процесс диффузии характеризуется типичными кинетическими кривыми насыщения. Возрастание температуры приводит к снижению времени достижения равновесной степени набухания.

Изменение концентрации ПИЦ в поверхностных слоях полимера и степень его отверждения определялись по изменению микротвердости ПВХ-образцов (пластины толщиной 4 мм), так как между данными параметрами установлена определенная взаимосвязь [7]. Начальный процесс диффузии олигомера снижает показатели микротвердости (рис. 2), что обусловлено его пластифицирующим действием. Но последующая термическая обработка приводит к усилению поверхности, при этом наиболее максимальный прирост микротвердости для ПВХ (в 1,7 раза) наблюдается при достижении степени насыщения 0,4% (в течение 5 мин при 60°C или в течение 40 мин при 80°C).

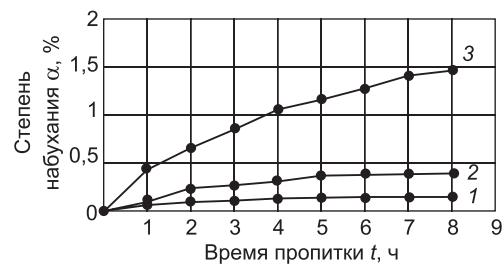


Рис. 1. Кинетические кривые насыщения ПВХ в полиизоцианате при температуре 40°C (1), 60°C (2) и 80°C (3)

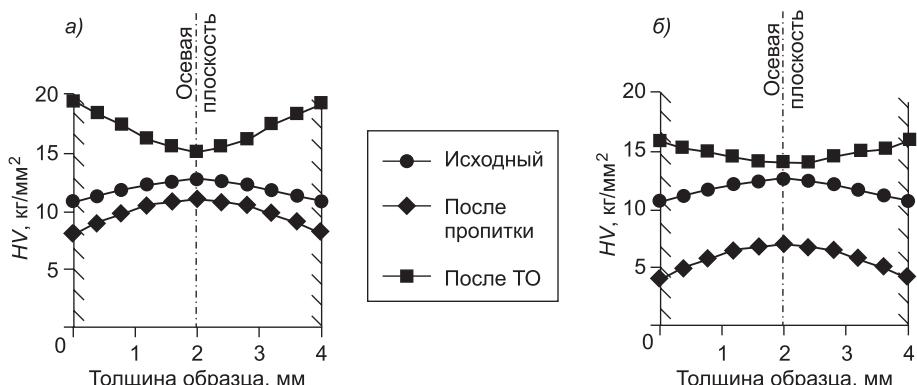


Рис. 2. Кривые распределения микротвердости по толщине ПВХ-образцов, пропитанных до насыщения при температуре 60°C (а) и 80°C (б) и отверженных при температуре 100°C в течение 40 мин

Результатом усиления является образование в поверхностных слоях неотделимого градиентного слоя со структурой полузвизимопроникающих сеток (полу-ВПС), состоящей из сетчатых продуктов отверждения ПИЦ, распределенных в среде линейных макромолекул ПВХ.

Процесс отверждения ПИЦ в матрице ПВХ сопровождается рядом химических реакций. Как известно [8], изоцианаты легко вступают в реакцию с влагой воздуха с образованием соответствующего амина, который, в свою очередь, в условиях тепловой обработки способен реагировать с изоцианатными группами олигомера с образованием соединений с мочевинными и биуретовыми группами. Кроме этого ПИЦ может вступать в реакцию тримеризации с образованием триизоциануратных циклов.

Для изучения химического строения образующихся продуктов использован метод ИК-спектроскопии совместно с программным комплексом «ВИАЛ» для обработки спектров [9]. В модифицированных ПВХ-образцах снижается интенсивность пика с частотой 2272 см^{-1} , характеризующего колебания изоцианатной группы ($-\text{NCO}$) в ПИЦ.

Соотношение образующихся продуктов превращения ПИЦ в матрице ПВХ установлено путем анализа области колебаний карбонильных групп $1850\text{--}1650 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3, б), имеющей сложный контур. Результирующий пик колебаний был разложен на составляющие, значения которых приведены в табл. 1.

Новообразования ПИЦ в основном представлены соединениями с мочевинными и биуретовыми группами. У ПВХ-образцов с оптимальной

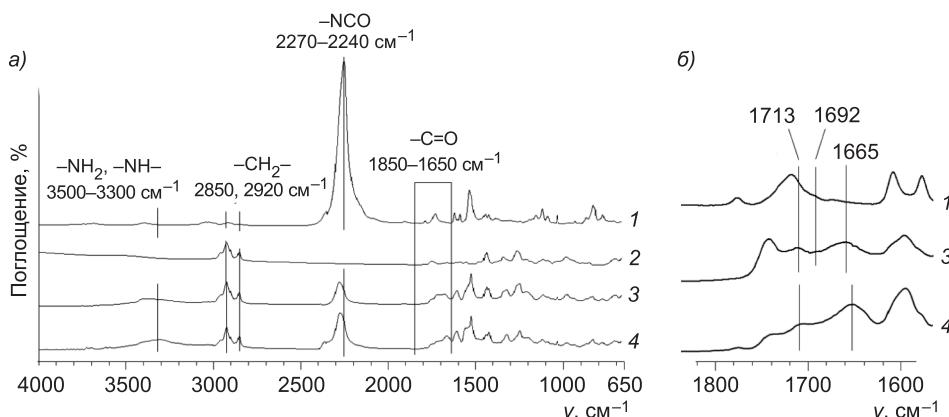


Рис. 3. ИК-спектры (а) и участок в области $1800\text{--}1600 \text{ см}^{-1}$ (б) исходного ПИЦ (1), исходного ПВХ (2) и поверхностно-модифицированного ПВХ в ПИЦ при $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (3) и при $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (4)

Таблица 1

Образец	Концентрация карбонильных групп ($-\text{C=O}$), содержащихся в различных функциональных группах		
	изоциануратная группа	мочевинная группа	биуретовая группа
ПВХ+ПИЦ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ($\alpha = 0,4 \text{ \%}$)	27,9 % (1692 см^{-1})	40,7 % (1665 см^{-1})	23,4 % (1713 см^{-1})
ПВХ+ПИЦ $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ($\alpha = 1,5 \text{ \%}$)	—	53,3 % (1656 см^{-1})	46,4 % (1705 см^{-1})

степенью пропитки (при 60 °С) выявлен пик, характерный для изоциануратов, присутствием которых можно отметить наибольший эффект усиления поверхностного слоя (см. рис. 2, а).

Возникновение градиентного слоя приводит к изменению кислотно-основных свойств поверхности ПВХ-образцов, что является важным при создании адгезионных соединений различного назначения. Сводные данные по изменению составляющих свободной поверхностной энергии (СПЭ) и рассчитанного на их основе параметра кислотности представлены в табл. 2, которые были определены методом смачивания материала тестовыми жидкостями [10].

Таблица 2

Образец	Кислотно-основная составляющая свободной поверхностной энергии, γ_s^{ab} , мДж / м ²	Дисперсионная составляющая свободной поверхностной энергии, γ_s^d , мДж / м ²	Свободная поверхностная энергия, γ_s , мДж / м ²	Параметр кислотности D , (мДж / м ²) ^{1/2}
ПВХ исходный	11,66	25,26	36,92	0,14
ПВХ+ПИЦ (60 °С)	8,79	31,84	40,63	-2,35
ПВХ+ПИЦ (80 °С)	3,72	34,68	38,4	0,39
ПВХ исходный после термической обработки	6,27	34,32	40,59	1,91

Судя по составляющим СПЭ и параметру кислотности D , поверхность исходного ПВХ является высокополярной и характеризуется слабыми кислотными свойствами. ПВХ-образцы, пропитанные при 60 °С до постоянной массы с последующим отверждением, обладают выраженной основностью поверхности ($D = -2,35$), поскольку сам ПИЦ и продукты его превращения содержат функциональные группы основного характера. Поверхность образца после пропитки при 80 °С имеет слабокислый характер, что, вероятно, связано с интенсификацией деструктивных процессов в ПВХ ($D = 0,39$) с образованием кислотных кратных ($=C=C=$) связей. Данные изменения параметра кислотности поверхностных слоев ПВХ должны быть учтены при выборе адгезива, так как наилучшее адгезионное взаимодействие достигается, когда один из соединяемых материалов обладает кислотными свойствами, а другой основными.

Таким образом, при диффузионной модификации ПВХ полизоцианатом в поверхностном слое полимера образуется градиентный слой со структурой типа полу-ВПС. Продуктами превращения ПИЦ являются соединения, содержащие мочевинные, биуретовые и триизоциануратные группы, которые, вероятно, и приводят к усилиению поверхностных слоев ПВХ-образцов, а также изменению функциональности от слабокислой до основной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Повстугар, В.И. Строение и свойства поверхности полимерных материалов [Текст] / В.И. Повстугар, В.И. Кодолов, С.С. Михайлова. — М. : Химия, 1988. — 192 с.

2. Мачюлис, А.Н. Диффузионная стабилизация полимеров [Текст] / А.Н. Мачюлис, Э.Э. Торнау. — Вильнюс : Минтис, 1974. — 256 с.
3. Абдрахманова, Л.А. Поверхностная модификация изделий из поливинилхлорида фурановыми олигомерами [Текст] / Л.А. Абдрахманова, В.Х. Фахрутдинова, В.Г. Хозин // Пластические массы. — 1993. — № 1. — С. 17–18.
4. Исламов, А.М. Поверхностное модифицирование ПВХ эпоксидной смолой, функционализированной углеродными нанотрубками [Текст] / А.М. Исламов, В.Х. Фахрутдинова, Л.А. Абдрахманова // Известия КазГАСУ. — 2013. — № 3 (25). — С. 86–92.
5. Fakhruddinova, V.Kh. Polymeric Composite Materials with the Strengthened Superficial Properties [Текст] / V.Kh. Fakhruddinova, A.M. Islamov, D.G. Ilyukhin, L.A. Abdurakhmanova // Journal of Material Science and Engineering. — 2012. — N 5. — P. 385–390.
6. Шутов, Ф.А. Композиционные материалы на основе полиуретанов [Текст] / Ф.А. Шутов; пер. с англ.; под ред. Дж. М. Бюиста. — М. : Химия, 1982. — 240 с.
7. Манин, В.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации [Текст] / В.Н. Манин, А.Н. Громов. — Л. : Химия, 1980. — 248 с.
8. Саундерс, Дж.Х. Химия полиуретанов [Текст] / Дж.Х. Саундерс, К.К. Фриш; пер. с англ.; под ред. С.Г. Энтелиса. — М. : Химия, 1968. — 470 с.
9. Ржевский, А.М. // Журнал прикладной спектроскопии [Текст] / А.М. Ржевский, Д.К. Буслов, Н.И. Макаревич. — 1986. — Т. 45, № 2. — С. 257–259.
10. Старостина, И.А. Кислотно-основные взаимодействия и адгезия в металл-полимерных системах [Текст] / И.А. Старостина, О.В. Стоянов. — Казань : КГТУ, 2010. — 194 с.

ИСЛАМОВ Анвар Махмутович, асп.; E-mail: iam16@yandex.ru

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет
ФАХРУТДИНОВА Венера Хафизовна, канд. хим. наук, доц.*

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет
АБДРАХМАНОВА Ляйля Абдулловна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: laa@ksaba.ru*

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет
СТАРОСТИНА Ирина Алексеевна, д-р хим. наук, проф.*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
ЯГУНД Эдуард Михайлович, канд. хим. наук, доц.*

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет
КУЗНЕЦОВА Любовь Михайловна, ст. препод.*

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 04.02.15

Islamov Anvar Makhmutovich, post-graduate student; E-mail: iam16@yandex.ru, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Fakhrutdinova Venera Khafizovna, candidate of chemical sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Abdrakhmanova Lyaylya Abdullowna, doctor of technical sciences, professor; E-mail: laa@ksaba.ru, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Starostina Irina Alekseyevna, doctor of chemical sciences, professor, Kazan National Research Technological University, Russia

Yagund Eduard Mikhailovich, candidate of chemical sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Kuznetsova Lubov Mikhailovna, senior lecturer, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

SURFACE REINFORCEMENT OF PVC BY REACTIVE OLIGOMERS

Presents the results of the diffusion modification PVC by polyisocyanate. By FTIR spectroscopy identified the main products formed during the curing of the polyisocyanate in

the surface layer of the polymer. It was shown that these compounds in PVC leads to enhancement of its surface layer, and polarity change.

Key words: polyvinylchloride, polyisocyanate, semi-interpenetrating networks, free surface energy.

REFERENCES

1. Povstugar, V.I. The structure and surface properties of polymeric materials [Text] / V.I. Povstugar, V.I. Kodolov, S.S. Mikhailova. — M. : Chemistry, 1988. — 192 p.
2. Machyulis, A.N. Diffusion stabilization of polymers [Text] / A.N. Machyulis, E.E. Tornau. — Vilnius : Minthis, 1974. — 256 p.
3. Abdراكhamanova, L.A. Surface modification products of polyvinyl chloride by furan oligomers [Text] / L.A. Abdراكhamanova, V.Kh. Fakhrutdinova, V.G. Khozin // Plasticheskie massi. — 1993. — N 1. — P. 17–18.
4. Islamov, A.M. Surface modification of PVC by epoxy polymer functionalized carbon nanotubes [Text] / A.M. Islamov, V.Kh. Fakhrutdinova, L.A. Abdrukhananova // Izvestiya KazSUAЕ. — 2013. — N 3 (25). — P. 86–92.
5. Fakhrutdinova, V.Kh. Polymeric Composite Materials with the Strengthened Superficial Properties [Text] / V.Kh. Fakhrutdinova, A.M. Islamov, D.G. Ilyukhin, L.A. Abdrukhanova // Journal of Material Science and Engineering. — 2012. — N 5. — P. 385–390.
6. Shutov, F.A. Composite materials based on polyurethanes [Text] / F.A. Shutov; transl. from English; edit. by J.M. Byuist. — M. : Chemistry, 1982. — 240 p.
7. Manin, V.N. Physical-chemical stability of polymeric materials in the field [Text] / V.N. Manin, A.N. Gromov. — L. : Chemistry, 1980. — 248 p.
8. Saunders, J.H. Chemistry polyurethanes [Text] / J.H. Saunders, K.K. Frisch; trans. from English; edit. by S.G. Entelis. — M. : Chemistry, 1968. — 470 p.
9. Rzhevskiy, A.M. // Journal of Applied Spectroscopy [Text] / A.M. Rzhevskiy, D.K. Buslov, N.I. Makarevich. — 1986. — Vol. 45, N 2. — P. 257–259.
10. Starostina, I.A. Acid-base interactions and adhesion to the metal-polymer systems [Text] / I.A. Starostina, O.V. Stoyanov. — Kazan : KSTU, 2010. — 194 p.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.05:658.512.6

Ю.Б. КАЛУГИН, Д.А. ЖАРЫЙ

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ КАЛЕНДАРНЫХ ГРАФИКОВ С ВЕРОЯТНОСТНЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Изложен метод оптимизации по срокам календарных графиков работ.

Впервые установлено, что для календарных графиков с вероятностными временными параметрами процесс оптимизации по срокам, реализуемый до начала выполнения работ, может приводить к увеличению расчетных сроков выполнения проекта.

Реализация предлагаемых подходов позволит еще на стадии планирования определить работы, подлежащие оптимизации, и их временные параметры, что повысит надежность и достоверность календарных планов.

Ключевые слова: календарное планирование и управление проектом, метод критического пути с неопределенными продолжительностями работ, оптимизация календарных графиков по срокам, вероятное время окончания проекта.

Существует ряд подходов и методов оптимизации календарных графиков по срокам [1, 2]: основанных на поиске оптимальной очередности строительства, перераспределении ресурсов с некритических на критические работы, совмещении технологических процессов во времени и др. Все эти методы используют детерминированные временные оценки продолжительностей работ (детерминированные временные параметры).

Исследования, посвященные влиянию случайных факторов на производительность различных технологических процессов [3], показали, что производительность имеет вероятностную природу и подчиняется в основном нормальному или усеченному нормальному законам распределения. Продолжительность выполнения отдельной работы или технологического процесса также имеет случайную природу. Ее распределение близко к нормальному закону и бета-распределению с параметрами $p = 1$ и $q = 2$ [4].

Продолжительность выполнения комплексов работ, особенно в иерархических структурах, хорошо интерпретируется нормальным законом [5–7]. Для расчета вероятностных параметров различных календарных планов разработан и реализован в среде MS Excel универсальный метод [8–10]. Метод основан на последовательной парной композиции равновероятных сроков окончания одной работы с равновероятными сроками

© Калугин Ю.Б., Жарый Д.А., 2015

окончания другой работы при выборе максимального в каждой композиции. Он позволяет определять сроки свершения событий с требуемой вероятностью.

В ходе расчета параметров календарных графиков и сопоставления сроков окончания строительства с директивными сроками обычно возникает необходимость оптимизации этих графиков по срокам (рис. 1, 2).

Сокращение сроков в данном случае предусматривается за счет привлечения дополнительных ресурсов (перераспределения ресурсов с процесса 1) для выполнения процесса 2 на последнем участке.

Очевидно, что в случае детерминированных временных параметров продолжительность комплекса работ сократилась с 10 до 9 дней, или на 10 %.

При воздействии дестабилизирующих факторов продолжительность выполнения отдельной работы (технологического процесса) зависит от уровня воздействия этих факторов (сильного, среднего и слабого). Выполненные исследования [4, 5] показали, что норма времени на выполнение технологического процесса (продолжительность выполнения работ на участке, сменной выработки) будет соответствовать данным, представленным в табл. 1.

Это означает, что для детерминированной оценки продолжительности работы, установленной по производственным нормам t , при слаб-

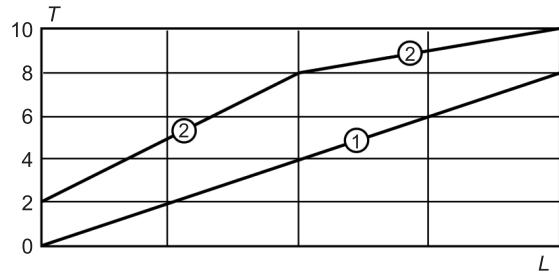


Рис. 1. Циклографмма и сетевая модель до оптимизации

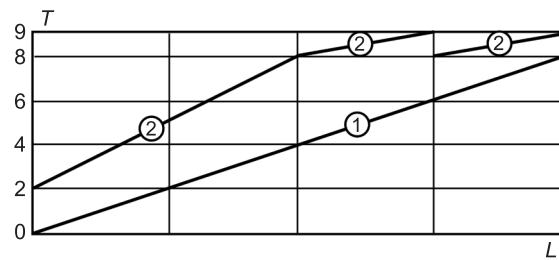


Рис. 2. Циклографмма и сетевая модель после оптимизации

Таблица 1. Равновероятные значения продолжительности работы

Уровни воздействия факторов	Равновероятные значения продолжительности работ для различных уровней воздействия												t_{cp}
Сильный (S)	7,682	4,688	3,664	2,846	2,370	2,005	1,742	1,536	1,360	1,196	1,042	0,866	2,583
Средний (M)	3,415	2,125	1,614	1,363	1,207	1,083	0,987	0,919	0,862	0,813	0,762	0,695	1,324
Слабый (L)	2,594	1,610	1,214	1,014	0,925	0,808	0,738	0,696	0,648	0,617	0,581	0,558	1,000

бом уровне воздействия случайных факторов вероятностные параметры работы будут колебаться в интервале $(0,558-2,594)t$ со средним значением t ; при среднем уровне воздействия — в интервале $(0,695-3,415)t$ со средним значением $1,324t$; при сильном уровне воздействия — в интервале $(0,866-7,682)t$ со средним значением $2,583t$.

С учетом представленных данных для исходного и оптимизированного варианта с помощью универсального метода были рассчитаны вероятностные параметры событий сетевых моделей при слабом воздействии дестабилизирующих факторов (табл. 2, 3).

Так, при расчете вероятностных параметров первоначального графика (см. табл. 2) установлено, что математическое ожидание сроков свершения последнего события составило 11,45, что на 1,45 превышает продолжительность, полученную с помощью детерминированных оценок.

С вероятностью $P(t) = 0,75$ работы завершатся в течение 13,02 дня.

Таблица 2. Вероятностные параметры сроков свершения событий первоначального графика

№	Распределение												МО	$P(t)$ 0,75
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,12	1,16	1,23	1,30	1,39	1,48	1,62	1,85	2,03	2,43	3,22	5,19	2,00	2,23
3	1,12	1,16	1,23	1,30	1,39	1,48	1,62	1,85	2,03	2,43	3,22	5,19	2,00	2,23
4	2,36	2,56	2,72	2,91	3,11	3,32	3,59	3,92	4,43	5,04	6,45	7,60	4,00	4,74
5	2,36	2,56	2,72	2,91	3,11	3,32	3,59	3,92	4,43	5,04	6,45	7,60	4,00	4,74
6	3,72	4,07	4,35	4,63	4,91	5,25	5,66	6,13	6,77	7,78	8,64	10,11	6,00	7,27
7	3,72	4,07	4,35	4,63	4,91	5,25	5,66	6,13	6,77	7,78	8,64	10,11	6,00	7,27
8	5,16	5,66	6,04	6,40	6,81	7,24	7,75	8,38	9,17	9,92	10,94	12,55	8,00	9,55
9	1,12	1,16	1,23	1,30	1,39	1,48	1,62	1,85	2,03	2,43	3,22	5,19	2,00	2,23
10	2,95	3,19	3,40	3,62	3,87	4,16	4,46	4,91	5,47	6,40	7,72	9,88	5,00	5,94
11	3,12	3,50	3,79	4,08	4,44	4,80	5,18	5,94	6,43	7,41	7,72	9,88	5,52	6,92
12	5,21	5,79	6,26	6,70	7,15	7,76	8,31	9,02	9,62	10,62	11,86	14,01	8,52	10,12
13	5,49	6,16	6,72	7,30	7,77	8,36	8,86	9,42	9,98	10,62	11,86	14,01	8,88	10,30
14	6,35	7,08	7,71	8,26	8,80	9,34	9,88	10,43	11,01	11,77	12,94	15,01	9,88	11,39
15	6,84	7,85	8,48	9,09	9,61	10,00	10,60	10,99	11,58	12,42	12,94	15,01	10,45	12,00
16	7,76	8,76	9,44	10,05	10,54	11,05	11,54	12,05	12,68	13,37	14,16	16,01	11,45	13,02

Таблица 3. Вероятностные параметры сроков свершения событий оптимизированного графика

№	Распределение												МО	$P(t) 0,75$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,12	1,16	1,23	1,30	1,39	1,48	1,62	1,85	2,03	2,43	3,22	5,19	2,00	2,23
3	1,12	1,16	1,23	1,30	1,39	1,48	1,62	1,85	2,03	2,43	3,22	5,19	2,00	2,23
4	2,36	2,56	2,72	2,91	3,11	3,32	3,59	3,92	4,43	5,04	6,45	7,60	4,00	4,74
5	2,36	2,56	2,72	2,91	3,11	3,32	3,59	3,92	4,43	5,04	6,45	7,60	4,00	4,74
6	3,72	4,07	4,35	4,63	4,91	5,25	5,66	6,13	6,77	7,78	8,64	10,11	6,00	7,27
7	3,72	4,07	4,35	4,63	4,91	5,25	5,66	6,13	6,77	7,78	8,64	10,11	6,00	7,27
8	5,16	5,66	6,04	6,40	6,81	7,24	7,75	8,38	9,17	9,92	10,94	12,55	8,00	9,55
9	1,12	1,16	1,23	1,30	1,39	1,48	1,62	1,85	2,03	2,43	3,22	5,19	2,00	2,23
10	2,95	3,19	3,40	3,62	3,87	4,16	4,46	4,91	5,47	6,40	7,72	9,88	5,00	5,94
11	3,12	3,50	3,79	4,08	4,44	4,80	5,18	5,94	6,43	7,41	7,72	9,88	5,52	6,92
12	5,21	5,79	6,26	6,70	7,15	7,76	8,31	9,02	9,62	10,62	11,86	14,01	8,52	10,12
13	5,49	6,16	6,72	7,30	7,77	8,36	8,86	9,42	9,98	10,62	11,86	14,01	8,88	10,30
14	6,35	7,08	7,71	8,26	8,80	9,34	9,88	10,43	11,01	11,77	12,94	15,01	9,88	11,39
15	5,16	5,66	6,04	6,40	6,81	7,24	7,75	8,38	9,17	9,92	10,94	12,55	8,00	9,55
16	5,98	6,54	6,96	7,40	7,82	8,29	8,82	9,46	10,17	10,98	12,01	13,59	9,00	10,58
17	7,23	8,16	8,85	9,40	9,98	10,36	10,99	11,39	11,93	12,78	13,54	15,01	10,80	12,36

Плотность распределения сроков свершения события 16 представлена на рис. 3.

При расчете вероятностных параметров оптимизированного графика (см. табл. 3) установлено, что математическое ожидание сроков свершения последнего события составило 10,8, что на 1,8 превышает продолжительность, полученную с помощью детерминированных оценок.

С вероятностью $P(t) = 0,75$ работы завершатся в течение 12,36 дня.



Рис. 3. Гистограмма плотности распределения 12 равновероятных значений сроков свершения события 16

Математическое ожидание срока свершения последнего события снизилось с 11,45 (для исходного варианта) до 10,8 (для оптимизированного), или на 5,7 %.

Плотность распределения сроков свершения события 17 для оптимизированного графика представлена на рис. 4.



Рис. 4. Гистограмма плотности распределения 12 равновероятных значений сроков свершения события 17

«Нормальность» плотности распределения несколько ухудшилась за счет совмещения работ на последнем участке и, следовательно, увеличения плотности максимальных значений ряда.

Вероятностные расчеты по оптимизации 192 различных графиков организации строительства ряда линейно-протяженных объектов для других уровней воздействия случайных факторов показали аналогичные тенденции. Если для детерминированных расчетов величина сокращения сроков выполнения комплекса работ составляет 10–20 % по сравнению с первоначальным графиком, то при использовании вероятностного подхода — 5–10 %.

Однако в нескольких случаях оптимизации и расчета графиков с вероятностными временными параметрами работ были получены парадоксальные результаты.

Оптимизация графиков приводила к увеличению математического ожидания сроков окончания работ. Исследование сущности этого явления представлено ниже.

Пусть цепочка предстоящих работ первоначального календарного графика имеет следующий вид (рис. 5).

После оптимизации путем привлечения дополнительных ресурсов на работу 3–4 первоначальная цепочка работ трансформируется (рис. 6).

Сокращение сроков (с использованием детерминированных оценок) составило 1,5 дня.

Вероятностные расчеты для слабого уровня воздействия дестабилизирующих факторов показали следующее.

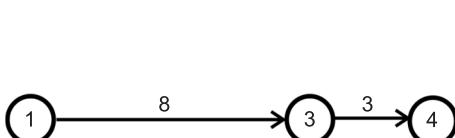


Рис. 5. Цепочка предстоящих работ первоначального календарного графика

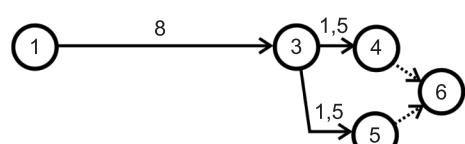


Рис. 6. Цепочка предстоящих работ оптимизированного календарного графика

Если для первоначального графика математическое ожидание срока свершения события 4 составило также 11 дней (с учетом исходных данных табл. 1), то математическое ожидание срока свершения события 6 (окончание работ оптимизированного графика) — 11,72 (табл. 4, 5).

Таблица 4. Вероятностные параметры сроков свершения событий первоначального графика (слабый уровень воздействия)

№	Распределение												МО	$P(t) 0,75$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4,48	4,64	4,96	5,20	5,60	5,92	6,48	7,44	8,08	9,68	12,88	20,72	8,01	8,88
4	6,46	6,97	7,43	7,87	8,36	9,08	9,75	10,61	11,90	13,70	16,27	23,72	11,01	12,80

Таблица 5. Вероятностные параметры сроков свершения событий оптимизированного графика (слабый уровень воздействия)

№	Распределение												МО	$P(t) 0,75$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4,48	4,64	4,96	5,20	5,60	5,92	6,48	7,44	8,08	9,68	12,88	20,72	8,01	8,88
4	5,52	5,92	6,27	6,66	7,05	7,54	8,33	8,96	9,88	11,37	14,38	22,22	9,51	10,62
5	5,52	5,92	6,27	6,66	7,05	7,54	8,33	8,96	9,88	11,37	14,38	22,22	9,51	10,62
6	6,22	6,92	7,50	8,33	8,91	9,58	10,25	11,37	13,38	14,38	21,57	22,22	11,72	13,88

Плотность распределения сроков свершения события 4 для первоначального графика представлена на рис. 7.

Распределение соответствует бета-распределению или нормальному со смещением в сторону минимальных значений продолжительности.

С вероятностью $P(t) = 0,75$ работы завершатся в течение 12,8 дня.

Для оптимизированного графика с вероятностью $P(t) = 0,75$ работы завершатся в течение 13,88 дня.

Анализ плотности распределения сроков свершения события 6 для оптимизированного графика, представленной на рис. 8, показывает ухуд-

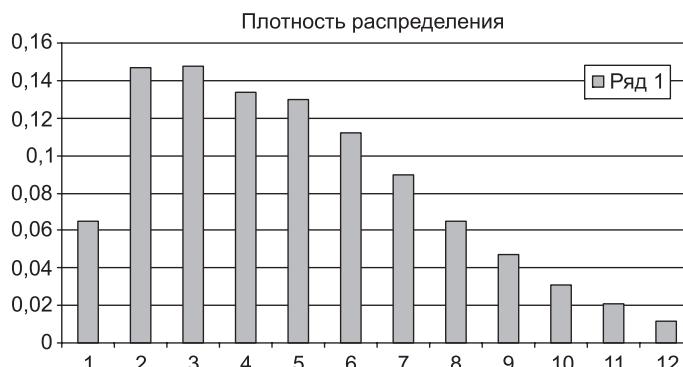


Рис. 7. Гистограмма плотности распределения 12 равновероятных значений сроков свершения события 4 первоначального графика

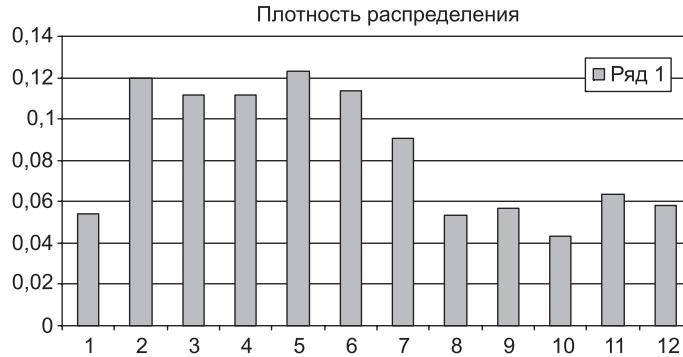


Рис. 8. Гистограмма плотности распределения 12 равновероятных значений сроков свершения события 6 оптимизированного графика

шение «нормальности» и увеличение плотности максимальных значений, что и приводит в конечном итоге к увеличению расчетных сроков.

Это вызвано тем, что при определении вероятностных параметров события 6 сравниваются сроки свершения событий 4 и 5 с выбором максимального в каждой итерации. Сроки же свершения событий 4 и 5 в значительной мере зависят от продолжительностей предшествующих работ и диапазона колебаний этой продолжительности, который в свою очередь будет уменьшаться по мере приближения к оптимизируемым работам (рис. 9).

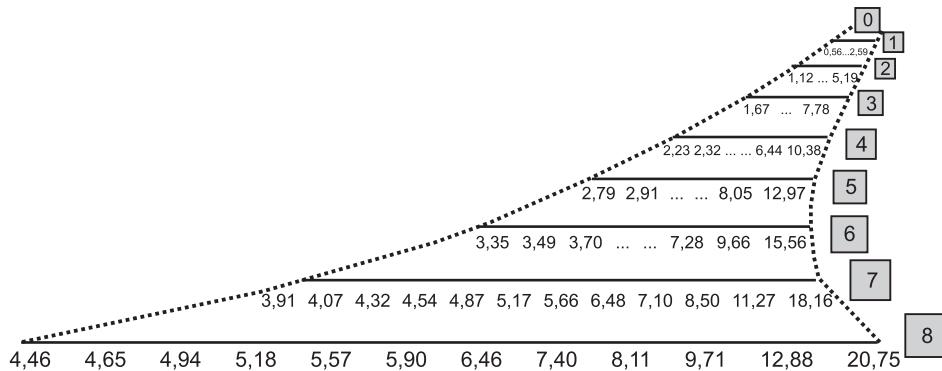


Рис. 9. Изменение вероятностных параметров расчетных сроков окончания предстоящей работы в зависимости от ее продолжительности (слабый уровень воздействия факторов)

Так, на момент времени события 1, когда продолжительность предстоящей работы равна 8 дням, диапазон колебаний сроков свершения события 3 (в соответствии с данными табл. 1 для слабого уровня воздействия) составит от 4,46 до 20,75 дня. При таких параметрах вероятные сроки свершения событий 4 и 5 будут находиться в диапазоне 5,52–22,22, а события 6 — в диапазоне 6,22–22,22 (см. табл. 5).

По мере выполнения работы 1–3 (см. рис. 6) диапазон изменений вероятных сроков сокращается, что позволяет более точно рассчитать ожидаемые вероятностные параметры оптимизируемого графика.

На рис. 10, 11 представлены цепочки работ неоптимизированного и оптимизированного календарных графиков после выполнения части работы 1–3 (с введением события 2).

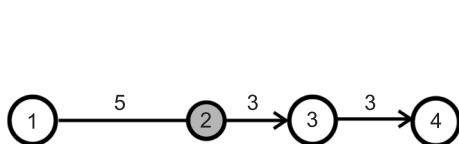


Рис. 10. Цепочка предстоящих работ первоначального календарного графика

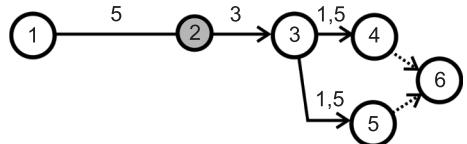


Рис. 11. Цепочка предстоящих работ оптимизированного календарного графика

На момент времени события 2 (за три дня до свершения события 3 по детерминированным оценкам) диапазон вероятных сроков свершения события 3 уже будет изменяться в пределах 1,67–7,78 дня.

Вероятностные расчеты, выполненные на момент времени свершения события 2, представлены в табл. 6, 7. Они показывают, что если математическое ожидание сроков свершения конечного события для неоптимизированного графика составило 6 дней, то для оптимизированного — 5,46 дня.

Таблица 6. Вероятностные параметры сроков свершения событий неоптимизированного графика (с момента времени свершения события 2)

№	Распределение												МО	$P(t) 0,75$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,68	1,74	1,86	1,95	2,10	2,22	2,43	2,79	3,03	3,63	4,83	7,77	3,00	3,33
4	3,55	3,85	4,09	4,39	4,68	4,99	5,38	5,88	6,65	7,56	9,67	11,39	6,01	7,10

Таблица 7. Вероятностные параметры сроков свершения событий оптимизированного графика (с момента времени свершения события 2)

№	Распределение												МО	$P(t) 0,75$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,68	1,74	1,86	1,95	2,10	2,22	2,43	2,79	3,03	3,63	4,83	7,77	3,00	3,33
4	2,66	2,87	3,06	3,24	3,46	3,73	4,01	4,39	4,89	5,75	6,72	9,28	4,50	5,32
5	2,66	2,87	3,06	3,24	3,46	3,73	4,01	4,39	4,89	5,75	6,72	9,28	4,50	5,32
6	3,02	3,39	3,71	4,01	4,36	4,72	5,10	5,75	6,40	6,72	9,07	9,28	5,46	6,56

Плотность распределения сроков свершения события 4 для первоначального графика представлена на рис. 12.

Анализ плотности распределения сроков свершения события 6 для оптимизированного графика, представленной на рис. 13, также показывает ухудшение «нормальности» и увеличение плотности максимальных значений, что вызвано равными временными параметрами событий 4 и 5.

Полученные результаты показывают, что с уменьшением продолжительности работ, предшествующих оптимизируемым, а следовательно, с уменьшением диапазона колебаний их вероятностных параметров обоснованность расчетов по оптимизации календарных графиков существенно возрастает.

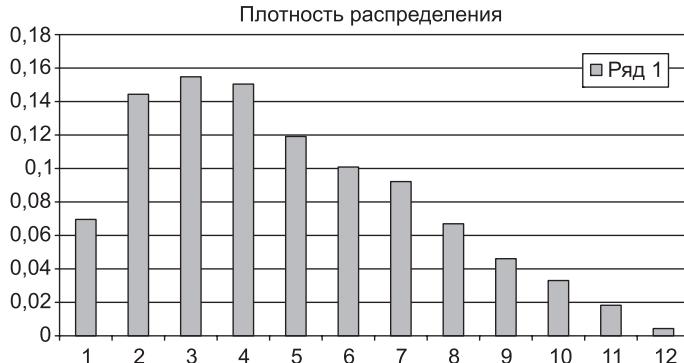


Рис. 12. Гистограмма плотности распределения 12 равновероятных значений сроков свершения события 4 первоначального графика

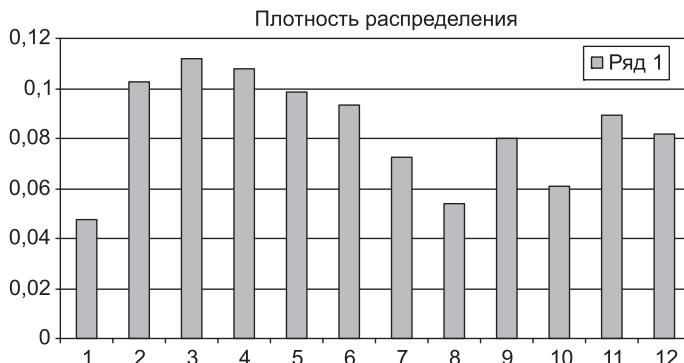


Рис. 13. Гистограмма плотности распределения 12 равновероятных значений сроков свершения события 6 оптимизированного графика

В этих условиях возникает задача выбора сроков планирования возможной оптимизации. Так, на момент времени свершения события 1 (см. рис. 5, 6, 10, 11) возможное сокращение работы 3–4 весьма и весьма проблематично.

Для решения этой задачи необходимо сопоставление сокращения сроков от оптимизации с их возможным увеличением вследствие большого диапазона изменения вероятностных параметров предстоящих работ.

Для двух параллельных работ единичной продолжительности при слабом уровне воздействия (см. табл. 1) смещение математического ожидания составит 26,7 % [11]. Тогда

$$(x + 1,5) \cdot 0,267 = (t_1 - t_2), \quad (1)$$

где t_1 и t_2 — детерминированные оценки продолжительности работ до и после оптимизации (в данном случае 3 и 1,5).

Решение уравнения (1) определит $x = 4,12$. Это означает, что для данного примера вести расчет возможной оптимизации работы 3–4 (см. рис. 5, 6, 10, 11) целесообразно не ранее чем за 4,12 дня до свершения события 3.

В этом случае математическое ожидание срока свершения события 6 составит $(3,88 + 6,85) = 10,73$, что достаточно близко к продолжительности неоптимизированного графика (11 дней).

Точные расчеты с использованием результатов табл. 5 показывают смещение математического ожидания сроков свершения события 6 относительно событий 4 и 5 на 23,2 %.

В этом случае $x = 4,97$ и математическое ожидание сроков свершения события 6 составит 10,94.

В том случае, если вместо работы 3–4 вводятся три параллельных работы с детерминированной продолжительностью каждой один день, выражение (1) приобретет следующий вид:

$$(x+1) \cdot 0,459 = (t_1 - t_2),$$

где 0,459 — смещение математического ожидания для трех параллельных работ единичной продолжительности.

Тогда $x = 3,36$, что означает начало расчетов по возможной оптимизации работы 3–4 не раньше, чем за три дня до свершения события 3.

Представленные расчеты во многом объясняют увеличение вероятных сроков работ для оптимизируемого графика и позволяют обосновать сроки планирования возможной оптимизации.

Выводы. 1. Существующие методы оптимизации календарных графиков по срокам (поиск оптимальной очередности строительства, совмещение работ, перераспределение ресурсов с некритических работ на критические и др.) в основном используют детерминированные временные параметры (продолжительности работ). Исследования, посвященные влиянию дестабилизирующих факторов, показали, что производительность технологических процессов и их продолжительность имеет случайный характер, описываемый нормальным или бета-распределением. Разработанный универсальный метод расчета вероятностных параметров совместных событий календарных планов позволяет определять сроки свершения событий с требуемой вероятностью.

2. Вероятностные расчеты по оптимизации 192 графиков организации строительства линейно-протяженных объектов с вероятностными временными параметрами работ показали в ряде случаев парадоксальные результаты. Оптимизация графиков приводила к увеличению математического ожидания сроков окончания работ. Установлено, что причина этого явления — значительная величина дисперсии и диапазона колебаний вероятных сроков окончания работ, предшествующих оптимизируемым, которые будут уменьшаться по мере приближения к оптимизируемым работам.

3. На основе сопоставления сокращения сроков от оптимизации с их возможным увеличением вследствие большого диапазона изменения вероятностных параметров предстоящих работ установлены зависимости для выбора сроков планирования возможной оптимизации. Таким образом, вероятностные расчеты объясняют парадоксальное явление увеличения вероятных сроков работ для оптимизируемого графика и обосновывают сроки начала планирования возможной оптимизации предшествующих работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев, В.А. Поточная организация строительства [Текст] / В.А. Афанасьев. — Л. : Стройиздат, 1990. — 303 с.

2. Калугин, Ю.Б. Календарное планирование железнодорожного строительства [Текст]: монография / Ю.Б. Калугин. — М. : ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. — 143 с.
3. Калугин, Ю.Б. Моделирование воздействия дестабилизирующих факторов на технологический комплекс [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 7. — С. 93–102.
4. Калугин, Ю.Б. Особенности и сущность расчета вероятностных временных параметров отдельной работы (технологического процесса) [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 8. — С. 104–109.
5. Калугин, Ю.Б. Сущность календарного планирования работ с вероятностными временными параметрами [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 9. — С. 92–106.
6. Калугин, Ю.Б. Прогнозирование сроков реализации проекта с помощью модели квазипараллельных работ [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 3. — С. 45–51.
7. Калугин, Ю.Б. Календарное планирование работ с вероятностными временными параметрами в иерархических структурах [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 30–39.
8. Калугин, Ю.Б. Расчет вероятностных параметров параллельных работ [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 35–42.
9. Калугин, Ю.Б. Расчет календарных планов работ с вероятностными временными параметрами [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 10. — С. 51–59.
10. Калугин, Ю.Б. Универсальный метод оценки сроков выполнения работ с вероятностными временными параметрами [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2015. — № 1. — С. 44–52.
11. Калугин, Ю.Б. Вероятностная структура строительного потока [Текст] / Ю.Б. Калугин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 7. — С. 36–43.

*КАЛУГИН Юрий Борисович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург*

*ЖАРЫЙ Дмитрий Александрович, полковник, адъюнкт кафедры «Восстановление, проектирование и строительство железных дорог»; E-mail: dmitrij.zharyj@yandex.ru
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург*

Получено 24.02.15

Kalugin Yury Borisovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru, Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg, Russia

Zharyj Dmitriy Alexandrovich, colonel, a post-graduate student of the department «Restoration, design and construction of the Railroads»; E-mail: dmitrij.zharyj@yandex.ru, Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg, Russia

FEATURES OF OPTIMIZATION OF NETWORKS WITH IMPRECISE DURATIONS

The optimization method of networks is stated.

It is for the first time established that for networks with inexact durations the process optimization executed prior to work can lead to increase in terms of the project.

Realization of the offered approaches will allow to define the works which are subject to optimization, and their temporary parameters that will increase reliability and reliability of planned schedules at a stage of planning.

Key words: scheduling and management of the project, a method of a critical way with uncertain durations of works, optimization of schedule diagrams on terms, probable time of the termination of the project.

REFERENCES

1. Afanasyev, V.A. Organization of flow works [Text] / V.A. Afanasyev. — L. : Stroyizdat, 1990. — 303 p.
2. Kalugin, Yu.B. Scheduling of railway construction [Text]: monograph / Yu.B. Kalugin. — M. : FGOU «The Educational and Methodical Center by Training on Railway Transport», 2010. — 143 p.
3. Kalugin, Yu.B. Modeling of destabilizing factors of the technological complex [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 7. — P. 93–102.
4. Kalugin, Yu.B. Features and essence of calculation of probabilistic temporary parameters for work (technological process) [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Education Institutions. Construction. — 2013. — N. 8. — P. 104–109.
5. Kalugin, Yu.B. Essence of scheduling of works with probabilistic temporary parameters [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 9. — P. 92–106.
6. Kalugin, Yu.B. Predicting the timing of the project with the help of a model quasi-parallel processes [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 3. — P. 45–51.
7. Kalugin, Yu.B. Planning of works with probabilistic temporary parameters in hierarchical structures [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 10. — P. 30–39.
8. Kalugin, Yu.B. Calculation of probabilistic parameters of parallel processes [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 35–42.
9. Kalugin, Yu.B. Calculations of the schedules of works with probabilistic temporary parameters [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 10. — P. 51–59.
10. Kalugin, Yu.B. Universal method of computing finish time for networks with imprecise durations [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2015. — N 1. — P. 44–52.
11. Kalugin, Yu.B. Probabilistic structure of the flow of works [Text] / Yu.B. Kalugin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 7. — P. 36–43.

УДК 691.002:338.45

С.В. ФЕДОСОВ, Н.А. ГРУЗИНЦЕВА, М.А. ЛЫСОВА, Б.Н. ГУСЕВ

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА
КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ПРЕДПРИЯТИЯ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ***

Предложена методика по оценке конкурентных преимуществ предприятия по производству строительных материалов. Выделены внешние и внутренние факторы, определяющие конкурентные преимущества предприятия, где в дальнейшем сделан акцент на внутренние факторы. Приводится алгоритм методики и результаты расчетов комплексной (обобщенной) оценки конкурентных преимуществ родственных предприятий как по шкале отношений, так и по шкале порядка.

Ключевые слова: эксперт, оценка, конкурентное преимущество, внутренние факторы, комплексный показатель.

В современных экономических условиях с учетом ограничений, введенных против России рядом зарубежных стран, для отечественных производителей строительных материалов актуальной является задача повышения конкурентоспособности как самого предприятия, так и выпускаемой им продукции [1].

Для решения данной проблемы необходимо выделить основное эффективное направление, а именно повысить конкурентные преимущества самого предприятия, для чего необходимо разработать методику по количественной оценке конкурентных преимуществ предприятия по производству строительных материалов (см. рисунок) [2].

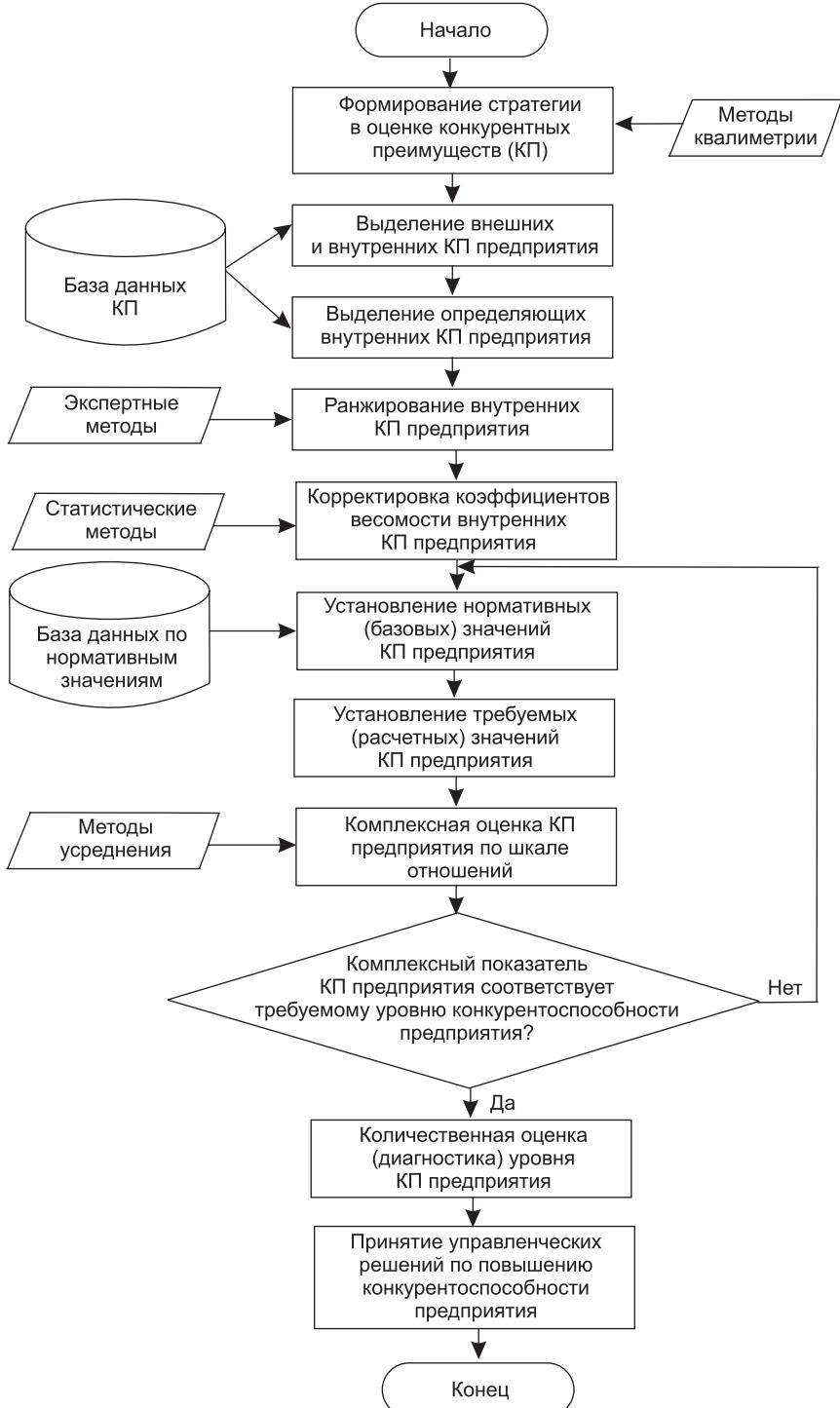
Базовым объектом исследования было выбрано предприятие ООО «НИПРОМТЕКС» (г. Железногорск Курской обл.), которое является крупным производителем геотекстильных материалов, используемых в дорожном строительстве.

На первом этапе исследования был сформирован алгоритм комплексной оценки конкурентных преимуществ (КОКП), на основании которого была произведена оценка конкурентоспособности исследуемого предприятия.

При формировании комплексной оценки необходимо предварительно выделить факторы, определяющие конкурентные преимущества предприятия.

Согласно [3], факторы конкурентного преимущества предприятия можно подразделить на внешние (проявление которых незначительно зависит от самого предприятия) и внутренние (которые почти целиком определяются руководством предприятия). В соответствии с целью работы конкурентные преимущества (КП) определяем с учетом только внутренних факторов предприятия, к которым относили организацию производства, кадровое обеспечение, сбытовую и финансовую политику [4].

* Статья подготовлена в рамках выполнения проектной части госзадания № 11.1898.2014/К Минобрнауки России.



Алгоритм комплексной оценки конкурентных преимуществ предприятия

В дальнейшем с использованием экспертного метода [5] определяли весомость основных групп внутренних факторов, а затем отдельно в каждой группе внутренних факторов дополнительно осуществляли ранжирование показателей конкурентного преимущества.

Оценка конкурентоспособности предприятия ООО «НИПРОМТЕКС» осуществлялась путем сравнения конкурентных преимуществ аналогичных предприятий (ООО «ПОШ-Волокно», г. Энгельс Саратовской обл.; ООО «СИБУР-Геотекстиль», г. Сургут; ОАО «Челябнетма» и ЗАО «Втор-Ком», г. Челябинск), выпускающих геотекстильные материалы для дорожного строительства. В качестве исходной информации для комплексной оценки конкурентных преимуществ использовались данные, опубликованные на официальных сайтах предприятий-конкурентов.

В результате проведенного анализа выявлены наиболее распространенные конкурентные преимущества предприятий: наличие собственного производства; резервные производственные мощности; широкий ассортимент выпускаемой продукции; высокое качество продукции; эффективно действующее СМК на предприятии; деятельность по сертификации готовой продукции; регулярное обучение, семинары для персонала предприятия; известность (репутация) предприятия на рынке; открытие представительств предприятия в регионах РФ; предоставление заказчикам продукции логистических услуг; наличие готовой продукции на складе и гибкая ценовая политика.

При оценке конкурентных преимуществ по каждому показателю применялась балльная шкала оценок (от 1 до 5, при этом 5 — максимально возможный результат).

Комплексная оценка конкурентных преимуществ (КОКП) предприятия формировалась с использованием арифметического способа усреднения по предлагаемой формуле, которая является усовершенствованным выражением [6] и дополнительно включает поэтапное ранжирование в каждой группе внутренних факторов конкурентных преимуществ:

$$\text{КОКП} = \frac{1}{5m} \left[\sum_{k=1}^s \left(\sum_{i=m_k+1}^{m_k+n_k} \left(\sum_{j=1}^m \Theta_{ij} \right) \cdot \beta_i \right) \cdot \gamma_k \right],$$

где m — число экспертов;

Θ_{ij} — оценка по пятибалльной шкале j -м экспертом i -го конкурентного преимущества предприятия;

β_i — коэффициент весомости i -го конкурентного преимущества предприятия;

γ_k — коэффициент весомости k -й группы конкурентных преимуществ предприятия;

s — количество групп конкурентных преимуществ предприятия;

n_k — количество показателей в k -й группе;

m_k — сумма показателей в k -й и предшествующих группах, причем

$$m_1 = 0, \quad m_k = \sum_{r=1}^{k-1} n_r \quad \text{для } k = \overline{2, s}.$$

В данном исследовании при определении КОКП приняли участие 9 экспертов, которые являются ведущими специалистами в области оценки конкурентоспособности предприятий. Итоговая суммарная оценка экспертов и результаты расчетов по каждому показателю КОКП представлены в таблице.

Результаты комплексной оценки конкурентных преимуществ предприятий по производству строительных материалов

Показатели	Значимость	Оценка показателей				
		ООО «НИИПРОМТЕКС»	ООО «ПОШ-Волокно»	ООО «СИБУР-Геотекстиль»	ОАО «Челябнетма»	ЗАО «Втор-Ком»
<i>Организация производства</i>	0,20					
Наличие собственного производства	0,32	39	43	42	43	40
Производственные мощности	0,23	42	30	40	30	35
Ассортимент выпускаемой продукции	0,14	30	32	27	32	43
Качество продукции	0,17	42	39	39	39	42
Внедрение СМК на предприятии	0,06	40	18	18	18	18
Сертификация готовой продукции	0,08	39	37	39	37	44
<i>Кадровое обеспечение</i>	0,20					
Обучение, семинары для персонала предприятия	1,00	38	34	35	34	40
<i>Сбытовая политика</i>	0,35					
Известность (репутация) предприятия на рынке	0,29	39	39	37	39	37
Представительства предприятия в регионах РФ	0,24	37	26	38	26	18
Предоставление заказчикам продукции логистических услуг	0,21	39	38	39	38	35
Наличие готовой продукции на складе	0,26	40	43	44	43	42
<i>Финансовая политика</i>	0,25					
Гибкая ценовая политика	1,00	35	36	37	36	40
<i>Комплексная оценка конкурентных преимуществ</i>		0,84	0,79	0,81	0,79	0,84

При необходимости можно перейти из шкалы отношений к шкале порядка и ввести соответствующие уровни комплексного (обобщенного) показателя конкурентных преимуществ, например, в варианте: 0,91...1,0 — уровень «высокий»; 0,86—0,90 — «приемлемый»; 0,61—0,85 — «средний»; 0,1—0,60 — «низкий» [3].

Выводы. 1. Предлагаемая авторами методика оценки конкурентного преимущества предприятия по производству строительных материалов (геотекстильных полотен) позволяет объективно оценить его конкурентоспособность с учетом влияния различных факторов.

2. Для обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции необходима дальнейшая разработка методик по проектированию и количественному оцениванию качества геотекстильных полотен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Грабовы й, П.Г. Риски в современном бизнесе [Текст] / П.Г. Грабовы й, С.Н. Петрова, С.И. Полтавцев и др. — М. : Аланс, 1994. — 200 с.

2. Резник, С.Д. Персональный менеджмент [Текст]: учебник / С.Д. Резник, Ф.Е. Удалов и др. — Пенза : ПГАСА, 2000. — 546 с.
3. Гусев, Б.Н. Проектирование конкурентоспособности тканых полотен [Текст] / Б.Н. Гусев, Н.А. Грузинцева, М.А. Сташева. — Иваново : ИГТА, 2007. — 172 с.
4. Грузинцева, Н.А. Методика оценки конкурентоспособности ткани [Текст] / Н.А. Грузинцева, М.А. Сташева, Б.Н. Гусев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. — 2002. — № 6. — С. 3–5.
5. Бурцева, Т.А. Методологические основы выбора маркетинговых стратегий предприятия на основе экспертных оценок [Текст] / Т.А. Бурцева, Н.Н. Катаева, С.Н. Ворожцов // Маркетинг в России и за рубежом. — 2008. — № 4. — С. 32–42.
6. Фатхутдинов, Р.А. Конкурентоспособность организации в условиях кризиса: экономика, маркетинг, менеджмент [Текст] / Р.А. Фатхутдинов. — М. : Маркетинг, 2002. — 892 с.

ФЕДОСОВ Сергей Викторович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.; E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Ивановский государственный политехнический университет

ГРУЗИНЦЕВА Наталья Александровна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: gruzincevan@mail.ru

Ивановский государственный политехнический университет

ЛЫСОВА Марина Александровна, канд. техн. наук; E-mail: lysova7@yandex.ru

Ивановский государственный политехнический университет

ГУСЕВ Борис Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mtsm@ivgpu.com

Ивановский государственный политехнический университет

Получено 13.02.15

Fedosov Sergey Viktorovich, academician RAACS, doctor of technical sciences, professor; E-mail: fedosov-academic53@mail.ru, Ivanovo State Polytechnic University, Russia

Gruzintseva Natalia Alexandrovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: gruzincevan@mail.ru, Ivanovo State Polytechnic University, Russia

Lysova Marina Alexandrovna, candidate of technical sciences; E-mail: lysova7@yandex.ru, Ivanovo State Polytechnic University, Russia

Gusev Boris Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mtsm@ivgpu.com, Ivanovo State Polytechnic University, Russia

COMPLEX ESTIMATION OF THE COMPETITIVE ADVANTAGES OF ENTERPRISES FOR MANUFACTURE OF BUILDING MATERIALS

In this paper a method is suggested to estimate the competitive advantages of enterprises engaged in manufacture of building materials. External and internal factors have been established determining the competitive advantages of enterprises, with the internal factors being specifically emphasized. The algorithm of the method is formulated and the results are given of calculating the complex (overall) estimation of the competitive advantages of the related enterprises both on the ratio scale and the order scale.

Key words: expert, valuation, competitive advantage, internal factors, a comprehensive index.

REFERENCES

1. Graboviy, P.G. Risks in business today [Text] / P.G. Graboviy, S.N. Petrova, S.I. Poltavtsev and others. — M. : Alans, 1994. — 200 p.

2. Reznik, S.D. Personal Management [Text]: textbook / S.D. Resnik, F.E. Udalov and others. — Penza : PSUAE, 2000. — 546 p.
 3. Gusev, B.N. Design competitiveness woven cloths [Text] / B.N. Gusev, N.A. Gruzintseva, M.A. Stasheva. — Ivanovo : ISTA, 2007. — 172 p.
 4. Gruzintseva, N.A. Methods of assessing the competitiveness of the tissue [Text] / N.A. Gruzintseva, M.A. Stasheva, B.N. Gusev // News of Higher Educational Institutions. Technology of textile industry. — 2002. — N 6. — P. 3–5.
 5. Burtseva, T.A. Methodological basis of the choice of the marketing strategies of enterprises on the basis of expert estimates [Text] / T.A. Burtseva, N.N. Kataeva, S.N. Vorozhtsov // Marketing in Russia and abroad. — 2008. — N 4. — P. 32–42.
 6. Fatkhutdinov, R.A. The competitiveness of the organization in crisis: Economics, marketing, management [Text] / R.A. Fatkhutdinov. — M. : Marketing, 2002. — 892 p.
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.52/53.001.24

М.И. ШИЛЯЕВ, Е.М. ХРОМОВА, А.Р. БОГОМОЛОВ, С.Н. ШИРОКОВА

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ АБСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ В ФОРСУНОЧНЫХ СКРУББЕРАХ НА ХЕМОСОРБЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ*

Проводятся доказательства возможности использования абсорбционной модели для хемосорбционных процессов, реализуемых в форсуночных скрубберах, с предварительным экспериментальным определением констант фазового равновесия конкретных пар абсорбент-абсорбат в рамках решения обратной задачи уравнений абсорбционной модели.

Ключевые слова: форсуночные скруббера, абсорбция, хемосорбция, математическое моделирование.

1. Постановка задачи. Математическая модель абсорбционной очистки газов от вредных газовых компонентов (далее абсорбционная математическая модель — АММ), разработанная в [1, 2], может быть адаптирована на хемосорбционные процессы. В рамках решения обратной задачи уравнений АММ по экспериментальным значениям входных и выходных параметров очищаемого газового потока в газоочистном аппарате определяются эффективные коэффициенты фазового равновесия для пары абсорбент — абсорбат для процесса хемосорбции. При найденных эффективных коэффициентах равновесия, зависящих от температуры и концентрации хемосорбционных добавок в водном растворе абсорбента, представляется возможность проводить оптимизацию режимных и геометрических параметров газоочистных установок на основе решения прямой задачи. На первом этапе исследований была использована АММ для пенных аппаратов (ПА) [2, 3], с помощью которой проведена тестовая проверка самой идеи на экспериментальных данных [4] хемосорбционного процесса, реализующегося в барботажной колонне при извлечении SO_2 на водный раствор NH_4HCO_3 . Сравнение опытных и расчетных результатов извлечения SO_2 подтвердило правильность постановки задачи в целом. Оценка расходных параметров очищаемых газов от SO_x и NO_x на ТЭС затрудняет использование ПА в качестве основных промышленных газоочистных устройств в силу их прежде всего ограниченности по объему пропускаемых газов, а также громоздкости и сложности обслуживания форсуночного хозяйства. Для этих целей наиболее подходящими являются скруббера Вентури (СВ), широко используемые на ТЭС как газоочистители от пыли и вредных газовых компонентов одновременно, эффективность и экономичность очистки газов в них может быть существенно повышена за счет оптимизации этого комплексного процесса с помощью математического моделирования. Скорости газов в горловине трубы Вентури (ТВ) могут достигать 200–300 м/с.

* Статья выполнена в рамках соглашения № 14.583.21.0004 ФЦП.

На втором этапе исследований была поставлена задача адаптировать АММ для форсуночных скрубберов и, в частности, для СВ для хемосорбционного процесса в рамках решения обратной задачи по нахождению коэффициентов фазового равновесия, отрабатывая алгоритм на верифицированных расчетах в [1, 2] абсорбционного процесса извлечения SO₂ на воду.

Значение коэффициента фазового равновесия в рамках поставленной обратной задачи определяется как решение уравнения

$$\eta(m_{px}) = \eta_{\text{эксп}},$$

где m_{px} — коэффициент фазового равновесия;

$\eta_{\text{эксп}}$ — экспериментальное значение эффективности извлечения целевого газового компонента.

Значение функции $\eta(m_{px})$ при заданном значении аргумента m_{px} находится из решения обыкновенных дифференциальных уравнений АММ для форсуночных скрубберов. В качестве такого устройства была выбрана модель трубы Вентури (ТВ) со следующими параметрами: диаметр горловины ТВ $d_r = 0,02$ м, длина диффузора $l = 0,2$ м, угол раствора диффузора $\alpha = 6^\circ$. Параметры конфузорной части не имеют значения для расчетов. Эти параметры заложены в экспериментальную установку со скоростью воздуха в горловине ТВ 80–100 м/с. Алгоритм численного решения вышеприведенного уравнения складывается из следующих шагов:

- 1) исходя из произвольно заданного начального приближения m_{px}^0 , методом проб определяется интервал изоляции корня уравнения $[m_{px}^{\text{лев}}, m_{px}^{\text{прав}}]$;
- 2) методом половинного деления с заданной точностью ε находится корень m_{px} ;
- 3) критерием завершения расчета служит выполнение неравенства

$$\frac{m_{px}^{\text{прав}} - m_{px}^{\text{лев}}}{m_{px}^{\text{прав}} + m_{px}^{\text{лев}}} < \varepsilon. \quad (1)$$

Для проверки работоспособности алгоритма были выполнены расчеты с использованием в качестве $\eta_{\text{эксп}}$ теоретических значений, полученных в результате решения прямой задачи с заданной зависимостью m_{px} (для SO₂) от температуры [2]:

$$m_{px} = 2976,58T^2 - 1594158T + 215090898, \text{ Па.} \quad (2)$$

Решение обратной задачи (определение эффективного значения m_{px}) проводилось при $\varepsilon = 10^{-5}$. Сопоставление полученных из решения обратной задачи значений m_{px} с зависимостями, использовавшимися при решении прямой задачи, подтвердили работоспособность алгоритма. При этом проведены расчеты прямой задачи с полученными значениями m_{px} и с табличными данными, отличия в результатах расчетов термодинамических параметров парогазового потока на всем протяжении диффузора ТВ, а также в концентрациях растворяющегося при абсорбции SO₂ в каплях диспергированной воды не обнаружено.

2. Результаты расчетов. Численная реализация алгоритма решения обратной задачи АММ, сформулированной в п. 1, осуществлялась при следующих граничных условиях для трубы Вентури (ТВ) на входе в диффузор (в горловине трубы):

— коэффициент орошения q , м³/м³ — 0,015;

- начальная скорость капель V_{k0} , м/с — 4,0;
- начальный размер капель d_{k0} , мкм — 136,83 (вычислялся по формуле Нукиямы—Танасавы, приведенной в [1, 2]);
- начальная температура капель T_{k0} , К — 333;
- начальная скорость парогазового потока U_0 , м/с — 80;
- начальная концентрация SO_2 d_{10} , кг/кг сух. воздуха — 0,1;
- начальное влагосодержание d_{n0} , кг/кг сух. воздуха — 0,2;
- диаметр горловины ТВ, м — 0,02;
- длина диффузора l , м — 0,2;
- угол раствора диффузора, град. — 6;
- концентрация SO_2 в капле $c_{k1,0}$, кг/кг воды — 0;
- концентрация частиц пыли в потоке C , г/м³ — 0.

На выходе из диффузора трубы (по решению прямой задачи при аппроксимационной зависимости табличных данных для m_{px} (для SO_2)) давалось расчетное значение эффективности извлечения SO_2 на капли воды, в данном случае $\eta_{\text{SO}_2} = 0,13491$.

В соответствии с изложенным в п. 1 алгоритмом расчета найдено эффективное значение $(m_{px})_{\text{эф}} = 2278087,616$ Па для данного варианта на всю длину диффузора, который меняется по длине при решении прямой задачи от $1,9570 \cdot 10^6$ до $2,2911 \cdot 10^6$ Па (рис. 1).

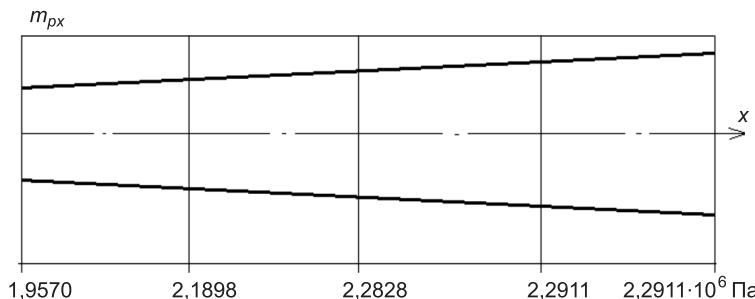


Рис. 1. Изменение m_{px} для SO_2 по длине диффузора трубы Вентури

На рис. 2, 3 приведены результаты численного решения прямой задачи при табличных значениях m_{px} и эффективном значении $(m_{px})_{\text{эф}}$ по извлечению SO_2 на воду в трубе Вентури. Как видно из рис. 2, 3, результаты расчетов практически не отличаются. При этом значение эффективности извлечения SO_2 при заданных условиях получается тем же: $\eta = 0,13491$.

3. Обоснование правомерности использования законов Генри и Вант-Гоффа для хемосорбционного процесса. В [5] отмечается: «При хемосорбции (абсорбция, сопровождаемая химической реакцией) абсорбируемый компонент связывается в жидкой фазе в виде химического соединения. При необратимой реакции равновесное давление компонента над раствором ничтожно мало и возможно полное его поглощение. При обратимой реакции над раствором существует заметное давление компонента, хотя и меньшее, чем при физической абсорбции».

Изотерма адсорбции Ленгмюра имеет вид [6]

$$A = A_\infty \frac{K_p P}{1 + K_p P}, \quad (3)$$

где A — величина адсорбции;

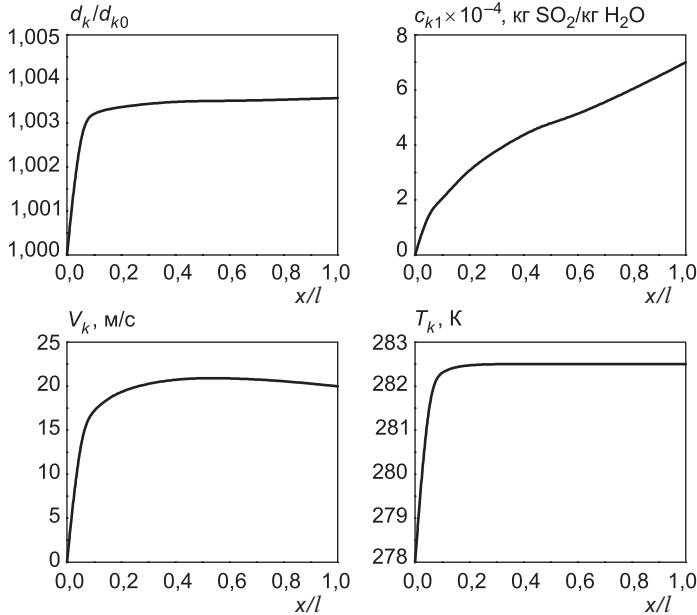


Рис. 2. Решение прямой задачи при табличных значениях $m_{px}(T)$ для SO_2

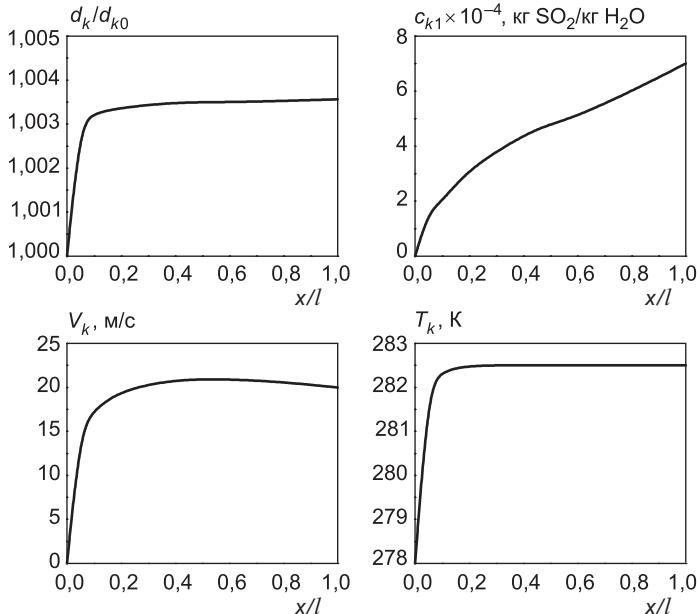


Рис. 3. Решение прямой задачи при $(m_{px})_{\phi} = 2,278087616 \cdot 10^6$ Па

A_∞ — емкость абсорбционного монослоя или число абсорбционных центров, приходящихся на единицу площади поверхности или на единицу массы адсорбента;

K_p — константа адсорбционного равновесия, чем сильнее взаимодействие адсорбата с адсорбентом, тем больше константа абсорбционного равновесия;

P — парциальное давление газов и паров на границе раздела фаз.

При малых концентрациях или давлениях изотерма Ленгмюра переходит в закон Генри:

$$P = \frac{1}{K_p} \frac{A}{A_\infty}, \quad (4)$$

где $\frac{1}{K_p}$ — есть аналог коэффициента равновесия m_{px} для физической

абсорбции [5], а A/A_∞ соответствует мольной доле газового компонента по отношению к общему количеству вещества в жидкой фазе.

Тепловой эффект абсорбции определяется на основе известного уравнения Вант-Гоффа [6]. Однако здесь же замечается, что для хемосорбционного процесса этот эффект может быть на порядок большим, вместо 10–40 кДж/моль для физической адсорбции он может составлять для хемосорбции 40–400 кДж/моль. С целью выяснения влияния этого фактора на термодинамический процесс в целом и на абсорбционно-конденсационную газоочистку были проведены расчеты с повышенным тепловым эффектом в 10 раз и с обычным, вычисляемым по уравнению [5]:

$$r_i = \frac{RT^2}{M_i} \frac{d \ln m_{px,i}}{dT}, \text{ кДж/кг}, \quad (5)$$

где $R = 8,314$ кДж/кмоль · К — универсальная газовая постоянная; M_i — молекулярная масса i -го газового компонента.

Расчеты проводились для скруббера Вентури с параметрами трубы Вентури:

- длина диффузора l , м — 10;
- диаметр горловины D , м — 1,0;
- угол раствора диффузора, град. — 7;
- коэффициент орошения q , м³/м³ — 0,015;
- скорость капель в горловине ТВ V_{k0} , м/с — 4,0;
- начальная температура капель T_{k0} , К — 278;
- скорость парогазового потока в горловине ТВ U_0 , м/с — 62,1;
- влагосодержание d_{n0} , кг/кг сух. воздуха — 0,1;
- концентрация SO₂ d_{SO_2} , кг/кг сух. воздуха — 0,1; 0,5;
- входная концентрация пыли C_0 , г/м³ — 3,25;
- размер частиц пыли δ_0 , мкм — 0,1;
- температура парогазового потока в горловине ТВ T_{00} , К — 393; 1473.

Результаты сведены в таблицу. Тепловой эффект, увеличенный в 10 раз, на абсорбционный процесс проявляется незначительно, на конденсационное улавливание пыли влияет сильнее, но в обоих случаях со снижением газосодержания (в данном случае d_{SO_2}) эти проявления становятся заметно слабее.

Результаты расчета эффективностей газо-и пылеочистки в СВ

№ п/п	d_{n0} , кг/кг	T_{00} , К	η_{SO_2} , %, при r_i	η_{SO_2} , %, при $10r_i$	$\Delta\eta_{SO_2}$, %	η_h , %, при r_i	η_h , %, при $10r_i$	$\Delta\eta_h$, %
1	0,1	393	57,455	56,239	1,216	35,325	40,757	5,432
2		1473	81,952	82,811	0,859	61,55	66,489	4,939
3	0,05	1473	83,202	82,581	0,621	65,263	65,526	0,263

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что предлагаемая адаптация абсорбционной модели в форсуночных скрубберах на процессы хемосорбции для практических расчетов имеет все основания как с точки зрения применения закона Генри для равновесных параметров на границе раздела фаз, так и с точки зрения использования теплового эффекта абсорбции в форме уравнения (5).

Следует отметить, что в случае расчетов варианта 3 (см. таблицу) поведение и количественные значения всех термодинамических параметров (размеров капель, «образований» — частиц пыли с конденсатом на поверхности, температур капель, «образований», парогазового потока, концентраций SO_2 в каплях и конденсате «образований», распределений потоков частиц пыли) незаметно отличаются друг от друга при r_i и $10 r_i$.

Это обстоятельство обосновывает возможность разработанную абсорбционную модель [1, 2] использовать для получения коэффициентов равновесия и для хемосорбционного процесса с помощью решения обратной задачи по опытным значениям концентраций целевого газового компонента и других теплофизических параметров на входе и выходе из экспериментальной установки. Алгоритм расчета и его проверка представлены выше.

Выводы. Предложенный алгоритм решения обратной задачи АММ на примере абсорбционного извлечения SO_2 на воду в модельной трубе Вентури численно оправдался и может служить для экспериментального определения неизвестных коэффициентов фазового равновесия m_{px} процесса абсорбции для любых пар абсорбент — абсорбат в лабораторных условиях. Есть основание полагать, что этот алгоритм может быть formalизован и для определения эффективных коэффициентов равновесия хемосорбционных процессов также для любых пар абсорбент — абсорбат при задании на выходе из диффузора ТВ экспериментальных значений эффективности извлечения целевого компонента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shilyaev, M.I. Modeling of heat and mass transfer and absorption-condensation dust and gas cleaning in jet scrubbers [Текст] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova // Mass Transfer — Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling, Edited by Hironori Nakajima. — Vienna, Austria : In Tech, 2013. — P. 163–194.
2. Шиляев, М.И. Контактный тепло- и массообмен в форсуночных и барботажных аппаратах. Моделирование, оптимизация тепломассообмена и абсорбционно-конденсационной пылегазоочистки [Текст] / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова, А.В. Толстых. — Германия : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. — 273 с.
3. Шиляев, М.И. Моделирование процессов абсорбции газов в барботажных аппаратах [Текст] / М.И. Шиляев, А.В. Толстых // Теплофизика и аэромеханика. — 2013. — Т. 20, № 3. — С. 575–587.
4. Xiaolei, Li. Mass transfer of SO_2 absorption with an instantaneous chemical reaction in a bubble column [Текст] / Li Xiaolei, Zhu Chunying, Lu Sumin, Ma Younguang // Brazilian Journal of Chemical Engineering. — 2013. — Vol. 30, № 03. — P. 551–562.
5. Рамм, В.М. Абсорбция газов [Текст] / В.М. Рамм. — М. : Изд-во «Химия», 1976. — 655 с.
6. Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии (Поверхностные явления и дисперсные системы) [Текст] / Ю.Г. Фролов. — М. : Химия, 1982. — 400 с.

*ШИЛЯЕВ Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ХРОМОВА Елена Михайловна, канд. физ.-мат. наук, доц.
Томский государственный архитектурно-строительный университет
БОГОМОЛОВ Александр Романович, д-р техн. наук, проф.
Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово
ШИРОКОВА Светлана Николаевна, асп.
Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 13.02.15

Shilyaev Mikhail Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Khromova Elena Mikhaylovna, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Bogomolov Alexander Romanovich, doctor of technical sciences, professor, Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Shirokova Svetlana Nikolaevna, post-graduate student, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

ADAPTATION OF THE MODEL OF ABSORPTION GAS TREATMENT IN THE NOZZLE SCRUBBERS FOR CHEMISORPTION PROCESSES

Validation is given to prove the possibility of using an absorption model for chemisorption processes implemented in the nozzle scrubbers, with preliminary experimental determination of phase equilibrium constants of specific pairs of absorbent-absorbate within the inversion equations absorption model.

Key words: nozzle scrubbers, absorption, chemisorption, mathematical modeling.

REFERENCES

1. Shilyaev, M.I. Modeling of heat and mass transfer and absorption-condensation dust and gas cleaning in jet scrubbers [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova // Mass Transfer — Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling, Edited by Hironori Nakajima. — Vienna, Austria : In Tech, 2013. — P. 163–194.
2. Shilyaev, M.I. Contact heat and mass transfer in the nozzle and bubble-agitated liquid coolers. Modeling, optimization of heat and mass transfer and absorption-condensing gas treatment [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova, A.V. Tolstykh. — Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. — 273 p.
3. Shilyaev, M.I. Modeling of gases adsorption in bubble-agitated liquid coolers [Text] / M.I. Shilyaev, A.V. Tolstykh // Thermophysics and Aeromechanics. — 2013. — Vol. 20, N 3. — P. 575–587.
4. Xiaolei, Li. Mass transfer of SO₂ absorption with an instantaneous chemical reaction in a bubble column [Text] / Li Xiaolei, Zhu Chunying, Lu Sumin, Ma Younguang // Brazilian Journal of Chemical Engineering. — 2013. — Vol. 30, N 03. — P. 551–562.
5. Ramm, V.M. Absorption of gases [Text] / V.M. Ramm. — M. : Publishing house «Chemistry», 1976. — 655 p.
6. Frolov, Yu.G. Course of Colloid Chemistry (Surface phenomena and disperse systems) [Text] / Yu.G. Frolov. — M. : Chemistry, 1982. — 400 p.

УДК 697.441.722

Т.Л. РОХЛЕЦОВА, Е.Г. САВЕЛЬЕВ, Л.А. КИЯНИЦА

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЭТАЖНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ КВАРТИРНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ

Рассмотрен вопрос применения поэтажных коллекторов поквартирных систем отопления: возможное количество подключаемых квартир и использование различных материалов при изготовлении.

Ключевые слова: поквартирные системы отопления, поэтажный (поквартирный) коллектор.

Согласно [1, приложение Д], в многоквартирных жилых домах рекомендуется применение поквартирных систем отопления (ПКСО) с радиаторами или конвекторами. Конструирование ПКСО имеет свои особенности. Каждый элемент ПКСО обладает свойствами как традиционной системы отопления, так и специфическими. Эти черты во взаимосвязи требуют особых подходов к конструированию ПКСО.

ПКСО подключаются к разводящим стоякам через поэтажный коллектор и индивидуальные узлы ввода, включающие весь набор трубопроводной арматуры, регулирующих и измерительных устройств (рис. 1 [2]).

Поэтажный коллектор и индивидуальные узлы ввода выполняют следующие функции:

- присоединительную: обеспечивают присоединение ПКСО к разводящему стояку, отключение системы, дренаж теплоносителя, воздухоудаление (рис. 1, поз. 1, 2, 8, 9) [1, п. 6.4.10];

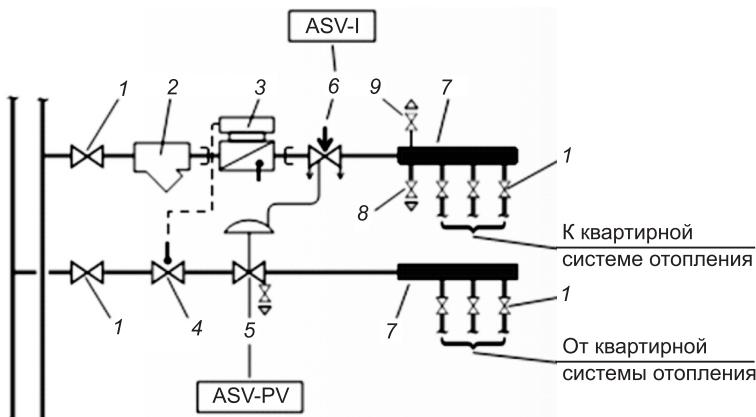


Рис. 1. Поэтажный коллектор поквартирной системы отопления

1 — отключающий шаровой кран; 2 — сетчатый фильтр; 3 — комплектный теплосчетчик (расходомер, термопреобразователи и тепловычислитель); 4 — шаровой кран особой конструкции (дополнительное устройство к теплосчетчику); 5 — автоматический балансировочный клапан; 6 — запорно-измерительный (ручной балансировочный) клапан; 7 — распределительный коллектор; 8 — дренаж; 9 — автоматический воздухоотводчик

- распределительную: распределяет теплоноситель между отдельными квартирами или отопительными приборами внутри одной квартиры при лучевой схеме разводки трубопроводов (рис. 1, поз. 7) [3, пункт 4.60].
- измерительную: производится измерение количества потребляемой теплоты для отопления каждой квартиры (рис. 1, поз. 3, 4);
- регулирующую: стабилизирует гидравлический режим в ПКСО (рис. 1, поз. 5, 6).

Для выполнения первых двух функций необходимо определиться с диаметром поэтажного коллектора.

Диаметр поэтажного (поквартирного) коллектора из условия равномерности раздачи теплоносителя определяется по [4, 6] — «при постоянном сечении коллектора и прочих равных условиях степень равномерности раздачи потока тем значительнее, чем больше F_k »:

$$f_{\text{отн}} = \sum \frac{f_o}{F_k},$$

где f_o — площадь ответвления, м²;

F_k — площадь сечения коллектора, м².

Однако увеличение площади сечения коллектора должно иметь разумные пределы. Условие равномерности раздачи выполняется, если «площадь поперечного сечения корпуса распределительного коллектора принимается не менее суммы площадей поперечных сечений отводящих трубопроводов, а сборного коллектора — площадей сечений подводящих трубопроводов» [3, п. 4.60].

Так как коллектор в КСО является высшей точкой ПКСО, рекомендуемая верхняя граница его площади сечения связана с его второй функцией — сбором и удалением воздуха [1, п. 6.4.10]. Скорость движения воды в точках сбора воздуха должна быть не более 0,1 м/с [5]. Поэтому необходимый внутренний диаметр поэтажного (поквартирного) коллектора определяется исходя из скорости движения воды в нем $v = 0,1$ м/с по формуле

$$d_B = 2 \cdot G^{0,5},$$

где G — расход воды, кг/ч.

Кроме того, коллектор устанавливается с уклоном 0,002 в сторону спускного штуцера [3, п. 4.64].

Условие обеспечения скорости теплоносителя в коллекторе не более 0,1 м/с автоматически выполняется при условии равномерной раздачи теплоносителя.

Производителями поквартирных коллекторов на основании выполнения вышеперечисленных требований к коллекторам даны рекомендации по выбору диаметров коллекторов в зависимости от тепловой нагрузки на коллектор (или расхода теплоносителя) при наиболее распространенных на практике проектирования ПКСО расчетных перепадах температур теплоносителя $\Delta t = 15, 20, 25$ °C [4].

Данные рекомендации даны для наиболее часто встречающихся присоединений ответвлений к коллекторам (4–6 шт.). Количество разводящих стояков (пар стояков — подающий и обратный) выбирается в зависимости от объемно-планировочного решения здания. Предельное коли-

чество разводящих стояков может соответствовать количеству квартир на этаже. Обычно разводящие коллекторы имеют 4–6 отводов. Однако сегодня объемно-планировочные решения зданий предполагают размещение на одном этаже и большего количества квартир (до 12). При устройстве распределительных коллекторов с таким количеством патрубков возникают два вопроса:

- 1) надо ли учитывать потери напора в коллекторе;
- 2) остается ли коллектор с таким количеством патрубков камерой равного давления.

Для ответа на эти вопросы было выполнено следующее:

- a) запроектирована поквартирная система отопления многоэтажного жилого дома; результаты проектирования приведены в таблице;

Результаты проектирования поэтажного коллектора

Квартира	№ по ходу	Потери давления ΔP , Па		\varnothing , мм	Расход теплоносителя G , кг/ч	
		квартира	коллектор		квартира	коллектор
Стояк 8	1	11345	20000	13	137	749
Стояк 7	2	7600	20000	10	87	612
Стояк 6	3	16954	20000	10	128	525
Стояк 5	4	8305	20000	8	70	397
Стояк 4	5	7363	20000	8	61	327
Стояк 3	6	11772	20000	10	92	266
Стояк 2	7	9033	20000	10	88	174
Стояк 1	8	7336	20000	10	86	86

б) проведен анализ полученной конструкции поэтажного коллектора (диаметры присоединяемых к коллектору патрубков в зависимости от поэтажной планировки);

в) проведено моделирование гидродинамических процессов распределения и сбора теплоносителя для коллекторов условным диаметром $d_y = 40, 50$ мм с количеством присоединяемых патрубков 8, 10 и 12 в среде Ansys Fluent.

Расчетная схема коллектора на 8 и 10 присоединений (пример) приведена на рис. 2. Результаты расчетов представлены на рис. 3, 4.

Проанализировав результаты моделирования и сравнив их с результатами проектирования, с учетом того, что основные потери напора в ПКСО происходят на клапанах (термостатических, балансировочных и регулирующих), при выполнении требований нормативной литературы [1, 3] потерями напора в коллекторах можно пренебречь, так как потери давления в коллекторе не превышают 1 % от потерь давления в ПКСО.

Материал, из которого изготавливаются коллекторы, должен быть стойким к кислородной коррозии [1, п. 4.8]: «Отопительно-вентиляционное оборудование, трубопроводы и воздуховоды в помещениях с коррозионно-активной средой, а также предназначенные для удаления воздуха с коррозионно-активной средой, следует предусматривать из антикоррозионных материалов или с защитными покрытиями от коррозии».

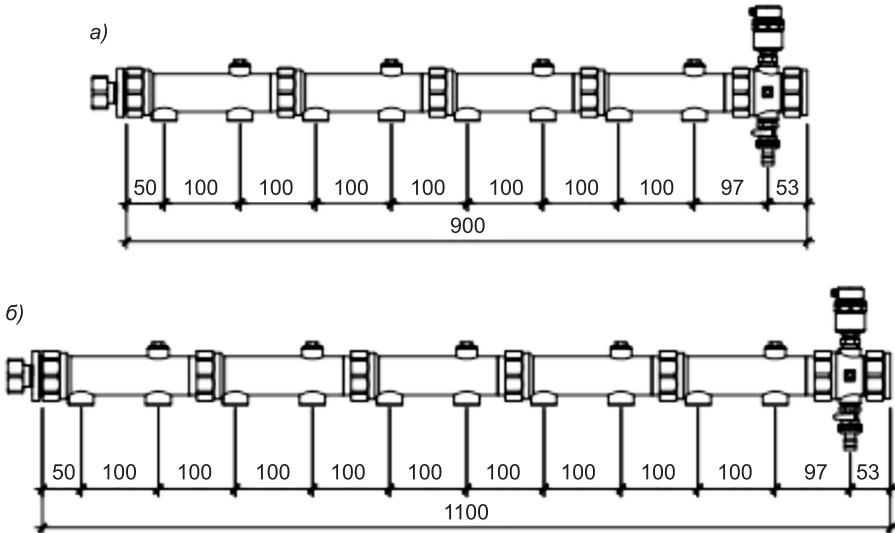


Рис. 2. Расчетная схема поэтажного коллектора на 8 (а) и 10 (б) присоединений

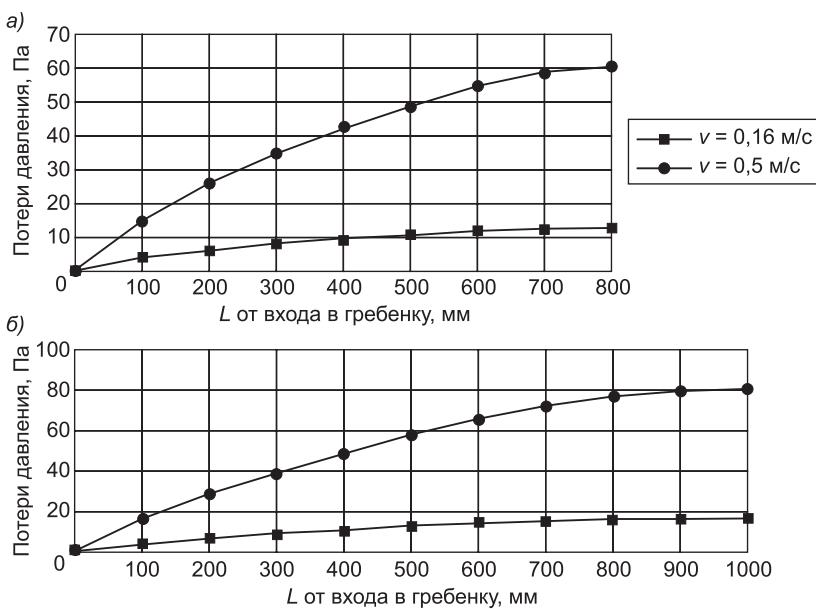


Рис. 3. Потери давления в гребенке $L = 900$ мм (8 отводов) (а), $L = 1100$ мм (10 отводов) (б), $d_{\text{вн}} = 41$ мм при скорости воды $v = 0,1; 0,5 \text{ м/с}$

Производителями поэтажных коллекторов являются зарубежные фирмы, такие как HERZ, FAR, DANFOSS и др. Коллекторы выполняются из латуни, стойкой к выщелачиванию цинка. Для удешевления системы отопления на практике коллекторы заводской готовности заменяют коллекторами из черной стали собственного изготовления. Такая замена недопустима, так как приводит к нарушению работоспособности системы отопления и необходимости ее демонтажа для восстановления этой работоспособности.

Почему же недопустимо использовать коллекторы из черной стали собственного производства в поквартирных системах отопления?

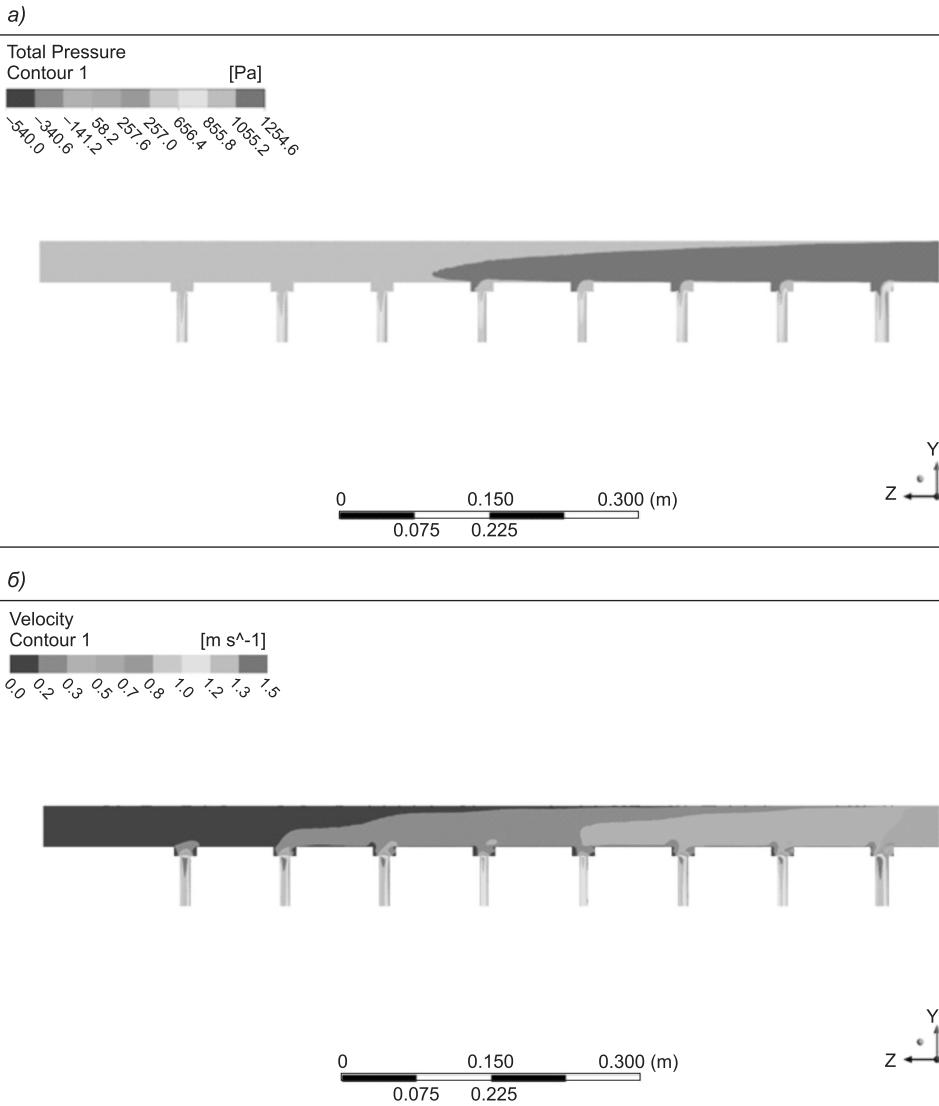


Рис. 4. Распределение давлений (а) и скоростей (б) в коллекторе

Поэтажные и поквартирные коллекторы, по существу, являются мини индивидуальными тепловыми пунктами и, следовательно, попадают под действие [3]. Согласно [3], проектирование коллектора производится из тех же труб, что и вся система теплоснабжения, т.е. черных. Но при этом нижняя врезка отводящих и подводящих трубопроводов в коллектор не рекомендуется [3, п. 4.62]. Это требование по верхнему присоединению ответвлений к коллектору связано с защитой теплопотребляющих систем от различных загрязнений, в том числе и от попадания окалины и ржавчины. Вся грязь остается в коллекторе, откуда затем при промывке системы и удаляется.

В поквартирных системах отопления присоединение отдельных квартир (или отопительных приборов) осуществляется с помощью нижней врезки в коллекторы. Это связано с прокладкой разводящих трубопроводов в бетонной стяжке пола горизонтально без уклонов. При такой про-

кладке все загрязнения автоматически попадают в квартирные системы отопления. Промывка системы отопления такой конструкции возможна только с помощью компрессора, причем из-за большой протяженности разводящих трубопроводов и сложной конфигурации в случае засорения отдельных участков промывка может не дать результатов. Наиболее часто засорение происходит из-за попадания окалины и ржавчины. Для исключения миграции загрязнений в целом по системе отопления здания перед каждым поэтажным коллектором устанавливается фильтр (рис. 1, поз. 2). Однако, если поэтажный коллектор выполнен из черной трубы, вся окалина при его сварке и ржавчина неизбежно попадут в квартирную систему отопления. Если «грязь» крупная и застrelа в поворотах или разветвлениях трубопроводов в стяжке пола, то промывка системы не поможет и придется долбить бетонную стяжку пола для замены трубопроводов. При применении латунных коллекторов заводского изготовления этих проблем не возникает, так как, во-первых, латунь не подвержена коррозии, а, во-вторых, все присоединения выполняются не на сварке, а на фитингах.

Выводы. 1. При проектировании поэтажных (поквартирных) коллекторов на большое количество ответвлений (до 12) при выполнении требований нормативной литературы [1, 3] потерями напора в коллекторах можно пренебречь, так как потери давления в коллекторе не превышают 1 % от потерь давления в ПКСО.

2. Применение поэтажных (поквартирных) коллекторов собственного изготовления из черной трубы недопустимо, так как приводит к засорению систем отопления квартир окалиной и ржавчиной и, как следствие, к нарушению работоспособности систем отопления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 [Текст]. — 54 с.
2. Поквартирные системы отопления многоэтажных зданий [Текст]: пособие. — М. : ООО «Данфосс», 2008. — 36 с.
3. СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов [Текст] / Госстрой России. — М. : Изд-во ФГУП ЦПП, 2004. — 78 с.
4. Рекомендации по проектированию. Поквартирные системы отопления Herz. Ч. 1: Поэтажный коллекторный модуль Herz [Текст]. — М. : ООО «ГЕРЦ Инженерные системы», 2015. — 58 с.
5. Богословский, В.Н. Отопление [Текст]: учеб. для вузов / В.Н. Богословский, А.Н. Сканави. — М. : Стройиздат, 1991. — 727 с.
6. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. — М., 1992. — 672 с.

*РОХЛЕЦОВА Татьяна Лаврентьевна, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*САВЕЛЬЕВ Евгений Геннадьевич, ст. препод.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*КИЯНИЦА Лаврентий Александрович, асп.
Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск*

Получено 02.02.15

Rokhletsova Tatyana Lavrentievna, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

Kyanitsa Lavrentiy Alexandrovich, post-graduate student of the Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

APPLICATION FOR COLLECTORS FLOOR APARTMENT HEATING SYSTEMS

In this article the question of the use of floor door-heating collectors: the possible number of connected apartments and the use of different materials in the manufacture of.

Key words: every apartment heating system, floor (door-) collector.

REFERENCES

1. Set of Rules 60.13330.2012. HVAC air. The updated edition of SNIP 41-01-2003 [Text]. — 54 p.
2. Every apartment heating system of multi-storey buildings [Text]: posobie. — M. : LLC «Danfoss», 2008. — 36 p.
3. Set of Rules 41-101-95. Thermal design points [Text] / Russian State Building. — M. : FSUE LAC, 2004. — 78 p.
4. Design Guidelines. Every apartment heating systems Herz. Part 1: The floor collector module Herz [Text]. — M. : Company «Herz Engineering Systems», 2015. — 58 p.
5. Bogoslovskiy, V.N. Heating [Text]: proc. for high schools / V.N. Bogoslovskiy, A.N. Skanavi. — M. : Stroyizdat, 1991. — 727 p.
6. Idelchik, I.E. Handbook of hydraulic resistance [Text] / I.E. Idelchik. — M., 1992. — 672 p.

УДК 628.3

**С.Д. ИВАНОВА, Г.Т. АМБРОСОВА, О.В. КСЕНОФОНТОВА, А.А. ФУНК,
ГАНЗОРИГ ШОНХОР, Е.Н. ЛЕОНОВА**

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ АКТИВНОГО ИЛА ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД МЕТОДОМ НИТРИФИКАЦИИ И ДЕНИТРИФИКАЦИИ

Излагается материал, который нужно рассматривать как попытку предоставить технологу очистных сооружений канализации оперативные рычаги управления технологическим процессом биологической очистки сточной жидкости в случае возникновения непривычной ситуации. Авторы будут благодарны всем, кто примет участие в дискуссии и сделает ценные замечания или выскажет свое принципиальное несогласие.

Ключевые слова: очистные сооружения канализации, нитрификация, денитрификация, внешний, внутренний контуры циркуляции активного ила, концентрация растворенного кислорода, приборы контроля и учета, системы автоматизации.

В настоящее время в Российской Федерации, несмотря на наличие практически во всех городах и даже поселках рабочего типа очистных сооружений канализации (ОСК), в открытые водоемы сбрасываются биогенные элементы (азот и фосфор), вызывая их эвтрофирование. Водоросли к концу вегетационного периода осаждаются, образуя донные отложения, которые с течением времени подвергаются анаэробному сбраживанию. Гниение донных осадков приводит не только к ухудшению органолептических и физико-химических показателей природной воды, но и вызывает изменения кислородного баланса, приводящего в отдельные периоды года к массовому замору рыбы.

Начиная примерно с 1996 г. в нашей стране началось строительство ОСК, предназначенных для удаления из сточной жидкости не только растворимых и нерастворимых органических загрязнений, но и биогенных элементов.

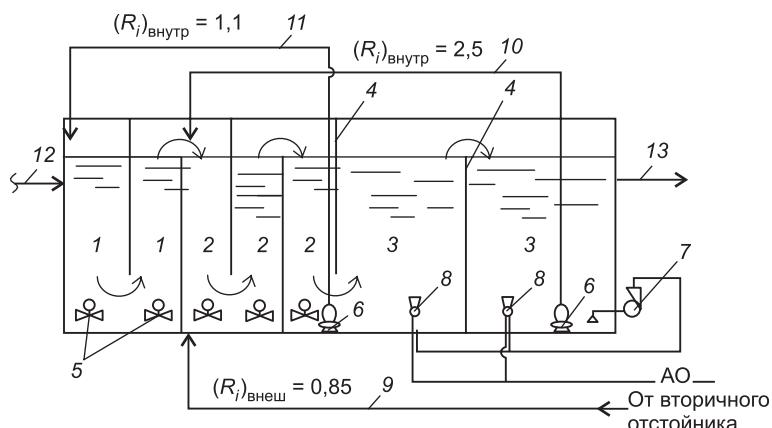
Рассмотрим следующий пример. В 2006 г. в г. Якутске был введен в эксплуатацию современный комплекс ОСК, предусматривающий полную биологическую очистку стоков с удалением азота и фосфора. Для удаления азота использован биологический, а фосфора физико-химический метод очистки стоков.

Очистные сооружения запроектированы итальянской фирмой «PIANIMPIANTI», которая использовала технологию очистки стоков и обработки осадков, а также конструкции отдельных сооружений, систему контроля и автоматизированного управления по лицензиату США. В состав очистных сооружений включены две решетки, две тангенциальные песколовки, четыре первичных и шесть вторичных горизонтальных отстойников, два семизонных биореактора, шесть фильтров доочистки стоков и узел обеззараживания стоков с ультрафиолетовым облучением. Сгущение избыточного активного ила и сырого осадка предусмотрено

**© Иванова С.Д., Амбросова Г.Т., Ксенофонтова О.В., Функ А.А., Ганзориг Шонхор,
Леонова Е.Н., 2015**

в барабанных гравитационных сгустителях. Сгущенная смесь сбраживается в двух метантенках и одном досбраживателе, обезвоживается на ленточных фильтр-прессах и подсушивается в барабанных сушилках. Аварийные иловые площадки на данном объекте отсутствуют.

Семизонные биореакторы представляют собой две автономно работающие емкости (см. рисунок), каждая из которых состоит из семи зон. В двух анаэробных зонах происходит гидролиз органических веществ, в трех бескислородных зонах (денитрификаторах) восстанавливаются нитраты и окисляются органические вещества, а в двух аэробных зонах (нитрификаторах) осуществляется окисление азота до нитритов и нитратов.



Принципиальная схема семизонного биореактора

1 — анаэробная зона; 2 — бескислородная зона (денитрификатор); 3 — аэробная зона (нитрификатор); 4 — разделительные перегородки; 5 — мешалка; 6 — насосы циркулирующего ила; 7 — насос подачи иловой смеси в струйный аэратор-диспергатор; 8 — струйный аэратор-диспергатор; 9 — внешний контур циркуляции нитрифицированного активного ила из вторичного отстойника в денитрификатор; 10 — внутренний контур циркуляции нитрифицированного активного ила; 11 — внутренний контур циркуляции денитрифицированного активного ила; 12 — осветленная сточная жидкость из первичных отстойников; 13 — иловая смесь из нитрификатора во вторичные отстойники

Анаэробная зона 1 служит для протекания анаэробных процессов, в результате которых происходит гидролиз сложных органических веществ до более простых с образованием летучих жирных кислот (ЛЖК). Легко окисляемый питательный субстрат интенсифицирует процесс восстановления нитритов и нитратов. Для быстрого смешения сточной жидкости с активным илом и его поддержания во взвешенном состоянии в анаэробной зоне предусмотрены донные мешалки 5. Для поддержания в этой зоне рабочей дозы анаэробной биомассы предусмотрена подача ила из конца денитрификатора в начало анаэробной зоны. Степень рециркуляции ила (R_i)_{внутр} по этому контуру (первый внутренний контур) согласно проекту равна 1,1. Продолжительность нахождения сточной жидкости в анаэробной зоне при проектной гидравлической нагрузке составляет 2,4 ч. Рабочая глубина всех зон биореактора принята 11 м.

С позиций сегодняшних дней анаэробная зона перед бескислородной способствует образованию летучих жирных кислот, ускорению процесса

денитрификации, однако нахождение активного ила в анаэробных условиях приводит к обогащению сточной жидкости фосфатами. В результате при физико-химическом методе удаления фосфатов требуется повышенный расход реагентов, что связано с увеличением эксплуатационных затрат на их приобретение.

В бескислородной зоне 2 протекает процесс восстановления окисленных форм азота (нитритов и нитратов) до газообразных форм (NO , N_2O или N_2). Конечный продукт восстановленных нитритов и нитратов зависит от значений рН. При рН более 7,3 восстановление протекает до элементарного азота (N_2), при рН ниже 7,3 восстановление заканчивается образованием NO , N_2O . В этой зоне также предусмотрены донные мешалки. Степень циркуляции нитрифицированного активного ила (R_i)_{внутр} между нитрификатором и денитрификатором (второй внутренний контур) согласно проекту принята равной 2,5. В денитрификатор возвращается активный ил из вторичных отстойников (внешний контур) со степенью рециркуляции (R_i)_{внеш} = 0,85. Продолжительность обработки сточной жидкости в денитрификаторе при проектном расчетном расходе составляет 2,3 ч. Перепуск иловой смеси из одной зоны биореактора в другую осуществляется либо через водосливы, либо через отверстия, предусмотренные в придонной части биореактора.

В зоне нитрификатора 3 происходит окисление азотсодержащих соединений. Эта зона оборудована струйными аэраторами-диспергаторами 8. Особенностью этих аэраторов является первоначальное смешение воздуха с иловой смесью в напорном трубопроводе, что несколько увеличивает продолжительность контакта воздуха с насыщаемой средой. Нагнетание воздуха производится компрессорами, оборудованными частотными регуляторами, позволяющими изменять производительность в диапазоне от 4000 до 12000 м³/ч. Возврат нитрифицированного активного ила из нитрификатора в денитрификатор осуществляется погружным насосом 10. Согласно проекту сточная жидкость в этой зоне обрабатывается в течение 4,6 ч.

В анаэробной зоне концентрацию растворенного кислорода рекомендуется поддерживать на нулевом уровне, в денитрификаторе на уровне 0,1–0,5 мг/л, а в нитрификаторе 3–4 мг/л. Согласно проекту на данном объекте автоматизировано только включение и выключение компрессоров в зависимости от концентрации растворенного кислорода в нитрификаторах. Включение насосов циркулирующего ила всех контуров производится в ручном режиме, причем количество циркулирующего ила в течение суток постоянно по всем трем контурам.

ОСК были введены в эксплуатацию в 2006 г. со следующими показателями сточной жидкости: БПК_{пол} — 180–250 мг/л, взвешенные вещества — 150–200 мг/л, азот аммония ($\text{N}-\text{NH}_4^+$) — 35–40 мг/л, фосфаты в пересчете на Р — 3–5 мг/л, температура 17–20 °C, рН — 7,2–7,6. Концентрация основных показателей (взвешенные вещества, БПК_{пол}, а также азот аммония и фосфаты) увеличивается примерно в 2–3 раза при залповом поступлении стоков со сливной станции, территориально примыкающей к ОСК.

В первые три года эксплуатации биореакторов в бескислородных зонах невозможно было добиться восстановления нитритов и нитратов

из-за высокой концентрации растворенного кислорода. В денитрификаторе она достигала 3–3,5 мг/л вместо 0,1–0,5 мг/л. Высокая концентрация растворенного кислорода в денитрификаторе объяснялась не только высокой концентрацией растворенного кислорода в нитрификаторе (6–7 мг/л), но и высокой степенью рециркуляции по внутреннему контуру (R_i)_{внутр.} = 2,5. В результате даже в анаэробной зоне концентрация растворенного кислорода достигала 1,5–2 мг/л. При таких значениях растворенного кислорода в нитрификаторе азот аммония практически полностью окислялся, т.е. снижался с 35–40 до 0,4–1 мг/л, однако восстановление нитратов не наблюдалось. Если судить по балансу общего азота до и после биологической системы, то он согласно данным лаборатории снижался на величину, затраченную примерно на синтез биомассы в биореакторе.

Регулировать степень рециркуляции активного ила по внутренним контурам не представлялось возможным, так как циркуляционные насосы находились в придонных зонах нитрификаторов и денитрификаторов на глубине 11 м, и на напорных трубопроводах отсутствовала запорная арматура. Повышенная степень рециркуляции активного ила не только увеличивает концентрацию растворенного кислорода в денитрификаторе и исключает процесс восстановления нитратов, но и снижает концентрацию нитратов в денитрификаторе и концентрацию азота аммонийного в нитрификаторе. Влияние этого фактора приводит к снижению удельной скорости восстановления нитритов, нитратов и окисления азота аммонийного. Необоснованно завышенная степень циркуляции активного ила, пусть даже по внутренним контурам, где напор насосов намного ниже в сравнении с циркуляционными насосами внешнего контура, увеличивает к тому же эксплуатационные затраты.

Наличие на данном объекте измерительных приборов и стablyно работающей системы автоматического регулирования работы воздуходувок и насосов циркулирующего активного ила в зависимости от концентрации растворенного кислорода во всех зонах биореактора исключило бы проблему, связанную с восстановлением нитритов и нитратов. К сожалению, при постоянных сбоях в системе автоматического регулирования процессом обеспечить нормальную работу биореактора в полуавтоматическом режиме крайне сложно. Еще сложнее обстоит дело на объектах, где приборы контроля и автоматизации процессом вовсе отсутствуют. На рассматриваемом объекте сбои в работе системы контроля и автоматизации работы биореакторов стали наблюдаться через 5 лет после ввода их в эксплуатацию из-за выхода из строя датчиков, повреждение которых вызвано агрессивной средой закрытых производственных помещений. Комплекс ОСК г. Якутска, территориально относящегося к районам вечной мерзлоты, размещен в закрытом отапливаемом здании, где несмотря на усиленную вентиляцию помещений чувствительные элементы датчиков измерительных приборов подвергаются агрессивному воздействию сероводорода и амиака.

Биологически очищенные стоки после доочистки на песчаных фильтрах и ультрафиолетового облучения сбрасываются в одну из крупнейших рек Российской Федерации Лену, относящуюся к рыбохозяйственному водоему I категории. Как и все северные реки, Лена относится к водо-

емам с ограниченной самоочищающей способностью из-за низкой температуры воды в течение года. В связи с этим необходимо обеспечивать высокий уровень очистки сточной жидкости.

Существующие приемы проектирования нитрификаторов и денитрификаторов, применяемые как в Российской Федерации, так и за рубежом, представляют собой «черный ящик», содержимое которого недоступно технологу ОСК даже после ввода объекта в эксплуатацию. Поэтому в процессе эксплуатации технолог не может воспользоваться данными,ложенными в программу, при вынужденном изменении количества или качества сточной жидкости, изменении объемов сооружений, которое возможно при частичном их отключении на ремонт или профилактическую прочистку, при изменении производительности насосов циркулирующего ила и воздуходувок. Известно, что при прочих равных условиях работы воздуходувок абсолютные значения растворенного кислорода в биореакторах изменяются не только от температуры сточной жидкости, но и атмосферного давления. Так, многолетняя практика эксплуатации крупных, средних и малых объектов показала, что в период низкого атмосферного давления кислородный режим в аэротенках заметно ухудшается, и наоборот. Кроме того, в часы минимального поступления стоков или загрязнений, которые наблюдаются постоянно в ночной период, при неизменной степени рециркуляции активного ила, увеличивается концентрация растворенного кислорода и в нитрификаторах, и в денитрификаторах. В результате это является одной из главных причин постоянных сбоев процесса денитрификации.

В некоторых случаях технолог даже не может выявить причину происходящих нарушений, если отсутствует фиксация хотя бы основных технологических параметров: концентрации растворенного кислорода, расхода сточной жидкости, степени циркуляции активного ила и расхода воздуха. К тому же он не имеет информации и по качеству сточной жидкости. Анализы, которые выполняются в лабораториях очистных сооружений канализации, необходимы исключительно для отчетности, их совершенно невозможно использовать для управления технологическими процессами, тем более оперативного управления системы биологической очистки стоков. Результаты большей части анализов сточной жидкости предоставляются технологу в лучшем случае через двое суток с начала отбора проб, так как при правильном отборе проб, с учетом продолжительности пребывания сточной жидкости в сооружениях, сточная жидкость только отбирается по контрольным точкам в течение 1–1,5 сут. Кроме того, около 4–8 ч необходимо для производства анализов. А данные по одному из важнейших показателей сточной жидкости (БПК_5) технолог получает через 6–6,5 сут с момента начала отбора проб. К этому моменту состав стоков, поступающих на очистку, успевает многократно обновиться, за такой период может обновиться полностью даже биомасса циркулирующего ила.

Уместно будет заметить, что из всех анализов, которые проводятся в настоящее время на ОСК, гидробиологический анализ активного ила, с большими оговорками, можно отнести к анализу, пригодному для объективной оценки работы сооружений биологической очистки, и в некоторых случаях он помогает технологу выявить причину возможного нару-

шения и относительно оперативно корректировать технологический процесс.

Из-за отсутствия на ОСК приборов контроля и учета или из-за частого их сбоя, из-за недоступности информации «черного ящика» технологу практически невозможно обеспечить требуемую степень очистки стоков по азоту аммонийному, нитритному и нитратному, особенно по очень неустойчивому соединению — азоту нитритному. Ситуацию усугубляют резкие изменения в течение суток количества поступающих стоков и загрязнений. Все три показателя (азот аммония, нитритный и нитратный) взаимосвязаны. Так, при избытке растворенного кислорода весь азот нитритов стремится перейти в азот нитратный, а при недостатке происходит восстановление нитратов до нитритов. Восстановление нитратов может наблюдаться в отдельных зонах нитрификатора, в результате нитриты в очищенной сточной жидкости могут превышать предельно допустимую концентрацию (ПДК) 0,08 мг/л по NO_2^- .

На наш взгляд, назрела необходимость в оснащении сооружений биологической очистки приборами контроля хотя бы основных параметров: температуры, pH, ХПК или БПК, азота аммонийного, нитритного, нитратного, фосфатов. Зная эти показатели, технолог, сталкиваясь с чрезвычайными обстоятельствами, может своевременно принять и оперативно произвести необходимые изменения на своем объекте. Как нам представляется, предстоящее оснащение ОСК измерительными приборами и системами автоматизации будет являться третьей волной модернизации комплексов канализации. К первой волне модернизации ОСК в СССР можно отнести улучшение их технического состояния, которое проводилось практически повсеместно в период с 1985 по 1996 г. Вторая волна модернизации ОСК приходится на период 2000–2014 гг., когда в Российской Федерации начали внедрять новые из доступных технологий: удаление из сточной жидкости азота и фосфора. Считаем, что экономически целесообразно третью волну модернизации связать с дополнительным строительством на всех без исключения ОСК резервуаров-усреднителей, которые позволят не только стабилизировать работу всего комплекса, но и сократить капитальные затраты, необходимые для увеличения мощности сооружений. Наличие приборов контроля и учета, наличие системы автоматического регулирования технологическим процессом, т.е. исключение влияния на работу сооружений человеческого фактора, и равномерное поступление стоков на ОСК обеспечит требуемую стабильную степень очистки стоков.

Так как при реализации на ОСК метода очистки стоков используется два контура циркуляции активного ила (внешний и внутренний), то важно знать, по какому контуру необходимо увеличивать или сокращать степень циркуляции нитрифицированного активного ила, чтобы обеспечить необходимые условия работы нитрификатора и денитрификатора [1]. Высокая степень циркуляции по внешнему контуру выгодна для поддержания в денитрификаторе низких значений концентрации растворенного кислорода, но увеличивает эксплуатационные затраты, поскольку насосы по этому контуру предусматриваются с большим давлением. Активный ил после вторичных отстойников редко возвращается в денитрификатор с остаточной концентрацией растворенного кислорода, чаще он

отсутствует. Сократить эксплуатационные затраты на перекачку нитрифицированного активного ила в денитрификатор можно, перераспределив потоки, направив максимальное количество по внутреннему контуру. Насосы этого контура предусматриваются с напором 2–5 м, а иногда и 0,5–2 м. Привлекательный, на первый взгляд, вариант перераспределения нитрифицированного активного ила в сторону увеличения степени циркуляции по внутреннему контуру имеет свои негативные последствия. Многолетняя эксплуатация нитрификаторов и денитрификаторов в таком режиме показывает, что увеличение степени циркуляции активного ила по внутреннему контуру приводит к повышенной концентрации растворенного кислорода в денитрификаторе, что исключает протекание процесса восстановления азота нитратного до азота элементарного.

Как уже отмечалось, правильно выбранная общая степень циркуляции нитрифицированного активного ила и, главное, правильное распределение потока циркулирующего активного ила между внутренним и внешним контурами обеспечивает не только необходимую глубину изъятия из сточной жидкости азота, требует минимальных объемов нитрификаторов и денитрификаторов, но и сокращает эксплуатационные затраты на перекачку циркулирующего ила.

К основным показателям поступающей на очистку сточной жидкости относятся: азот аммония, азот органический и концентрация растворенного кислорода. Значения двух форм азота в городской сточной жидкости зависят в первую очередь от нормы водопотребления, установленной для жителей конкретного населенного пункта, а также количества и качества промстоков, сбрасываемых в городскую канализационную сеть с предприятий пищевой промышленности. Важную роль в достижении максимальных значений по азоту аммонийному играет протяженность канализационной сети, в которой интенсивно протекают процессы аммонификации, особенно в летний период года. В некоторых лабораториях в поступающей сточной жидкости фиксируют следовые значения нитритов и нитратов. По мнению авторов, нитриты и нитраты не могут присутствовать в неочищенной сточной жидкости даже в следовых концентрациях, если значение БПК_{пол} неочищенной сточной жидкости превышает 50 мг / л. Фиксацию этих показателей можно объяснить некачественной подготовкой пробы перед проведением анализа. Под некачественной подготовкой понимается неполное снятие в пробе мешающих факторов, исказжающих значения нитритов и нитратов при проведении анализов. Концентрация растворенного кислорода в поступающей сточной жидкости всегда равна нулю. К основным показателям очищенной сточной жидкости относятся азот аммония, азот нитритов и нитратов.

Считаем, что в первом приближении общая степень рециркуляции нитрифицированного активного ила, включая внешний и внутренний контуры, должна определяться технологом по уравнению материального баланса по азоту (1) [2, 3]. Согласно балансу сумма азота на выходе из биологической системы должна быть равна сумме азота на входе в нее с учетом азота, затраченного на синтез биомассы в биологической системе, и азоту, восстановленному в денитрификаторе. В рассматриваемом случае исключено увеличение азота аммонийного за счет аммонификации

сточной жидкости в анаэробной зоне биореактора из-за недоступности отбора пробы из необходимой точки.

$$\left(C_{\text{N}-\text{NH}_4^+}^{\text{ПДК}} + C_{\text{N}-\text{NO}_3^-}^{\text{ПДК}} \right) \cdot (1 + R_i) = C_{(\text{N}-\text{NH}_4^+)_{\text{исх}}} + C_{(\text{N}-\text{N}_{\text{опр}})_{\text{исх}}} - C_{(\text{N}-\text{NH}_4^+)_{\text{синг}}} - C_{(\text{N}-\text{NO}_3^-)_{\text{вос}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{N}-\text{NH}_4^+}^{\text{ПДК}}$, $C_{\text{N}-\text{NO}_3^-}^{\text{ПДК}}$ — предельно допустимые концентрации азота аммонийного и азота нитратного в очищенной сточной жидкости, сбрасываемой в водоем;

$C_{(\text{N}-\text{NH}_4^+)_{\text{синг}}}$ — количество азота, затраченное на синтез биомассы в денитрификаторе;

$C_{(\text{N}-\text{NH}_4^+)_{\text{исх}}}$, $C_{(\text{N}-\text{N}_{\text{опр}})_{\text{исх}}}$ — концентрация азота аммонийного и органического в исходной сточной жидкости;

$C_{(\text{N}-\text{NO}_3^-)_{\text{вос}}}$ — количество азота нитратного, восстановленного в денитрификаторе;

R_i — общая степень циркуляции нитрифицированного активного ила по внутреннему и внешнему контурам.

В данном уравнении искомой величиной является R_i , при этом неизвестны еще две величины: количество азота, затраченного на синтез биомассы в биологической системе $C_{(\text{N}-\text{NH}_4^+)_{\text{синг}}}$, и количество азота нитратного, восстановленного в денитрификаторе $C_{(\text{N}-\text{NO}_3^-)_{\text{вос}}}$. Для решения задачи с тремя неизвестными принимаются следующие допущения.

Первоначально количество азота нитратного, восстановленного в денитрификаторе, равно нулю. Азот, затраченный на синтез биомассы в биологической системе $C_{(\text{N}-\text{NH}_4^+)_{\text{синг}}}$, определяется теоретическим путем по приросту активного ила (Π_i)

$$C_{(\text{N}-\text{NH}_4^+)_{\text{синг}}} = \Pi_i \cdot M \cdot m \cdot (1 - S_i), \quad (2)$$

где M — количество микроорганизмов в активном иле, использующих азот для синтеза биомассы, в долях единицы; многими исследователями эта величина принимается равной 25–35 % от концентрации сухого вещества прироста (Π_i), или 0,25–0,35 в долях единицы [4];

m — доля азота в живой клетке, она принимается в довольно большом диапазоне от 5 до 25 % от массы сухого вещества клетки, или 0,05–0,25 в долях единицы; для активного ила городских ОСК можно в среднем принять 10 % от массы сухого вещества клетки, или 0,1 в долях единицы [4];

S_i — зольность активного ила можно принять равной 25–30 %, или 0,25–0,3 в долях единицы [4];

Π_i — прирост активного ила определяется любым из приведенных ниже способов [4]

$$\Pi_i = 0,8 \times C_{\text{ен}} + 0,3 \times L_{\text{ен}}, \quad \Pi_i = C_{\text{ен}}, \quad \Pi_i = L_{\text{ен}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{ен}}$ — концентрация взвешенных веществ в осветленной сточной жидкости, поступающей в биореактор;

L_{en} — значение БПК_{пол} осветленной сточной жидкости, поступающей в биореактор.

Для ОСК г. Якутска количество азота, затрачиваемого на синтез биомассы активного ила в биореакторе, составляет по усредненным расчетным и лабораторным данным около 2,5 мг/л.

После определения количества азота аммонийного, затраченного на синтез биомассы, в уравнении (1) остается два неизвестных R_i и $(C_{N-NO_3})_{вос}$. Если при первом приближении концентрацию восстановленного азота $(C_{N-NO_3})_{вос}$ принять равной 0, то тогда после преобразования формулы (1) общая степень рециркуляции нитрифицированного активного ила может быть определена по формуле (4)

$$R_i = \{[(C_{N-NH_4^+})_{исх} + (C_{N_{опр}})_{исх} - (C_{N-NH_4^+})_{син} - (C_{N-NO_3^+})_{вос}] / [(C_{N-NH_4^+})_{ПДК} + (C_{N-NO_3^+})_{ПДК}]\} - 1. \quad (4)$$

Проверим расчетную формулу (4), подставив в нее эксплуатационные данные ОСК г. Якутска:

$$R_i = [(35 + 3,5 - 2,5 - 0) / (9 + 0,4)] - 1 = 2,8.$$

Расчеты показали, что при фактических эксплуатационных данных общая степень рециркуляции (R_i) нитрифицированного активного ила по внешнему и внутреннему контурам составляет 2,8. Фактическая же степень циркуляции (R_i) по обоим контурам составляет 3,35. Если по внешнему контуру оставить проектную степень рециркуляции $(R_i)_{внеш} = 0,85$, то по внутреннему контуру степень рециркуляции $(R_i)_{внутр}$ должна быть 1,95 вместо фактической степени рециркуляции по этому контуру 2,5. Правильность перераспределения циркулирующего ила между внутренним и внешним контурами должна проверяться по балансу кислорода.

Если допустить, что в денитрификаторе восстановлено хотя бы 6 мг/л азота нитратного, то необходимая общая степень циркуляции (R_i) нитрифицированного активного ила снизится с 2,8 до 2,2. Таким образом, принимая вначале концентрацию восстановленного азота нитратов равной нулю, получаем максимальную степень циркуляции нитрифицированного активного ила. При необходимости технолог в процессе эксплуатации может откорректировать степень циркуляции активного ила, сократив расход ила по внешнему или внутреннему контуру.

Зная степень рециркуляции по внешнему и внутреннему контурам, можно спрогнозировать примерную концентрацию растворенного кислорода в начале денитрификатора $(C_{O_2})_{дэн}$ после смешения поступающей сточной жидкости с активным илом, циркулирующим по внешнему и внутреннему контурам, а также иловой смеси, находящейся в денитрификаторе. Для определения этого показателя также приняты некоторые допущения. Первое заключается в том, что в денитрификаторе процесс протекает не в динамических, а в статических условиях, т.е. предполагается, что кислород, который поступает в денитрификатор из нитрификатора, моментально не используется микроорганизмами активного ила. В принципе свободный кислород при нормальной

денитрификации и не должен использоваться бактериями-денитрификаторами. Второе допущение состоит в том, что средняя остаточная концентрация растворенного кислорода в смеси, которая находится в денитрификаторе, равна 0,1 мг / л. Эта величина находится в пределах от 0 до 0,5 мг / л.

Используя уравнение материального баланса по растворенному кислороду (5), можно с достаточно высокой точностью найти степень циркуляции активного ила как по внешнему, так и внутреннему контуру

$$[Q(1+R_i) + W_{\text{деп}}](C_{O_2})_{\text{см}} = Q(C_{O_2})_{\text{ст.жид}} + (R_i)_{\text{внеш}} Q(C_{O_2})_{\text{внеш}} + (R_i)_{\text{внутр}} Q(C_{O_2})_{\text{внутр}} + W(C_{O_2})_{\text{деп}}, \quad (5)$$

где $(C_{O_2})_{\text{см}}$ — концентрация растворенного кислорода в начале денитрификатора, т.е. после смешения четырех потоков: осветленная сточная жидкость, циркулирующий активный ил внутреннего и внешнего контура, а также иловая смесь, находящаяся в денитрификаторе;

Q — количество сточной жидкости, поступающей в биореактор;

$(C_{O_2})_{\text{ст.жид}}$ — концентрация растворенного кислорода в осветленной сточной жидкости;

$(C_{O_2})_{\text{внеш}}$ — концентрация растворенного кислорода в иловой смеси, поступающей из вторичного отстойника в денитрификатор;

$(C_{O_2})_{\text{внутр}}$ — концентрация растворенного кислорода в иловой смеси, поступающей из нитрификатора в денитрификатор (внутренний контур); принимается существующая величина 3,5 мг / л;

$W_{\text{деп}}$ — общий объем денитрификаторов 8780 м³;

$(C_{O_2})_{\text{деп}}$ — концентрация растворенного кислорода в денитрификаторе, в расчете принимается одно из минимальных значений 0,1 мг / л. Для справки: длительная практика эксплуатации компактной установки производительностью 200 м³/сут с биореактором, работающим в режиме контактной стабилизации, показала, что процесс восстановления нитратов протекает еще более успешно при полном отсутствии кислорода в денитрификаторе.

Выразим уравнение (5) относительно искомой величины $(C_{O_2})_{\text{см}}$ и подставим в полученное уравнение (6) фактические значения расхода сточной жидкости, расчетные значения внешнего $(R_i)_{\text{внеш}}$ и внутреннего $(R_i)_{\text{внутр}}$ контура и нормативные значения растворенного кислорода в иловой смеси этих потоков $(C_{O_2})_{\text{внутр}}$ и $(C_{O_2})_{\text{внеш}}$:

$$(C_{O_2})_{\text{см}} = [Q(C_{O_2})_{\text{ст.жид}} + (R_i)_{\text{внеш}} Q(C_{O_2})_{\text{внеш}} + (R_i)_{\text{внутр}} Q(C_{O_2})_{\text{внутр}} + W(C_{O_2})_{\text{деп}}] / [Q(1+R_i) + W_{\text{деп}}], \\ (C_{O_2})_{\text{см}} = [(3700 \cdot 0 + 0,85 \cdot 3700 \cdot 0 + 1,95 \cdot 3700 \cdot 3,5 + 8780 \cdot 0,1)] / [3700(1+2,8) + 8780], \\ C_{O_2} = 1,14 \text{ мг / л.} \quad (6)$$

Таким образом, даже при меньшей степени циркуляции нитрифицированного ила по внутреннему контуру 1,95 (по проекту она принята 2,5)

и не очень высокой концентрации растворенного кислорода в нитрификаторе 3,5 мг/л не может быть достигнута необходимая концентрация растворенного кислорода (0–0,5 мг/л) в иловой смеси, поступающей в денитрификатор, при которой возможно нормальное восстановление нитратов.

Упростим уравнение (6) за счет исключения двух слагаемых $Q(C_{O_2})_{ст.жид}$ и $(R_i)_{внеш} Q(C_{O_2})_{внеш}$, так они имеют нулевые значения и заменим выражение $[1 + (R_i)_{внеш} + (R_i)_{внутр}]$ на $(1 + R_i)$, тогда получим

$$(C_{O_2})_{см} = [(R_i)_{внутр} Q(C_{O_2})_{внутр} + W_{ден}(C_{O_2})_{деп}]/[Q(1 + R_i) + W_{деп}]. \quad (7)$$

Запишем уравнение (7) относительно искомого параметра $(R_i)_{внутр}$

$$(R_i)_{внутр} = (C_{O_2})_{см} [Q(1 + R_i) + W_{деп}(C_{O_2})_{деп}]/Q(C_{O_2})_{внутр}. \quad (8)$$

Подставив в уравнение (8) для смеси четырех потоков максимально возможную концентрацию растворенного кислорода $(C_{O_2})_{см} = 0,5$ мг/л, при которой успешно протекает процесс денитрификации, получим

$$\begin{aligned} (R_i)_{внутр} &= 0,5[3700(1 + 2,8) + 8780 - 8780 \cdot 0,1]/3700 \cdot 3,5, \\ (R_i)_{внутр} &= 0,8. \end{aligned}$$

Если общая степень циркуляции активного ила (R_i) равна 2,8, а по внутреннему контуру $(R_i)_{внутр}$ она составляет 0,8, то по внешнему контуру $(R_i)_{внеш}$ она будет находиться на уровне 2.

Выводы. 1. Устройство анаэробной зоны перед бескислородной способствует образованию летучих жирных кислот, ускоряет процесс денитрификации, однако нахождение циркулирующего активного ила в анаэробных условиях приводит к обогащению сточной жидкости фосфатами, в результате при физико-химической очистке увеличиваются эксплуатационные затраты на приобретение реагентов.

2. Главными параметрами при очистке стоков методом нитрификации и денитрификации является степень циркуляции нитрифицированного активного ила по внешнему и внутреннему контурам, а также концентрация растворенного кислорода в денитрификаторах и нитрификаторах. Для правильного выбора этих параметров рекомендуется использовать материальный баланс по азоту и растворенному кислороду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Х у т о р н ю к, Г.Н. Опыт удаления биогенных элементов из сточных вод [Текст] / Г.Н. Хуторнюк, Т.М. Гундырева, Г.Т. Амбросова, А.А. Функ // Водоснабжение и санитарная техника. — 2009. — № 3. — С. 37–40.
- А м б р о с о в а, Г.Т. Особенности технологии удаления азота из сточной жидкости [Текст] / Г.Т. Амбросова, О.В. Ксенофонтова, А.А. Функ // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 4. — С. 100–106.
- Пат. № 2402494, С02 F3/30. Способ удаления азота из сточной жидкости [Текст] / Г.Т. Амбросова, А.А. Функ, А.В. Николаев и др.; приоритет от 20.01.2009; опубл. 27.10.2010.
- Я к о в л е в, С.В. Биохимические процессы в очистке сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Т.А. Карюхина. — М. : Стройиздат, 1980. — 109 с.

ИВАНОВА Саргылана Дмитриевна, технолог, ОАО «Водоканал», г. Якутск
АМБРОСОВА Галина Тарасовна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: galina-ambrosova@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
КСЕНОФОНТОВА Ольга Владимировна, канд. техн. наук
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ФУНК Анна Александровна, канд. техн. наук; E-mail: funk71@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ГАНЗОРИГ Шонхор, инженер-технолог ГУП «Управление Водоканала», г. Улан-Батор
ЛЕОНОВА Елена Николаевна, технолог ОАО «ОмскВодоканал»

Получено 12.01.15

Ivanova Sargylana Dmitrievna, technologist, Vodokanal, Yakutsk, Russia
Ambrosova Galina Tarasovna, candidate of technical sciences, assistant professor;
E-mail: galina-ambrosova@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and
Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Ksenofontova Olga Vladimirovna, candidate of technical sciences, Novosibirsk State
University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Funk Anna Alexandrovna, candidate of technical sciences; E-mail: funk71@yandex.ru,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Ganzorig Shonkhor, process engineer, SUE «Management of water utility»,
Ulaanbaatar, Mongolia
Leonova Elena Nikolaevna, technologist, OmskVodokanal, Russia

DETERMINATION OF THE DEGREE OF RECIRCULATION OF ACTIVATED SLUDGE IN THE WASTEWATER TREATMENT METHOD OF NITRIFICATION AND DENITRIFICATION

Operational management of an emergency at sewage treatment facilities are presented in this article. We offer improved methods of monitoring and control of technological processes, as well methods of timely intervention. Authors are invited to a panel discussion and thank you in advance for comments.

Key words: sewage treatment plants, nitrification, denitrification, external circuit activated sludge, the internal circuit of activated sludge, dissolved oxygen, the devices of the control and accounting, automation.

REFERENCES

1. Khutornyuk, G.N. Experience nutrient removal from waste water [Text] / G.N. Khutornyuk, T.M. Gundyrava, G.T. Ambrosova, A.A. Funk // Water supply and sanitary technique. — 2009. — N 3. — P. 37–40.
2. Ambrosova, G.T. Features of technology of nitrogen removal from waste water [Text] / G.T. Ambrosova, O.V. Ksenofontova, A.A. Funk // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 4. — P. 100–106.
3. Pat. N 2402494, CO2 F3 / 30. A method for removing nitrogen from waste water [Text] // G.T. Ambrosova, A.A. Funk, A.V. Nikolaev and others; the priority of 20.01.2009; publ. 27.10.2010.
4. Yakovlev, S.V. Biochemical processes in waste water treatment [Text] / S.V. Yakovlev, T.A. Karyuhina. — M. : Stroyizdat, 1980. — 109 p.

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 665.775.4:678.048

В.П. КИСЕЛЕВ, В.А. ШЕВЧЕНКО, Г.В. ВАСИЛОВСКАЯ,
Л.А. ИВАНОВА, В.Д. ВОРОНЧИХИН

УСТОЙЧИВОСТЬ К СТАРЕНИЮ НЕФТИАНОГО ДОРОЖНОГО БИТУМА, МОДИФИЦИРОВАННОГО МАЛОКАРБОКСИЛИРОВАННЫМИ ПОЛИБУТАДИЕНАМИ

Целью работы является улучшение качества битума, получение материала, обладающего необходимым комплексом дорожно-строительных свойств. Рассмотрена устойчивость к старению нефтяного дорожного битума, модифицированного малокарбоксилированными полибутиддиенами. С целью оценки влияния олигомерных полибутиддиеновых каучуков с различными функциональными группами на концах макромолекулярной цепи на старение вяжущего были изучены некоторые физико-механические свойства получаемых ПБВ до и после испытания на старение. Установлено, что применение низкомолекулярных каучуков с функциональными группами на концах макромолекулярной цепи, содержащих в своем составе фенольные и аминные антиоксиданты (СКД-0, СКД-ГТРА, СКД-КТР в концентрации 5–8 %), позволяет повысить устойчивость полимербитумного вяжущего к термоокислительной деструкции.

Ключевые слова: битум, модификаторы, низкомолекулярный каучук, концевые функциональные группы, окислительная деструкция, старение, устойчивость.

Известно, что за время приготовления асфальтобетонной смеси, ее укладки и при последующей эксплуатации дорожного покрытия вяжущее как битум, так и полимербитумное вяжущее (ПБВ) подвергается старению. При этом старение полимербитумной композиции может происходить за счет старения как битума, так и полимера^{1–3}.

При старении асфальтобетонных покрытий под воздействием движущегося транспорта, солнечной радиации идут физические процессы, размягчение и постепенное расслоение битума в поверхностном слое асфальтобетона, а также сложные структурные и химические превращения. Очевидным и доказанным фактом является наличие стадии термоокислительной деструкции при старении битума. Процесс окисления углеводородов (к ним относится и битум) рассматривается учеными как цепной радикальный процесс с вырожденным разветвлением цепи [1].

¹ Гохман Л.М. Комплексные органические вяжущие материалы на основе блок-сополимеров типа СВС. М.: ЗАО «ЭКОНИНФОРМ», 2004. 510 с.

² Приготовление смесей Кратон и битума / Shell Chemicals. Информационный бюллетень. K0207. 2002. 10 с.

³ Micaelo R., Santos A., Duarte C. Mixing and compaction temperatures of asphalt mixtures with modified bitumen / Proceedings of 5 th Euraphalt & Eurobitume Congress. Istanbul. 2012. Juni. 7 р.

© Киселев В.П., Шевченко В.А., Василовская Г.В., Иванова Л.А., Ворончихин В.Д.,
2015

Однако и сам технологический цикл подготовки битума и получения асфальта вносит существенный вклад в процесс ухудшения качества битума. Битум на АБЗ претерпевает следующий технологический температурно-временной цикл: обезвоживание ~10–15 ч при 105–110 °C (при этом, как правило, происходит локальный перегрев битума на поверхности нагревательных элементов — тенов до температуры 200–220 °C); разогрев и перемешивание 1–2 мин при 170 °C; доставка к месту укладки и укладывание 2–4 ч при 165–130 °C. В результате битум претерпевает большую температурную деградацию, чем за последующее время эксплуатации в дорожном покрытии.

При повышенных температурах, в присутствии кислорода воздуха в битумах происходит структурирование материала. Исходя из строения битума, следует, что более низкомолекулярные компоненты битума — масла и смолы при окислении превращаются в асфальтены. Битум становится хрупким даже при нулевой температуре, теряет эластические и пластические свойства.

Для увеличения пластиичности, снижения температуры хрупкости и повышения сцепления с каменным материалом битума ранее нами были предложены малокарбоксилированные полибутидановые каучуки, способные полностью растворяться в битуме.

Цель работы — исследование влияния малокарбоксилированных полибутиданов на устойчивость к старению получаемых полимербитумных вяжущих.

В работе использовали битум Ачинского НПЗ марки БНД 90/130 ГОСТ 22245–90. Для модификации свойств вяжущего использовали олигомерные полибутидановые каучуки с различными функциональными группами на концах макромолекулярной цепи, синтезированные в ФГУП НИИ СК, г. Санкт-Петербург: СКД-О ТУ38.103570–84 (на концах цепи имеются азотсодержащие остатки инициатора нитрилобутиллития, образовавшиеся при его дезактивации мочевиной или метилпирролидоном). Каучук с концевыми гидроксильными группами СКД-ГТРА ТУ38.103315–86 получен радикальной полимеризацией с использованием в качестве инициатора 4,4'-азобис-4-цианопентанола. Каучук с концевыми карбоксильными группами СКД-КТР ТУ003393–99 получен радикальной полимеризацией с использованием в качестве инициатора 2,2'-азо-бис-4-карбокси-2-метилбутиронитрила.

Основные показатели каучуков: консистенция — вязкотекучая масса; среднечисловая молекулярная масса M_n : СКД-0 — 3000, СКД-ГТРА — 1700; СКД-КТР — 1700; динамическая вязкость при 25 °C Па · с, СКД-0 — в пределах 2,4; СКД-ГТРА — 7,5; СКД-КТР — 22; содержание антиоксиданта ионола или диафена, % мас. — 0,5–1,0; массовая доля кислородсодержащих групп, %, соответственно 0; 1,6; 3,0.

Модификацию битума проводили путем перемешивания компонентов в металлической емкости при температуре получения асфальтобетона — 160 °C в течение 30 мин.

Для оценки влияния олигомерных полибутидановых каучуков с различными функциональными группами на концах макромолекулярной цепи на старение вяжущего были изучены некоторые физико-механические свойства получаемых ПБВ до и после испытания на старение. Устойчи-

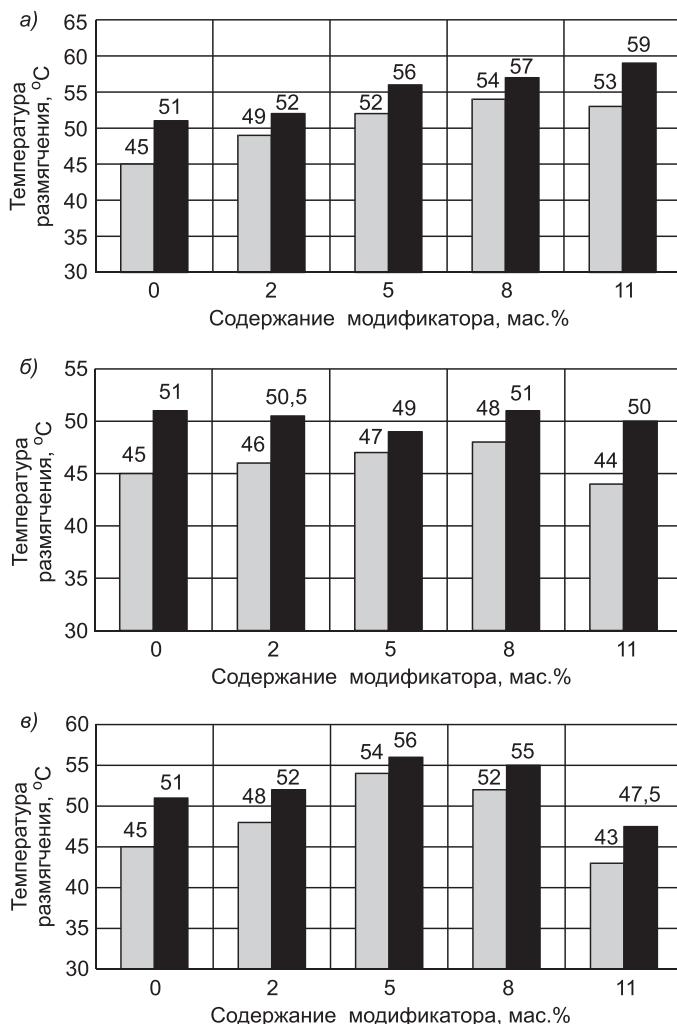
вость к старению оценивали по изменению пенетрации и температуры размягчения после прогрева в условиях испытания по ГОСТ 18180–72 и ОДМ 218.2.004–2006.

При исследовании влияния малокарбоксилированных низкомолекулярных полибутадиеновых каучуков на старение ПБВ использовались следующие методы испытания:

— температуру размягчения по методу «кольцо и шар» определяли по ГОСТ 11506–73; ГОСТ 11505–75;

— пенетрацию определяли согласно ГОСТ 11502–82.

После выдерживания в чашках Петри (толщина слоя 4 мм) при 163 °С в течение 5 ч битума и полученных ПБВ происходит термоокислительная деструкция (старение) образцов, что сказывается на изменении пенетрации, температуре размягчения и убыли массы. Результаты приведены на рис. 1, 2.



*Рис. 1. Зависимость температуры размягчения (по КиШ) композиционного вяжущего от содержания модификатора
а — СКД-0; б — СКД-ГТР; в — СКД-КТР до (□) и после (■) прогрева вяжущего в слое толщиной 4 мм при 163 °С в течение 5 ч*

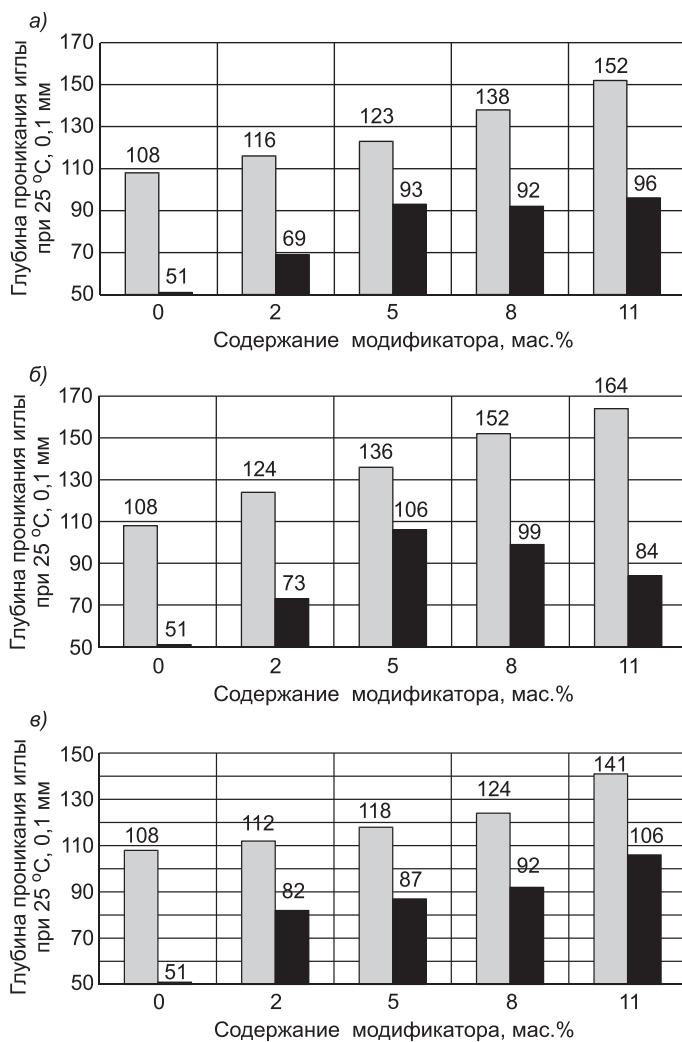


Рис. 2. Зависимости глубины проникания иглы (пенетрации при 25 °C) композиционного вяжущего от содержания модификатора

Условн. обозн. см. на рис. 1

Исследования показали, что убыль массы образцов битума после старения составляла 1,2 %, а всех изученных образцов ПБВ соответственно не более 0,8 % при 2–8%-ной концентрации олигомеров полибутидиена. Остаточная пенетрация образцов битума после испытания составила 47 %, что немного лучше, чем рекомендовано отраслевыми рекомендациями ОДМ 218.2.004–2006 (не менее 43 %), ПБВ значительно превосходит контрольные цифры во всем исследованном концентрационном диапазоне. Изменение температуры хрупкости после старения как для битума, так и для всех образцов ПБВ, полученных с использованием СКД-0, СКД-ГТРА, СКД-КТР, не выходит за пределы Δ3 °C.

Как видно из диаграмм, представленных на рис. 1, 2, при наличии более активной функциональной группы устойчивость вяжущего к старению возрастает (СКД-0 не имеет специально введенной функциональной группы; функциональная группа COOH более активна, чем OH, поэтому

устойчивость к старению при применении модификатора возрастает в ряду СКД-0–СКД-ГТРА–СКД-КТР).

Если судить по температуре размягчения (см. рис. 1), наибольшая устойчивость вяжущего к термоокислительной деструкции наблюдается при концентрации полимера 5–8 %, следовательно, данные концентрации оптимальны для приготовления модифицированного вяжущего.

Окислительная деструкция битумов и диеновых полимеров происходит через стадию образования перекисных соединений. Согласно [2] кислород присоединяется по месту двойной связи дивинильного блока. Перекиси, разлагаясь, образуют свободные радикалы, которые стабилизируются или путем разрыва цепи, или их реакции с еще неокисленными молекулами. При этом происходит разветвление полимерной цепи, и если этот процесс протекает в массе битума, сшивка макромолекул полимера и структурных единиц битума. Данный процесс должен приводить к повышению температуры размягчения битума. Однако при низкой молекулярной массе полимера полимер будет проявлять свойства пластификатора, снижая температуру размягчения. Как показывают результаты исследований, одновременно протекают оба процесса и при концентрации 2–8 % эффект от влияния деструктирующих факторов становится минимальным. При увеличении концентрации полимера > 8–12 % преобладают и процессы разветвления цепи с образованием сшивок и за счет большего связывания полимером мальтеновой части битума снижается пластифицирующий эффект от присутствия низкомолекулярных каучуков.

В дистиллятные топлива, масла, смазки вводят различные по характеру защитного действия добавки, в том числе антиокислительные [1]. Для замедления протекания реакций структурирования в битумы в качестве стабилизатора физико-механических свойств предложены ацетонаил и другие добавки [3, 4]. Альтернативой этому частично может являться добавка в битум для улучшения свойств невулканизированных эластомеров, также содержащих в своем составе фенольные или аминные антиоксиданты. Такие эластомеры, как показывают проведенные нами эксперименты, положительно влияют на старение.

Следует отметить, что в отличие от ПБВ, приготовленных с использованием индустриального масла для растворения эластомеров или другой полимерной матрицы, которое ускоряет старение ПБВ, использованные в работе низкомолекулярные каучуки уже содержат в своем составе 0,5–1,0 мас. % высокоеффективных антиоксидантов ионола или диафена. Присутствие антиоксидантов повышает устойчивость материала к термоокислительной деструкции. Только по мере израсходования антиоксидантов активируется процесс деструкции битума и полимера.

Выводы. Таким образом, можно констатировать, что низкомолекулярные малокарбоксилированные полибутидановые каучуки СКД-0, СКД-ГТРА, СКД-КТР, вводимые для улучшения качественных показателей дорожного битума в количествах 5–8 мас. %, являются достаточно эффективными антиоксидантами для нефтебитумных композиций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вишнякова, Т.П. Стабилизаторы и модификаторы нефтяных дистиллятных топлив [Текст] / Т.П. Вишнякова, И.А. Голубева, И.Ф. Крылов, О.П. Лыков. — М. : Химия, 1990. — 192 с.
2. Полякова, В.И. Особенности получения и применения полимерно-битумных вяжущих в дорожном строительстве [Текст] / В.И. Полякова, С.В. Полякова // Сборник трудов ФГБУ «РосДорНИИ». — 2013. — Вып. 29; <http://rosdornii.ru/files/dorogi-i-mosti/9-8-13/23>.
3. Киселев, В.П. Стабилизация свойств нефтяного дорожного битума [Текст] / В.П. Киселев, М.Б. Бугаенко, Н.В. Кеменев // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 2. — С. 69–75.
4. Киселев, В.П. Влияние добавок, обладающих антиоксидантной активностью, на качество асфальтобетонных смесей [Текст] / В.П. Киселев, М.Б. Бугаенко, Н.В. Кеменев // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 3. — С. 49–55.

КИСЕЛЕВ Владимир Петрович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Wkiselev001@yandex.ru
Политехнический институт Сибирского федерального университета, г. Красноярск

ШЕВЧЕНКО Валентина Аркадьевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: kafsmi@mail.ru
Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, г. Красноярск

ВАСИЛОВСКАЯ Галина Васильевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: vasgv21n@mail.ru
Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, г. Красноярск

ИВАНОВА Людмила Алексеевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: Lusya54@yandex.ru
Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, г. Красноярск

ВОРОНЧИХИН Василий Дмитриевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: vvd-77@mail.ru
Сибирский государственный технологический университет, г. Красноярск

Получено после доработки 19.02.15

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

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

Vasilovskaya Galina Vasilievna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: vasgv21n@mail.ru, Civil Engineering Institute Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Ivanova Ludmila Alekseevna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: Lusya54@yandex.ru, Civil Engineering Institute Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Voronchikhin Vasiliy Dmitrievich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: vvd-77@mail.ru, Siberian State Technological University, Krasnoyarsk, Russia

AGEING RESISTANCE OF PETROLEUM ROAD ASPHALT MODIFIED BY LOW CARBOXILATED POLYBUTADIENES

The aim of the work is the improvement of bitumen quality, receipt of material with the necessary set of road-building properties. Ageing resistance of petroleum road asphalt modified by low carboxilated polybutadiene is considered in the work. Some physical and mechanical properties obtained the polymer asphaltic binders before and after the ageing test

were studied in order to the impact assessment of liquid polybutadiene rubbers with various functional groups at the ends of macromolecular chain to the ageing of binder. It was found that the use of low-molecular rubbers with functional groups at the ends of the macromolecular chain containing it its composition the phenolic and amine antioxidants (SKD-0, SKD-GTRA, SKD-CTE concentration is 5–8 %). It let to increase the stability of polymer-bitumen binder to the thermo-oxidative degradation.

Key words: bitumen, modifiers, low molecular polybutadiene rubbers, terminal functional groups, oxidative destruction, ageing resistance.

REFERENCES

1. Vischnyakova, T.P. The stabilizers and modifiers of petroleum distillate fuels [Text] / T.P. Vischnyakova, I.A. Golubeva, I.F. Krylov, O.P. Lykov. — M. : Chemistry, 1990. — 192 p.
 2. Polyakova, V.I. The characteristics of obtaining and usage polymerobitumen binders in the road construction [Text] / V.I. Polyakova, S.V. Polyakova // Collection of works FGBY «RosDorNII». — 2013. — Issue 29; <http://rosdornii.ru/files/dorogi-istosti/9-8-13/23>.
 3. Kiselev, V.P. The stabilization of properties of petroleum road asphalt [Text] / V.P. Kiselev, M.B. Bugaenko, N.V. Kemenev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 2. — P. 69–75.
 4. Kiselev, V.P. The influence of additives containing the antioxidant activity on the quality of asphalt concrete mixtures [Text] / V.P. Kiselev, M.B. Bugaenko, N.V. Kemenev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 3. — P. 49–55.
-

УДК 625.73:624.143.2

Г.К. ЩЕПОТИН, Н.А. МАШКИН

ПОВЫШЕНИЕ МОРОЗОУСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Представлены результаты исследования влияния морозного пучения грунтов на морозоустойчивость полотна автомобильных дорог. При морозном пучении развиваются недопустимые неравномерные деформации полотна дороги, которые ускоряют разрушение дорожных одежд. Для снижения величины деформаций пучения в продольном профиле предлагается использовать укладку накладных подушек из асбестового балласта, что уменьшает глубину промерзания и объем земляных работ. Стоимость асбестового балласта почти в 3 раза меньше стоимости щебеноочно-песчаных смесей. Асбестовый балласт также обладает противопучинными свойствами, высокой несущей способностью и сопротивляемостью вибрационным воздействиям, незначительной водопроницаемостью и относительно постоянным влажностным режимом эксплуатации.

Ключевые слова: полотно автомобильных дорог, морозное пучение, неравномерные деформации, асбестовый балласт, морозоустойчивость.

Эксплуатационная надежность автомобильных дорог во многом определяется состоянием земляного полотна. Вместе с тем значительную часть территории РФ составляют участки с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, которые характеризуются большими суточными и годовыми перепадами температур воздуха, наличием пучинистых грунтов, высоким горизонтом грунтовых вод, плохо обеспеченным поверхностным стоком. При строительстве в этих условиях важно учитывать морозное пучение грунтов земляного полотна. Условиями пучения являются значительное увлажнение грунтов и их промерзание. Исключение любого из этих условий (а тем более обоих) предотвращает само пучение.

Характерная особенность морозного пучения грунтов — его неравномерность как по простианию, так и по глубине в пределах зоны промерзания. Это обуславливается неоднородностью грунтов и неравномерностью их увлажнения. Неравномерное пучение зимой и неравномерные весенние просадки сопровождаются образованием на покрытиях автомобильных дорог трещин, которые ускоряют разрушение дорожных одежд.

В результате сезонного промерзания — оттаивания земляного полотна существенно изменяются такие важные показатели состояния грунтов, как их влажность и плотность. Значения коэффициента пористости e в период оттаивания грунтов оснований превышают осенние величины e на 15 % (рис. 1). При этом величина пучения составляет всего 25–35 мм.

Консистенция грунтов также изменяется по сезонам года. Если осенью мягкотекучая и текучая консистенция наблюдается только у 4 % отобранных проб грунтов, то весной — у 27 % (рис. 2).

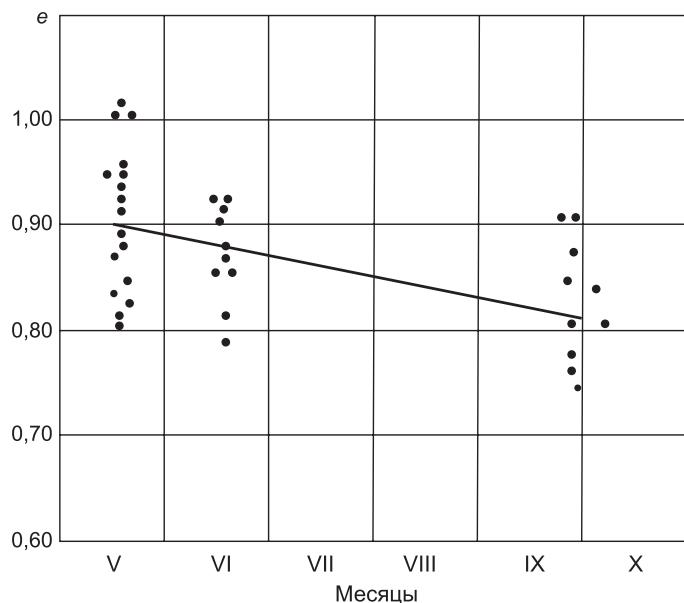


Рис. 1. Изменение коэффициента пористости e глинистых грунтов по сезонам года

В холодных климатических условиях Сибири в течение года наблюдаются значительные изменения водно-теплового режима земляного полотна. В осенний период влажность земляного полотна из-за обильных атмосферных осадков может достигнуть 70 % от W_L . Процесс увлажнения продолжается до установления отрицательных температур воздуха. В дальнейшем при промерзании грунтов опускается граница промерзания, вызывая подтягивание влаги из талого слоя грунта в зону промерзания. При этом влажность возрастает до 85 % от W_L . При промерзании таких увлажненных глинистых грунтов увеличивается объем грунта за счет процесса льдообразования (при оттаивании таких грунтов происходит разуплотнение).

В конце зимы наступает равногодническое состояние влаги в земляном полотне (влажность практически не меняется). Глубина промерзания и величина пучения достигают максимума. В наступивший весенний период сходит снеговой покров, резко поднимаются грунтовые воды. По мере оттаивания уменьшается морозное пучение (оттаивают ледяные линзы и ледяные прослойки). Оттайвание мерзлых грунтов земляного полотна сопровождается снижением их несущей способности и образованием просадок оснований. Поэтому

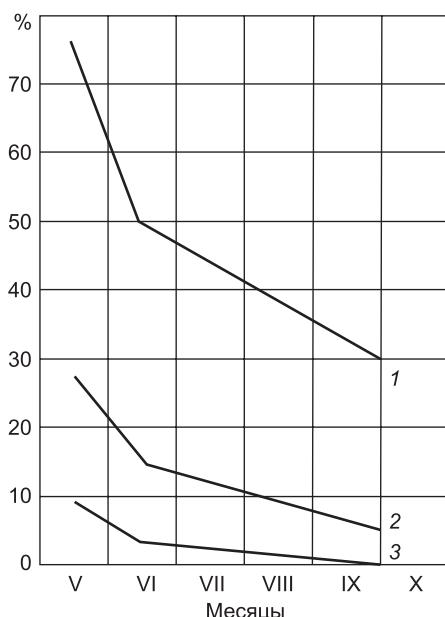


Рис. 2. Динамика консистенции I_L глинистых грунтов земляного полотна по сезонам года:

1 — $I_L > 0,25$; 2 — $I_L > 0,50$; 3 — $I_L > 0,75$

весной на покрытии нежесткого типа обычно образуется сетка трещин в виде паутины.

Для решения практических задач предупреждения недопустимых деформаций важно установить зависимость последних от величины морозного пучения. Исследования подтверждают, что эта зависимость имеет вероятностный характер [1].

Степень неравномерности деформаций пучения в продольном профиле можно оценить коэффициентом K_h , определяемым как

$$K_h = \frac{[h_{i+1} - h_i]}{l}, \quad (1)$$

где h_i и h_{i+1} — величины пучения в двух соседних точках, мм; l — расстояние между этими точками.

Величина K_h выражает местные дополнительные продольные уклоны, формирующиеся в результате неравномерности морозного пучения.

Зная K_h , можно определить алгебраическую разность ΔK_h местных уклонов смежных элементов дороги

$$\Delta K_h = |K_{h(i+1)} - K_{h(i)}|. \quad (2)$$

Анализ натурных замеров величины пучения через каждые 5 м (объем выборки 1973 замера) позволил установить зависимость $\bar{\Delta K}_h$ в промилле от величины h пучения в миллиметрах в виде (коэффициент корреляции равен 0,86)

$$\bar{\Delta K}_h = 0,741 + 0,012h. \quad (3)$$

Характерная гистограмма частот распределения ΔK_h при $h = 60$ мм приведена на рис. 3.

Аналогичные гистограммы получены и при других значениях h . Это позволило выдвинуть гипотезу об экспоненциальном законе распределения величины ΔK_h с плотностью вероятностей

$$\rho(\Delta K_h) = \lambda \exp(-\lambda \Delta K_h), \quad (4)$$

где λ — параметр экспоненциального закона распределения;

$$\lambda = \frac{1}{\bar{\Delta K}_h}. \quad (5)$$

Вероятность P_h появления величины больше некоторого заданного значения $[\Delta K_h]$ можно определить, учитывая (4), по формуле

$$P_h \{ \Delta K_h > [\Delta K_h] \} = \exp\{-\lambda [\Delta K_h]\}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно переписать с учетом (3) и (5)

$$P_h \{ \Delta K_h > [\Delta K_h] \} = \exp\left\{-\frac{[\Delta K_h]}{0,741 + 0,012h}\right\}. \quad (7)$$

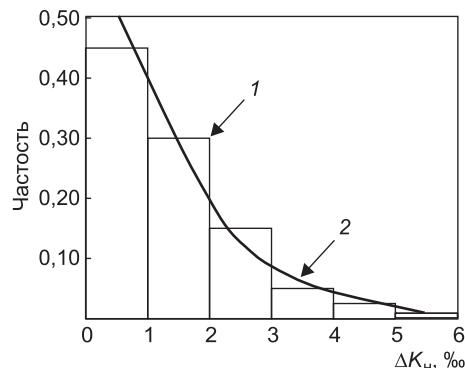


Рис. 3. Гистограмма частот распределения алгебраической разности ΔK_h при пучении 60 мм
1 — опытные данные; 2 — экспонента

Полученная формула (7) описывает зависимость между вероятностью P_h появления недопустимой неравномерности покрытия в продольном профиле и величиной морозного пучения. Практическим аналогом вероятности P_h является длина продольного профиля в метрах на 1 км.

Зависимости вероятности P_h от величины морозного пучения при значениях $[\Delta K_h]$, равных 0,002 (кривая 1) и 0,003 (кривая 2), приведены на рис. 4.

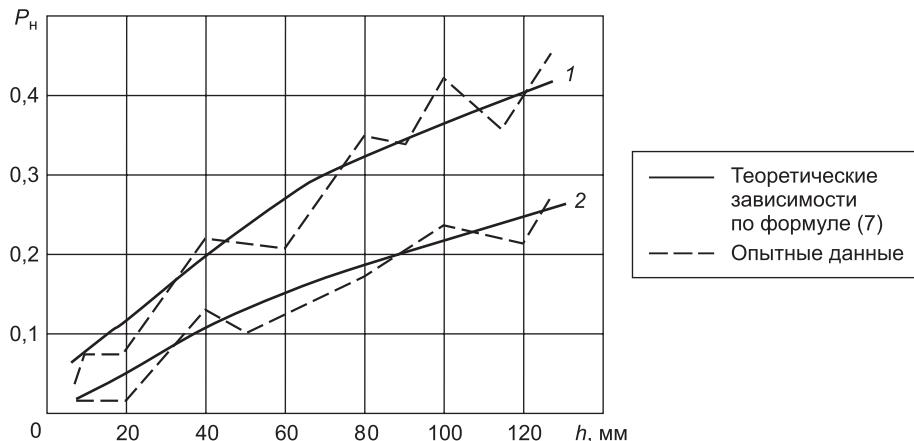


Рис. 4. Зависимость вероятности P_h от величины морозного пучения h

1 — при $\Delta K_h = 2\%$; 2 — при $\Delta K_h = 3\%$

Из анализа графиков видно, что даже при небольших величинах пучения существует вероятность появления неравномерных деформаций земляного полотна. Таким образом, равномерного пучения, как правило, не бывает, причем чем больше величина пучения, тем выше искажение продольного и поперечного профилей земляного полотна.

Эксплуатация дорог показывает, что процессы промерзания — оттаивания земляного полотна существенно ускоряют разрушение дорожных покрытий и требуют проведения их более частых ремонтов.

Поэтому автомобильные дороги на участках с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями строят с выполнением большого объема земляных работ для улучшения водно-теплового режима земляного полотна [2]. Требуемая прочность и морозоустойчивость дорожной одежды обеспечивается путем возвышения ее до 2 м над поверхностью земли и горизонтом поверхностных и грунтовых вод в сочетании с устройством морозозащитных слоев (толщиной до 0,5 м) из кондиционных песков.

В выемках, а также в населенных пунктах, где ограничивается высота насыпей, требуется устройство еще более мощного морозозащитного слоя (до 2/3 глубины промерзания). Вследствие этого существенно возрастает стоимость сооружения земляного полотна. В условиях экономического кризиса разработка мероприятий по снижению объема земляных работ при строительстве новых и повышению надежности оснований при реконструкции эксплуатируемых дорог является актуальной задачей.

Для ликвидации морозного пучения оснований рекомендуется замена пучинистых грунтов на непучинистые. При этом изменяется и глубина промерзания земляного полотна [1]. Глубина промерзания зависит от вида грунтов. Это обусловлено разными теплофизическими характеристиками укладываемых материалов.

Для оценки глубины промерзания удобно воспользоваться методом эквивалентности. В этом случае расчет выполняется на основе эквивалентности, т.е. приведения глубины промерзания конкретной многослойной конструкции к глубине промерзания эталонного грунта, в качестве которого принимают тяжелый суглинок. Коэффициент эквивалентности R_i представляет собой отношение глубины промерзания Z_i данного материала к глубине промерзания Z_e эталонного грунта

$$R_i = \frac{Z_i}{Z_e}. \quad (8)$$

Значения коэффициентов эквивалентности приведены в таблице.

Из таблицы следует, что при замене пучиноопасных глинистых грунтов на дренирующие песчаные существенно увеличивается глубина промерзания. Учитывая коэффициенты эквивалентности и расчетную глубину промерзания для дорог Сибири (более 2 м), несложно убедиться насколько мощной и дорогостоящей должна быть противодеформационная конструкция с использованием щебеночно-песчаных смесей. В то же время укладка накладных подушек из асбестового балласта уменьшает глубину промерзания, а следовательно, и объем земляных работ. Стоимость асбестового балласта почти в 3 раза меньше, чем стоимость щебеночно-песчаных смесей.

Основной производитель данного вида балласта в Российской Федерации — ОАО «Ураласбест», который является первым предприятием в России, получившим от немецкого органа по сертификации «TUV-SEPT» сертификат на систему менеджмента качества в области производства нерудных строительных материалов по международному стандарту ISO-9001 [3].

Асбестовый балласт представляет собой мелкие фракции дробленых пород (серпентиниты) с небольшим содержанием свободных волокон несортового хризотил-асбеста. Требования ТУ [4] к асбестовому балласту по зерновому составу следующие. Зерен размером более 25 мм должно быть не более 20 %, а размером 0,14 мм и менее — 80–100 %. Зерновой состав асбестового балласта близок к гравелистому песку.

Мелкие частицы балласта в уплотненном состоянии, защемляя свободные волокна, образуют естественно армированную структуру. Для образования такой уникальной структуры необходимо, чтобы размеры зерен балласта не превышали размеров свободных волокон, имеющих обычно длину 0,25–1 мм. Асбестовый балласт уплотняется очень интенсивно со сравнительно равномерной величиной осадки [5]. О появлении

Коэффициенты R_i

Грунты и материалы	R_i
Суглинок	1,00
Супесь	1,10
Пески гравелистые	1,20
Щебень	1,50
Асбестовый балласт	0,90

структурных связей в асбестовом балласте после уплотнения свидетельствует устойчивое положение откосной части призмы, практически вертикальной (рис. 5). Напомним, что предельно устойчивый откос из сыпучего грунта (щебень, песок) имеет прямолинейный контур с углом наклона к горизонту, равным углу внутреннего трения.



Рис. 5. Откосы асбестового балласта и автомобильная дорога из данного материала

В отличие от щебеночно-песчаных смесей асбестовый балласт обладает также специфическими водными свойствами: впитывает воду, имеет хорошую водоудерживающую и слабую фильтрационную способность в уплотненном состоянии ($0,2 \text{ м/сут}$, что соответствует недренирующим грунтам). Поэтому асбестовый балласт сбрасывает воду по поверхности призмы на откосы, не допуская переувлажнения нижележащих глинистых грунтов земляного полотна [1].

Таким образом, к числу благоприятных качеств асбестового балласта следует отнести высокие противопучинные свойства, высокую несущую способность и сопротивляемость вибрационным воздействиям, незначительную водопроницаемость и относительно постоянный влажностный режим, а также стоимость, которая почти в 3 раза меньше, чем стоимость используемых щебеночно-песчаных смесей.

Применение асбестового балласта на железнодорожной линии Тобольск — Сургут позволило эффективно бороться с пучинными деформациями в условиях очень холодного климата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щепотин, Г.К. Эксплуатационная надежность железнодорожного пути [Текст] / Г.К. Щепотин. — Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2009. — 144 с.
2. Рувинский, В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна [Текст] / В.И. Рувинский. — М. : Транспорт, 1982. — 166 с.

3. Осинцев, А.А. Производство строительных материалов ОАО «Ураласбест» [Текст] / А.А. Осинцев // Промышленный транспорт Урала. — 2007. — № 4–5. — С. 21–23.
4. Смесь песчано-щебеночная из отсевов дробления серпентинитов для балластного слоя железнодорожного пути. ТУ 32-ЦП-782-92 [Текст]: утв. 15.08.92. — М., 1992.
5. Методические рекомендации по применению асбестового балласта на железнодорожном транспорте [Текст]: утв. 07.08.08 / М-во промышленности и науки Свердловской области. — Екатеринбург, 2008. — 13 с.

*ЩЕПОТИН Георгий Константинович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*МАШКИН Николай Алексеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mashkin@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 17.02.15

Shchepotin Georgiy Konstantinovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Mashkin Nikolay Alekseevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mashkin@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

IMPROVEMENT OF ROAD SUBGRADE FROST

Results of research of influence of a frosty pucheniye of soil on frost resistance of a cloth of highways are presented. At a frosty swelling inadmissible uneven deformations of a roadbed which accelerate destruction of road clothes develop. For decrease in size of deformations of a swelling in a longitudinal profile it is offered to use laying of laid on pillows from an asbestos ballast that reduces depth of frost penetration and volume of earthwork. The cost of an asbestos ballast is nearly 3 times less than the cost of crushed-stone-sand mixes. The asbestos ballast also possesses swelling properties, the high bearing ability and resilience to vibration influences, insignificant water penetration and rather constant moisture conditions of operation.

Key words: cloth of highways, frosty swelling, uneven deformations, asbestos ballast, frost resistance.

REFERENCES

1. Schepotin, G.K. Operational reliability of railway [Text] / G.K. Schepotin. — Ekaterinburg : Publishing house Ural gos. university communications, 2009. — 144 p.
2. Ruvinskiy, V.I. Optimal design of the roadbed [Text] / V.I. Ruvinskiy. — M. : Transport, 1982. — 166 p.
3. Osintsev, A.A. Production of construction materials for «Uralasbest» OJSC [Text] / A.A. Osintsev // Industrial vehicles in the Urals. — 2007. — N 4–5. — P. 21–23.
4. Mixture of sand and gravel from the screenings of crushing serpentinite for railway track ballast. Technical specification 32-CP-782-92 [Text] : approved 15.08.92. — M., 1992.
5. Guidelines for the use of asbestos ballast on railway transport [Text]: approved 07.08.08 / Ministry of industry and science of the Sverdlovsk region . — Ekaterinburg, 2008. — 13 p.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Л.А. АДЕГОВА

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

При использовании традиционной методики совпадение прогнозируемой долговечности и долговечности, полученной при стендовых испытаниях тонкостенных элементов, широко применяемых в различных строительных конструкциях, не всегда бывает удовлетворительной. Представлена усовершенствованная методика численного прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций посредством использования модифицированных кривых усталости, учитывающих влияние конструктивно-технологических особенностей изделий реальной конструкции. Приведенные результаты расчетной оценки долговечности тонкостенных конструкций, основанные на использовании модифицированных кривых усталости, соответствуют результатам выносливости стендовых испытаний.

Ключевые слова: коэффициенты коррекции, усталостная долговечность, тонкостенные конструкции, анализ напряженно-деформированного состояния, модифицированные кривые усталости.

Традиционная методика расчета усталостной долговечности элементов конструкций базируется на использовании кривых усталости типовых образцов (чаще всего с отверстием с теоретическим коэффициентом концентрации напряжений $k_t = 2,6$). Изданы справочные материалы по долговечности гладких образцов и образцов с различными концентраторами напряжений [1]. Однако из-за большого разнообразия возможных конструктивных решений не удается получить базовые кривые усталости для всех расчетных случаев. Кроме того, значимое влияние на долговечность элементов конструкций оказывает технология производства. Поэтому при прогнозировании усталостной долговечности учет влияния конструктивно-технологических факторов осуществляется через введение коэффициентов коррекции, установленных на основании имеющегося опыта и накопленных экспериментальных данных. Коэффициенты коррекции широко применяют в практике расчета долговечности конструкций отечественными и зарубежными фирмами [2, 3].

Традиционная методика оценки усталостной долговечности включает следующие этапы [4]:

1. Создание конечно-элементной модели (КЭМ).
2. Определение граничных условий.
3. Задание циклограммы нагружения.
4. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС). Определение наиболее нагруженных (критических) зон конструкции.

5. Обработка циклограмм напряжений методом «полных циклов» для каждой критической зоны с получением спектра напряжений в виде асимметричных циклов с экстремумами σ_{\max} , σ_{\min} .

6. Приведение асимметричных циклов к эквивалентным по вносимому усталостному повреждению отнулевым циклам по формулам:

$$\sigma_{0i} = \begin{cases} \sqrt{\sigma_{\max} \times (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}, & \sigma_m \geq 0 \\ \sqrt{2} \times (0,6 \times \sigma_{\max} - 0,4 \times \sigma_{\min}), & \sigma_m < 0, \quad \sigma_{\max} > 0. \\ 0, & \sigma_{\max} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ — среднее напряжение цикла.

7. Определение согласно гипотезе линейного суммирования повреждений максимального значения одного отнулевого цикла, эквивалентного по вносимому усталостному повреждению всему блоку нагружения:

$$\sigma_{0\max} = \sqrt[m]{\sum (n_i \times \sigma_{0i}^m)}, \quad (2)$$

где n_i — число отнулевых циклов с максимальным значением σ_{0i} ;
 m — показатель кривой усталости.

8. Подбор базовых кривых усталости стандартных образцов

$$N\sigma_{\text{бр}}^m = A_{\text{бр}}, \quad (3)$$

где $A_{\text{бр}}$ — параметр кривой усталости;
 $\sigma_{\text{бр}}$ — напряжение образца в сечении брутто.

9. Вычисление расчетной долговечности из соотношения

$$N_p = \frac{A_{\text{бр}}}{\sigma_{0\max}^m} \times k_{\text{кор}}. \quad (4)$$

Здесь $k_{\text{кор}}$ — коэффициент коррекции, позволяющий учитывать конструктивно-технологические особенности конструкции.

При использовании традиционной методики совпадение прогнозируемой долговечности и долговечности, полученной при стендовых испытаниях конструкции, не всегда бывает удовлетворительной. Часто при проведении экспресс-анализа отсутствуют требуемые кривые усталости и подбирают ближайшие по характеристикам из имеющихся. Поэтому были проведены исследования по совершенствованию традиционной методики расчета усталостной долговечности посредством использования модифицированных кривых усталости, учитывающих конструктивно-технологические решения в изделии [5].

Методика модификации основана на следующем:

1. Экспериментально установлено, что в некотором диапазоне долговечностей (\approx при $2 \times 10^4 \leq N \leq 5 \times 10^6$ циклов) функции $\lg N_i = f(\lg \sigma_i)$ линейны. При расчете усталостной долговечности все циклы нагружения приводятся к отнулевым. В этом случае в двойных логарифмических координатах при отнулевом нагружении уравнение базовой кривой усталости образцов (уравнение регрессии) имеет вид

$$\lg N_i = a + b \times \lg \sigma_{\max i}. \quad (5)$$

Здесь $\sigma_{\max i}$ — максимальное напряжение цикла нагружения;
 N_i — число циклов до разрушения на заданном уровне напряжения;

a и b — коэффициенты уравнения регрессии, которые определяются экспериментально на основании результатов усталостного эксперимента и формул линейного регрессионного анализа [6].

2. На основании статистической обработки результатов многочисленных усталостных испытаний образцов различного типа, изготовленных из конструкционных сплавов Д16АТ, АК4-1АТ1, 1163АТВ, 1201Т1, В95Т1, ВТ1-0, ПТ-7М, стали 12Х18Н10Т, при отнулевых циклах нагружения установлены закономерности изменения параметров функций $\lg N = f(\lg \sigma_{max})$ в зависимости от теоретического коэффициента концентрации напряжений, толщины образцов, температуры испытаний, частоты нагружения и др. Используя установленные закономерности, можно осуществлять расчет параметров уравнений кривых усталости при варьировании указанных факторов, т.е. модификацию кривых усталости [7, 8]. Далее расчет усталостной долговечности осуществляется по изложенной выше традиционной методике.

Объектом численных исследований являлись тонкостенные элементы несущей металлической конструкции, проходившей ресурсные стеновые испытания в лаборатории прочности. Для оценки напряженно-деформированного состояния была разработана конечно-элементная модель конструкции (рис. 1), предназначенная для проведения статического анализа в линейной постановке.

Расчетное нагружение соответствовало программному блоку, состоящему из трех типов подблоков «C», «D» и «E», отличающихся друг от друга

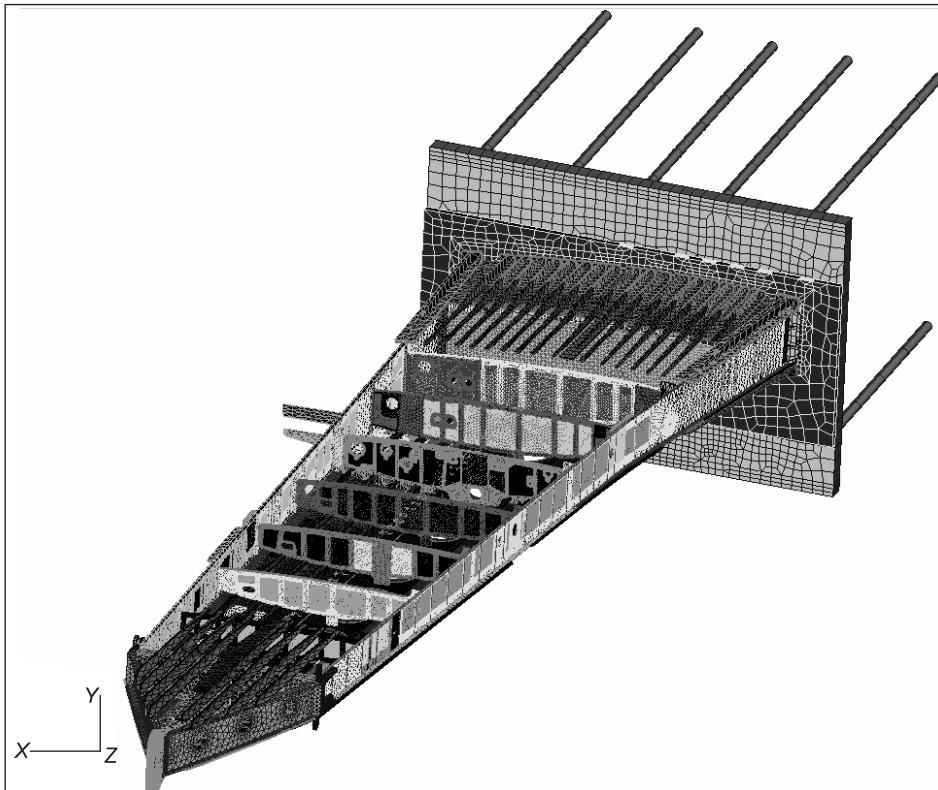


Рис. 1. Конечно-элементная модель несущей металлической конструкции

га интенсивностью нагрузок. При конечно-элементном анализе были приняты граничные условия, соответствующие граничным условиям при стендовых испытаниях. Анализ оценки долговечности проводился для нескольких наиболее нагруженных зон конструкции. В статье представлена зона, включающая область крепления ригеля с фитингом по вертикальной стенке (толщина $h = 4$ и теоретический коэффициент концентрации напряжений $k_t = 2,6$). Материал элементов конструкции 1163Т (модуль упругости первого рода $E = 71500$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$; предел прочности $\sigma_b = 450$ МПа).

Несмотря на то, что при стендовых испытаниях натурных конструкций осмотр наиболее нагруженных зон проводится с определенной периодичностью, не всегда удается зафиксировать момент зарождения разрушений. Для зоны конструкции, представленной в данной статье, только при наработке 8525 программных блоков нагружения удалось обнаружить трещину длиной $l = 30$ мм (рис. 2).

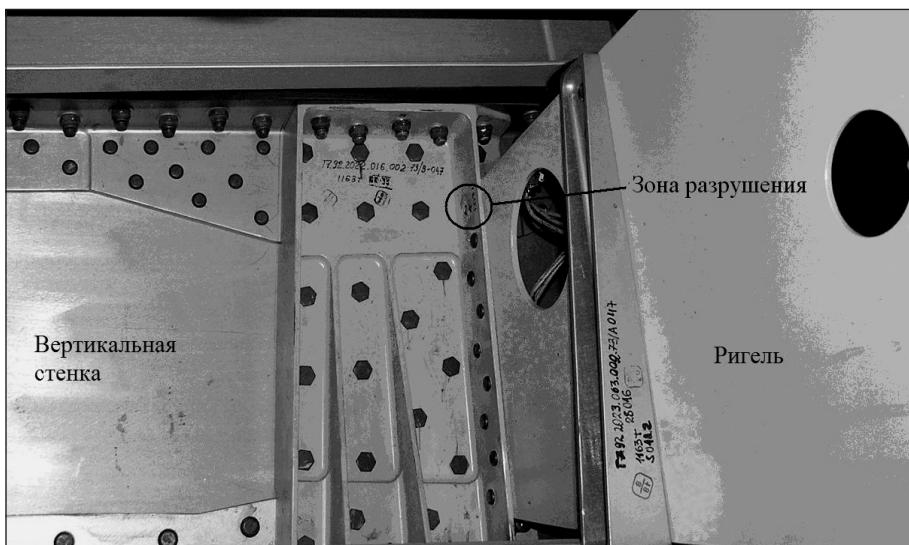


Рис. 2. Разрушение в конструкции

Численным экспериментом были определены уровни напряжений по кромке отверстия заклепки крепления ригеля с фитингом по вертикальной стенке для трех типов подблоков «C», «D» и «E».

В имеющихся справочных материалах [1] отсутствовали кривые усталости образцов из сплава 1163Т малых толщин ($h \leq 10$ мм). Поэтому при расчете по традиционной методике была использована кривая усталости стандартного образца (полоса с отверстием $k_t = 2,6$) толщиной 3 мм, изготовленного из сплава Д16ЧТ. Данная кривая описывается уравнением $N\sigma_{\text{бр}}^{6,45} = 4,524 \times 10^{12}$. Максимальное значение одного отнулевого цикла, эквивалентного по вносимому усталостному повреждению всему программному блоку нагружения (2) по кромке отверстия заклепки, составило $\sigma_{0\max} = 67,23$ кг / мм². В соответствии с соотношением (4) введен коэффициент коррекции [4] $k_{\text{кор}} = k_{tg}^m$, здесь $k_{tg} = 3,02$ — коэффициент кон-

центрации напряжений в стандартном образце относительно напряжений «брутто». Расчетная долговечность по традиционной методике для зоны разрушения имеет значение:

$$N_p = \frac{4,524 \times 10^{12}}{67,23^{6,45}} \times 3,02^{6,45} \approx 9200 \text{ программных блоков.}$$

Модификация кривых усталости осуществлена на основе кривых усталости образцов с отверстием из сплавов Д16ЧТ ($h = 3$ мм и $h = 30$ мм) и 1163Т ($h = 10\ldots16$ мм и $h = 30$ мм). Выбран диапазон напряжений, используемый при расчете ($\sigma_{\max} = 160\ldots250$ МПа). Используя установленные зависимости, вычислены коэффициенты уравнения регрессии для $h = 4$ мм, $k_t = 2,6$ и получено уравнение регрессии $\lg N = 18,3702 - 5,9382 \lg \sigma_{\max}$ (рис. 3).

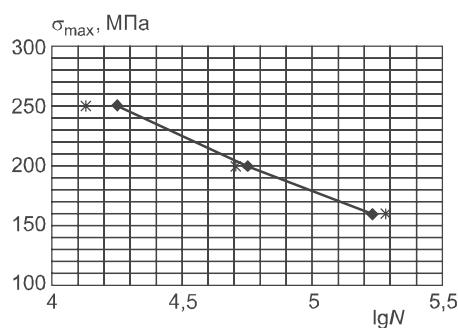


Рис. 3. Модифицированная кривая усталости

вносимому усталостному повреждению всему программному блоку нагрузения по кромке отверстия заклепки $\sigma_{0\max} = 71,19$ кг / мм^2 . Расчетная долговечность для зоны разрушения составила

$$N_p = \frac{1,19 \times 10^{12}}{71,19^{5,94}} \times 3,02^{5,94} \approx 8384 \text{ программных блока.}$$

Нужно иметь в виду, что в ходе циклических испытаний при $N_{\text{экк}} = 8525$ программных блоков была зафиксирована уже образовавшаяся усталостная трещина длиной 30 мм, поэтому расчетная долговечность, основанная на модификации кривых усталости, лучше отражает реальную ситуацию.

Выводы. При использовании методики расчета усталостной долговечности с использованием модифицированных кривых усталости, учитывающих конструктивные особенности фрагментов изделий, сходимость результатов прогнозирования усталостной долговечности ($N_p \approx 8384$ программных блока) и результатов стендовых испытаний ($N_{\text{экк}} = 8525$ программных блоков) выше, чем при использовании традиционной методики ($N_p \approx 9200$ программных блоков).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов: справочник [Текст]. — М. : ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация», 2011. — 304 с.
2. Стрижиус, В.Е. Методы расчета усталостной долговечности авиационных конструкций: справочное пособие [Текст] / В.Е. Стрижиус. — М. : Машиностроение, 2012. — 272 с.

3. Goranson, U.G. Long life damage tolerant jet transport structures. American society for testing and materials. Fatigue and fracture committees [Текст] / U.G. Goranson, J. Hall, J.R. Maclin, R.T. Watanabe // Symposium on «Design of fatigue and fracture resistant structures». Bal Harbour, Florida. November 10–11, 1980.
4. Б е л о в , В.К. Повышение усталостной долговечности высоконагруженных зон конструкций самолетов на этапе ресурсных испытаний [Текст] / В.К. Белов, Л.А. Адегова // Общероссийский журнал «Полет». — 2010. — № 9. — С. 19–26.
5. Р у д з е й , Г.Ф. Ускоренные усталостные испытания материалов и элементов конструкций ЛА [Текст] / Г.Ф. Рудзей // Авиационная промышленность.— 2011.— № 2.— С. 47–50.
6. С т е п н о в , М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник [Текст] / М.Н. Степнов, А.В. Шаврин. — М. : Машиностроение, 2005. — 344 с.
7. Р у д з е й , Г.Ф. Исследование механических характеристик материалов и конструктивных образцов из алюминиевых сплавов [Текст] / Г.Ф. Рудзей // Авиационная промышленность. — 2010. — № 2. — С. 27–30.
8. Б е л о в , В.К. Совершенствование методики определения коэффициентов коррекции в обеспечении достоверных характеристик усталостной долговечности элементов конструкций ЛА [Текст] / В.К. Белов, Г.Ф. Рудзей, А.А. Калюта, Л.А. Адегова // Общероссийский журнал «Полет».— 2011. — № 7. — С. 42–46.

*АДЕГОВА Людмила Алексеевна, канд. техн. наук; E-mail: adegova@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено после доработки 27.02.15

Adegova Lyudmila Alexeevna, candidate of technical sciences; E-mail: adegova@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

APPLICATION OF THE MODIFIED FATIGUE CURVE CALCULATION FOR EVALUATING DURABILITY THIN-WALLED ELEMENTS

Using the traditional method the match of the projected longevity and durability resulted in a bench test structures are not always satisfactory. The article presents the improved technique of numerical fatigue life prediction of structural elements by using the modified fatigue curves, considering the impact of structural and technological features of the products of the actual design. The results of the calculated fatigue life assessment based on the use of modified fatigue curves correspond to the results of the fatigue life test bench.

Key words: correction coefficients, fatigue life, thin-walled structures, analysis of stress-strain state, modified fatigue curves.

REFERENCES

1. The calculated values of the characteristics of aircraft metallic structural materials: directory [Text]. — М. : Public Corporation «United Aircraft Corporation», 2011. — 304 p.
2. Strizhius, V.E. Methods for calculating the fatigue life of aircraft structures [Text] / V.E. Strizhius. — М. : Engineering, 2012. — 272 p.
3. Goranson, U.G. Long life damage tolerant jet transport structures. American society for testing and materials. Fatigue and fracture committees [Text] / U.G. Goranson, J. Hall, J.R. Maclin, R.T. Watanabe // Symposium on «Design of fatigue and fracture resistant structures». Bal Harbour, Florida. November 10–11, 1980.

4. Belov, V.K. Increasing fatigue life zones heavily on aircraft design stage endurance test [Text] / V.K. Belov, L.A. Adegova // All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyët». — 2010. — N 9.— P. 19–26.
 5. Rudzey, G.F. Accelerated fatigue tests of materials and structural elements of aircraft [Text] / G.F. Rudzey // Aviation industry.— 2011.— N 2.— P. 47–50.
 6. Stepnov, M.N. Statistical methods for processing the results of mechanical tests: Directory [Text] / M.N. Stepnov, A.V. Shavrin. — M.: Engineering, 2005. — 344 p.
 7. Rudzey, G.F. Examination of mechanical characteristics of materials and construction samples made of aluminum alloys [Text] / G.F. Rudzey // Aviation industry. — 2010. — N 2.— P. 27–30.
 8. Belov, V.K. Improving the methodology for determining the correction factors in ensuring the reliability characteristics of the fatigue life of structural elements LA [Text] / V.K. Belov, G.F. Rudzey, A.A. Kalyuta, L.A. Adegova // All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyët».— 2011.— N 7.— P. 42–46.
-

УДК 628.52/.53:691

В.Н. АЗАРОВ, С.А. КОШКАРЕВ

**К ОПИСАНИЮ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЕСПЫЛИВАНИИ
ВЫБРОСОВ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ СТРОЙИНДУСТРИИ
В СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ
С ФИЛЬТРУЮЩЕ-ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ**

Статья посвящена вопросу описания и методу расчета эффективных эколого-охраных процессов сушки и пылеулавливания, снижающих выбросы пыли в атмосферу и количество образующихся отходов в строительстве и стройиндустрии. Распределенная подача влажного дисперсного материала (отходов) по длине лоткового прямоугольного аппарата является одним из эффективных способов снижения агломерации частиц слоя и более полного использования теплового потенциала сушильного агента. При этом поддержание влагосодержания дисперсного материала (отходов) по длине аппарата выше равновесных значений позволяет повышать эффективность улавливания пыли выбросов аспирационных систем. В работе рассмотрены некоторые способы загрузки сушильных материалов. Для описания процесса сушки с распределенной подачей влажного дисперсного продукта (отходов) по длине аппарата при одновременной сепарации пыли из очищаемого газа систем аспирации частиц пыли в фильтрующе-взвешенном слое частиц-гранул была использована квазидиффузионная модель. Получены соответствующие решения. Проведено испытание и приведены основные результаты исследования газораспределительной решетки предложенной конструкции многофункционального устройства с фильтрующе-взвешенным слоем гранул, в котором возможно осуществлять одновременно сушку материалов, отходов и обеспыливание выбросов пыли систем аспирации стройиндустрии. Рекомендовано применение результатов работы для разработки пылеуловителей систем обеспыливания аспирационных выбросов стройиндустрии.

Ключевые слова: пыль, фильтрующе-взвешенный слой, сушка, отход, материал, сепарация, улавливание, газораспределительная решетка, выброс, атмосфера, аспирация.

Одним из перспективных методов обеспечения экологической безопасности в стройиндустрии и строительстве может стать применение в системах обращения, переработки и утилизации отходов сушилок со псевдоожженным слоем для обезвоживания влажных дисперсных материалов. Известно, что отходы с высокой влажностью (более 80–85 %) размещать на полигонах промышленных отходов и ТБО не допускается. Применение таких устройств в системах очистки выбросов позволяет также сократить массу промышленных отходов производства, когда высушенный материал может возвращаться в технологический процесс. Интенсивным методом сушки некондиционных сыпучих, гранулированных и подобных материалов — отходов стройиндустрии и промышленности при их высокой влажности являются процессы в псевдоожженном слое. С учетом возрастающих требований к экологической безопасности требуется сокращение выноса частиц пыли в атмосферу из аппаратов псевдоожженного слоя. Эти условия могут быть выполнены не только специ-

альными конструктивными решениями, но и относительно незначительными величинами среднерасходовой скорости газа, или значения числа псевдоожижения ω не более 2,0 [1]. При этом гидродинамический режим должен обеспечивать надежную, бесперебойную работу устройства при эффективном использовании теплового потенциала сушильного агента.

В качестве сушильного агента в таких аппаратах используются, как правило, дымовые газы, образующиеся при сжигании газа. Применение данных устройств с псевдоожиженным слоем в системах переработки отходов на комбинатах строительных материалов (ЖБИ), цементных и керамзитобетонных заводах, установках по производству растворобетонных смесей, вяжущих гипсокодержащих строительных смесей и др. в отраслях стройиндустрии и промышленности уменьшает количество образующихся и отправляемых на захоронение на полигоны ТБО отходов. Кроме того, процесс сушки высоковлажных пастообразных отходов муниципальных служб при снижении объемов утилизируемых на полигоны ТБО отходов становится все более актуальным и получает все большее распространение.

Такие устройства находят широкое применение в аспирационных системах на комбинатах строительных материалов (ЖБИ), цементных и асфальтобетонных заводах, установках по производству растворобетонных смесей и других производствах.

Анализ литературных данных показывает также, что ведутся исследования по описанию разнообразных процессов и сушилок с псевдоожиженным слоем. При этом основным методом исследования остается сочетание компьютерного моделирования с экспериментальным определением характеристик устройств.

Так, в работе [2] рассмотрены вопросы по производству кирпича из отходов защиты окружающей среды, представлен обзор исследований по утилизации отходов для производства кирпича различными методами. Исследования технологии получения кирпича из разнообразных отходов могут быть разделены на три основные категории, основу которых составляют обжиг, цементирование и полимеризация. Промежуточной стадией процесса является сушка отходов в псевдоожиженном слое. Отмечено, что промышленное производство кирпича из отходов по-прежнему очень ограничено. Это связано с технологическими и эколого-охранными проблемами производства кирпича при загрязнении выбросами атмосферы и в целом окружающей среды отходами. Автором отмечена целесообразность дальнейших исследований и разработки процессов и устройств, обусловливаемых техническим, экономическим и социально-экологическим аспектами.

Сушилки с «кипящим» слоем часто используются в различных отраслях стройиндустрии и промышленности. Данные устройства и процессы целесообразно применять для описания сушки, в том числе термолабильных гранул и зерен для целого ряда процессов.

Сушка в псевдоожиженных слоях остается актуальным и в недостаточной степени изученным процессом. Физическая сущность моделирования сушки в псевдоожиженных слоях для различных материалов, как правило, не меняется даже при различии подходов к описанию процесса в разнообразных устройствах. В [3] представлен обзор исследований

и литературных источников, развивающих механистические модельные представления сушки влажных гранул в псевдоожиженных слоях. Сушка одной гранулы, пористых частиц может быть описана, например, с помощью континуального подхода, метода сетевого моделирования. Описание сушки гранул в псевдоожиженном слое в значительной степени более сложная задача, зависящая от целого ряда параметров: геометрической конфигурации и конструкции сушилки, газораспределительной решетки, скорости газа, характеристики частиц. Один из способов описания сушки влажных гранул в псевдоожиженных слоях — различные численные методы расчета гидродинамики (CFD), позволяющие моделировать процесс.

Отмечен рост производства отходов и возрастающая важность его термической обработки, целью которой является уменьшение объема отходов [4]. В приведенном обзоре литературы проведен анализ конкретных приложений применения «кипящего» слоя, гидродинамических параметров (скорости псевдоожижения), тепловых балансов и кинетических зависимостей (скорость реакции, выгорания и т.п.).

В [4] особое внимание уделяется решению проблем, связанных с нарушением равномерной циркуляции, имеющей место в процессах, применяющих «кипящий» слой, а также агломерации и спекания материала слоя. Показан один из возможных путей решения данной проблемы — равномерная, распределенная подача отходов в реактор с псевдоожиженным слоем. Применение полученных описаний, уравнений и рекомендаций, по мнению авторов, будет способствовать уменьшению размеров мусоросжигательного завода с утилизатором с псевдоожиженным слоем при увеличении его эффективности.

Термохимическая конверсия осадка сточных вод в «кипящем» слое является привлекательным способом уменьшения количества отходов, направляемых на размещения на полигоны ТБО (свалки). При этом снижается негативное воздействие на окружающую среду, связанное с утилизацией осадков сточных вод. Результаты исследования характеристик удаления летучих компонентов и при сжигании агломератов влажного осадка сточных вод в псевдоожиженном слое приведены в [5]. Были изучены сегрегация частиц, изменения размеров частиц, связанных с сушкой и выгоранием частиц кокса в «кипящем» слое, а также выполнено экспериментальное исследование сегрегации топливных агломератов — комков в верхней части слоя при анализе изображений на компьютере (численное EDX-моделирование). Сделан вывод, что процесс переработки отходов должен быть точно выбран для соответствующих материалов с учетом экономической рентабельности этих термохимических технологий с возможностью получения тепловой энергии.

В последнее время большое внимание уделяется повышению экологической безопасности процессов сушки во взвешенных и псевдоожиженных слоях. Это осуществляется целым рядом технических решений. Один из возможных способов, описанных, например, в [6], — сепарация пыли из очищаемых пылегазовых потоков в обеспыливающих системах аспирации в пылеуловителях с фильтрующе-взвешенным слоем (ФВС). Недостаточно разработанные для таких аппаратов модельные представления и инженерные методы расчета процессов пылеулавливания в ФВС требуют их дальнейшего развития.

Другой изученный и рекомендуемый способ — использование комбинированного устройства, сочетающего сушилку и аппарат на встречно-за-крученных потоках (ВЗП). В [7] был представлен метод расчета высокointенсивного процесса сушки термолабильного высокодисперсного материала в двухфазной вихревой сушилке предложенной конструкции. В устройстве реализована организация гидродинамики вихревого потока полидисперсных частиц, позволяющая одновременно с процессом сушки проводить и эффективный процесс сепарации частиц в аппарате типа ВЗП.

Работа [8] посвящена прикладному исследованию и созданию эффективного технологического процесса сепарации дисперсного углерода из аэрозольного потока в слое углеродных гранул. Получены результаты исследования осаждения аэрозоли техуглерода из аэрозольного потока в фильтре со слоем углеродсодержащих гранул. Установлены оптимальные характеристики фильтрующего слоя и технологические параметры процесса осаждения аэрозоля технического углерода в фильтрующем слое углеродных гранул с достижением высокой эффективности пылеулавливания.

Проведенный обзор только некоторой части научно-технической литературы показал, что дальнейшее изучение и интенсификация процесса сушки в псевдоожженном слое при снижении процессов агломерации частиц в слое приводит к «заваливанию» агрегатами сушимых отходов и материалов газораспределительной решетки. Разработка и совершенствование новых модификаций многофункциональных аппаратов лоткового типа с тангенциально-щелевыми газораспределительными решетками [9, 10], устройств, предназначенных как для очистки пылегазовых потоков обеспыливающих систем аспирации — пылеуловителей с псевдоожженным слоем гранулированных материалов, так и сушки дисперсных и гранулированных отходов в ФВС, остаются актуальными. Появление новых конструкций требует теоретического и экспериментального изучения при моделировании процессов в таких устройствах. Разработанные конструкции устройств имеют значительный потенциал применения в стройиндустрии и отраслях промышленности.

Кроме того, проведенный обзор показал также, что дальнейшее изучение и интенсификация процессов сушки пылеулавливания, осуществляемых в одном устройстве, совершенствование и разработка новых конструкций пылеуловителей, в том числе ВЗП, устройств улавливания различных видов пылей во взвешенно-фильтрующем слое гранулированных материалов остаются актуальными.

Они могут использоваться не только для обезвоживания дисперсных отходов, сушки гранулированных материалов, но и применяться в системах обеспыливания выбросов систем вытяжной вентиляции, аспирации.

Постановка задачи исследования. С целью решения сложной задачи эффективного использования тепловой энергии при сушке гранул материалов, обезвоживания отходов стройиндустрии была разработана сушилка в псевдоожженном фильтрующе-взвешенном слое. При этом данное устройство предлагалось использовать для эффективного улавливания (доулавливания) частиц мелких фракций пыли, уносимых воздушным потоком из обеспыливающих устройств систем аспирации промыш-

ленных предприятий и стройиндустрии, а также в системах обеспыливания аспирации стройиндустрии, например, в производстве керамзита, гипса и других строительных материалов — выбросов от печей обжига и аспирации оборудования с обеспечением незначительной величины проскака частиц пыли [10].

Надежная работа сушилки зависит от распределенной, рассредоточенной подачи обезвоживаемых отходов и материалов по длине лотка газораспределительного устройства. В последние годы появляются новые конструкции аппаратов лоткового типа с тангенциально-щелевыми газораспределительными решетками и модификации им подобных [9, 10], которые находят все более широкое распространение. Аппараты лоткового типа имеют целый ряд преимуществ, например, перемешивание материала в слое в продольном направлении значительно меньше, чем в аппаратах с цилиндрическим поперечным сечением корпуса (критерий Рейнольдса Re и коэффициент продольного квазидиффузационного перемешивания дисперсного материала D принимают меньшие значения, число (диффузионный критерий Пекле) $Pe_D \rightarrow \infty$).

Описание исследования и результаты. Рассмотрим возможные макрокинетические модельные представления с продольным квазидиффузионным перемешиванием дисперсного материала, которые можно применить к пылеулавливанию в аппарате псевдоожиженного, псевдоожиженно-фильтрующего слоя лотковой формы при перекрестном движении материала в слое и запыленного газа [1, 10]. Схема движения материальных потоков при сушке дифференциального объема dV гранулированного дисперсного материала (ДМ) в ФВС представлена на рис. 1.

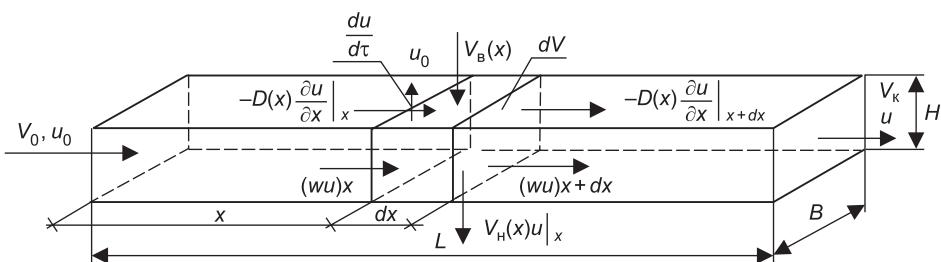


Рис. 1. Схема материальных потоков при сушке дифференциального объема dV гранулированного дисперсного материала в аппарате лоткового типа

Для описания процесса непрерывной сушки ДМ в аппарате лоткового типа с взвешенным слоем предложено использовать однопараметрическую квазидиффузионную модель

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D \partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial (wu)}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где u — относительное влагосодержание слоя псевдоожиженного дисперсного материала, $u = u_x / u_0$ (кг влаги / кг материала);

D — коэффициент квазидиффузионного перемешивания дисперсного материала в продольном направлении x , определяемый экспериментально, $\text{м}^2/\text{с}$.

При длине пылеуловителя L граничные условия первого и второго рода, отражающие физическую сущность процесса применительно к ре-

альному аппарату, были сформулированы Данквертсом. Данные условия, наиболее часто использующиеся, например, для описания химико-технологических процессов в протяженных аппаратах (реакторах), имеют вид:

$$wu_0 = wu \left|_{x=0} - D \frac{du}{dx} \right|_{x=0}, \quad \left. \frac{du}{dx} \right|_{x=L} = 0. \quad (2)$$

В процессе сушки частиц в псевдоожиженном слое происходит определенное уменьшение объема частиц, что изменяет линейную скорость движения материала вдоль аппарата. Таким же изменением скорости движения материала могут сопровождаться и другие эффекты, например, агломерация, истирание и частичный унос материала. Для интегрального учета процесса при линейной аппроксимации изменения скорости движения материала использовалось соотношение

$$w = D\Lambda \left(V_0 + \int_0^x ((V_n(x) - V_y(x))) dx \right), \quad (3)$$

где $V_n(x)$ — функциональная зависимость поступления сушимого материала в псевдоожиженный слой по длине аппарата;

$V_y(x)$ — функциональная зависимость уноса-выгрузки частиц пыли и материала слоя по длине аппарата;

V_{n1}, V_{nj} — точечная загрузка сушимого материала в ФВС сушилки;

V_{y1}, V_{yj} — точечная выгрузка высушенного материала из слоя сушилки.

Применение однопараметрических квазидиффузионных моделей с граничными условиями Данквертса позволяет получить решения в виде конечных функций. При этом предполагается, что в каждом поперечном сечении слоя устанавливается режим идеального перемешивания. Учет градиента функции в каждом шаге поперечного сечения слоя по его длине учитывается диффузионной составляющей уравнения (3). Для большинства материалов квазикинетику изменения относительного влагосодержания монодифференциального (квазидифференциального) слоя частиц при сушке возможно аппроксимировать с практической точки зрения периодом постоянной скорости сушки в продольном направлении x — $(du/d\tau) = -N$, линейно убывающей по длине аппарата скорости сушки $(du/d\tau) = -ku$ (т.е. изменения относительного влагосодержания слоя частиц продольной скорости в направлении x). Возможно также последовательное использование в модели вышеупомянутых аппроксимаций постоянной — $(du/d\tau) = -N$ и линейно убывающей по длине аппарата скорости сушки $(du/d\tau) = -ku$. Параметры N и k определяются экспериментально в опытах по изучению кинетики изменения относительно влагосодержания монодифференциального (квазидифференциального) слоя частиц.

При сушке в аппарате лоткового типа должно учитываться непрерывно распределенное изменение объема слоя ДМ за счет подаваемых гранул высушиваемого материала $V_n(x)$, V_{nj} и удаляемых вследствие уноса и возможной выгрузки частиц ДМ из псевдоожиженного слоя $V_y(x)$, V_{yj} , движущегося вдоль координаты x (рис. 2). При этом скорость движения материала должна увеличиваться непрерывно за счет поступления в слой

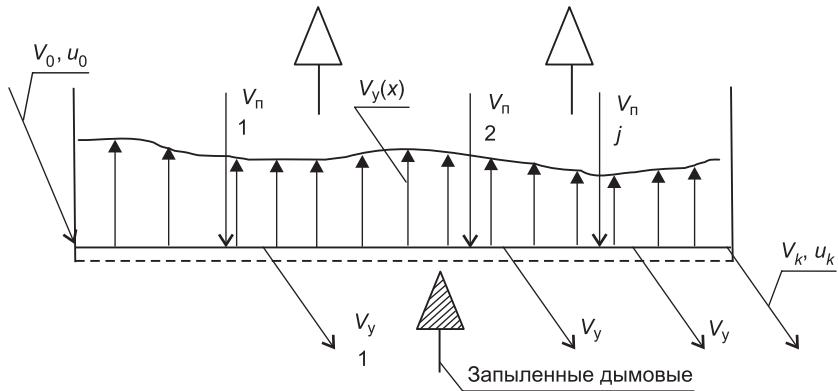


Рис. 2. Схема движения потоков гранулированного дисперсного материала и запыленных дымовых газов (сушильного агента) в продольном сечении лоткового аппарата сушки в псевдоожиженном слое

пыли, что и учтено в выражении (3). Дифференциальное уравнение, описывающее процесс сушки в аппарате лоткового типа, примет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{(1-\varepsilon_p)}{(1-\varepsilon_h)BHD} \left[V_0 + \int_0^x (V_n(x) - V_y(x)) dx \right] \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - V_n(x) [u_0 - u] = \frac{1}{D} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где B, H — соответственно ширина и высота псевдоожиженно-фильтрующего слоя, м;

ε_h — начальная насыпная порозность псевдоожиженного слоя материала, $\varepsilon_h = 0,4$;

ε_p — рабочее значение порозности псевдоожиженного слоя определяется экспериментально и находится в интервале $\varepsilon_p = 0,42-0,45$.

1. Рассмотрим вариант равномерно распределенной подачи и выгрузки материала из сушильного устройства. При аппроксимации скорости сушки линейно убывающей функцией ($du/d\tau = -ku$) решение уравнения (4) с условиями (2) и выражением (3) имеет вид

$$u(x) = \exp(t/2)^2 [(C_1 U(A, t) + C_2 V(A, t))] + \frac{(\bar{u}_0)}{1 + (k / \Lambda D V_0)}, \quad (5)$$

где $U(A, t), V(A, t)$ — функции Уитеккера;

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{(1-\varepsilon_p)}{(1-\varepsilon_h)BHD}; \quad A = \frac{V_n + (k / \Lambda D)}{V_n - V_y} - \frac{1}{2}; \\ t &= \Lambda \sqrt{\Lambda(V_n - V_y)} [V_n + (V_n - V_y)x]. \end{aligned} \quad (6)$$

Если ввести обозначения:

$$z_1 = \Lambda V_n \sqrt{\Lambda(V_n - V_y)}, \quad z_2 = \Lambda (V_n + (V_n - V_y))x \sqrt{\Lambda(V_n - V_y)}. \quad (7)$$

Константы C_1 и C_2 имеют вид:

$$\begin{aligned} C_1 &= (u_0 - B) \exp\left(\frac{z_1}{2}\right)^2 [U(A, z_1)] - \frac{(A + 1/2)V(A + 1, z_2)}{U(A + 1, z_2)} - \\ &- \frac{D}{w_0} \left[(A + 1/2)V(A + 1, z_1) - \frac{(A + 1/2)V(A + 1, z_2)U(A + 1, z_1)}{U(A + 1, z_2)} \right]^{-1}; \\ C_2 &= -\frac{(A + 1/2)V(A + 1, z_2)}{U(A + 1, z_2)} C_1. \end{aligned} \quad (8)$$

При начальном объемном расходе гранул материала слоя V_0

$$B = -\frac{(u_0)}{1 + (k / \Lambda V_n D)}, \quad w_0 = \frac{V_0(1 - \varepsilon_h)}{(1 - \varepsilon_p)BH}, \quad (9)$$

где w_0 — начальная линейная скорость материала слоя (на входе в аппарат), м/с.

В случае постоянства кинетического параметра скорости сушки $N = \text{const}$ решение уравнения (4) имеет вид, аналогичный (5) с некоторыми отличиями в структуре параметров A и t .

2. Рассмотрим вариант дискретной точечной подачи материала в устройство в двух местах по длине сушилки, который обеспечивает более равномерное распределение обезвоживаемого материала по длине. Так, например, для квазидифференциального слоя частиц дисперсного материала, кинетика изменения относительного влагосодержания которого при сушке в слое приближенно аппроксимируется периодом линейно убывающей скорости сушки частиц, решение уравнения (1) с условиями (2) и выражением (3) имеет общий вид системы уравнений:

$$\begin{cases} u_1 = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{\lambda_2 x}, \\ u_2 = C_3 e^{\lambda_3 x} + C_4 e^{\lambda_4 x}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{где } \lambda_{1,2} = (w_1 / 2D) \pm \sqrt{((w_1 / 2D)^2 + (k / D))},$$

$$\lambda_{3,4} = (w_2 / 2D) \pm \sqrt{((w_2 / 2D)^2 + (k / D))}.$$

Если принять l — расстояние от начального места загрузки материала с координатой x до второго места загрузки, то граничные условия (2) с соотношениями, отражающими непрерывность функции $u(x)$ и потока влаги в слое в точке $x = l$, имеют вид:

$$\begin{aligned} w_1 u_0 &= w_1 u_1 \Big|_{x=0} - D \frac{du_1}{dx} \Big|_{x=0}, \quad u_1 \Big|_{x=l} = u_2 \Big|_{x=l}, \\ w_1 u_1 \Big|_{x=l} - D \frac{du_1}{dx} \Big|_{x=l} &= w_1 u_2 \Big|_{x=l} - D \frac{du_2}{dx} \Big|_{x=l} + \Delta w u_0, \end{aligned}$$

$$\frac{du}{dx} \Big|_{x=L} = 0, \quad (11)$$

где $\Delta w = w_2 - w_1$.

Решение (10) и (11) с нахождением постоянных величин $C_1 - C_4$ по методу Гаусса, опустив некоторые промежуточные преобразования, дает следующий вид констант:

$$\begin{aligned} C_1 &= u_0 w_1 - ((w_1 - D\lambda_2)C_2) / (w_1 - D\lambda_1), \\ C_2 &= u_0 w_1 e^{\lambda_1 l} [(w_2 - D\lambda_3)e^{\lambda_3 l}] - \lambda_3 \left(\left(\frac{w_2}{\lambda_4} - D \right) e^{L(\lambda_3 - \lambda_4) + \lambda_4 l} \right) / \Delta(w_1 - D\lambda_1), \\ C_3 &= u_0 w_1 e^{\lambda_1 l} [(e^{\lambda_2 l} - Be^{\lambda_1 l})(w_1 - D\lambda_1)] + \\ &\quad + [(w_1 - D\lambda_2)(e^{\lambda_2 l} - e^{\lambda_1 l})] / \Delta(w_1 - D\lambda_1), \\ C_4 &= \left(- \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_4} \right) e^{L(\lambda_3 - \lambda_4)} C_3 \right), \\ B &= \frac{(w_1 - D\lambda_2)}{(w_1 - D\lambda_1)}, \\ \Delta &= (Be^{\lambda_1 l} - e^{\lambda_2 l}) [(w_2 - D\lambda_3)e^{\lambda_3 l}] - \lambda_3 \left(\left(\frac{w_2}{\lambda_4} - D \right) e^{L(\lambda_3 - \lambda_4) + \lambda_4 l} \right) + \quad (12) \\ &\quad + \left(e^{\lambda_3 l} \left(- \frac{\lambda_3}{\lambda_4} \right) + e^{L(\lambda_3 - \lambda_4) + \lambda_4 l} \right) [(w_1 - D\lambda_2)(e^{\lambda_2 l} - e^{\lambda_1 l})]. \end{aligned}$$

Выводы. 1. Для конструктивного упрощения, снижения капитальных и эксплуатационных затрат предлагается использовать данное устройство в системе очистки выбросов аспирационных систем печей обжига стройматериалов (гипса, керамзита). Следует отметить, что проведен комплекс исследований предложенного пылеуловителя, который показал высокую эффективность сушки гранул при одновременном улавливании пыли из очищаемого пылевоздушного потока и приемлемом аэродинамическом сопротивлении и надежной работе.

2. Для описания и расчета процесса сушки в псевдоожиженном слое могут быть использованы модельные представления с продольным квазидиффузионным перемешиванием материалов. Полученные решения позволяют описать процесс сушки при одновременном улавливании пыли при различных способах подачи сушимых гранул в ФВС (равномерно распределенная и точечная загрузка). При этом данная организация подачи гранул ДМ, отходов в ФВС позволяет более эффективно использовать тепло сушильного агента ввиду поддержания большего потенциала движущей силы процесса (поддержания влажности слоя ДМ выше равновесных значений влагосодержания и по длине аппарата). Распределенная, точечная (условно-дискретная) загрузка сушимых ДМ в ФВС по длине аппарата или их сочетание способствует предотвращению агломерации

и спеканию материала слоя, возникающих при неравномерной циркуляции слоя. Кроме того, как показывают проведенные исследования, более влажный слой ДМ в устройстве препятствует росту степени проскока улавливаемых частиц пыли.

3. С целью упрощения и более широкого последующего использования в инженерных расчетах были проведены экспериментальные исследования по оценке характеристик предложенного аппарата. Получены данные по значениям коэффициента продольного квазидиффузационного перемешивания для некоторых дисперсных строительных материалов D и кинетические коэффициенты скорости сушки k и N для устройства сушки и улавливания пыли в ФВС. Например, значение D для мелких гранул керамзита изменялось в интервале от 10^{-5} до $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ в исследованном диапазоне аэродинамических режимов. В качестве метода был применен известный метод метки — «вымывания» вbrasываемых мечевых (окрашенных) частиц трассера из аппарата.

4. Применение разработанной конструкции сушилки-пылеуловителя снижает выбросы пыли в атмосферу и количество образующихся отходов производства, когда уловленную пыль со слоем зерен (гранул) материала целесообразно возвращать в производственный цикл. Этот способ одновременной сушки и пылеулавливания при организации распределенной, точечной загрузки влажных ДМ в ФВС по длине аппарата повышает надежную работу устройства и экологическую безопасность стройиндустрии в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошкарев, С.А. Непрерывная сушка дисперсных материалов в аппаратах лотковой и цилиндрической формы [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Кошкарев Сергей Аркадьевич. — СПб., 1992. — 20 с.
2. Zhang, L. Production of bricks from waste materials – a review [Текст] / L. Zhang // Construction and building materials. — 2013. — Vol. 47. — P. 643–655.
3. Mortier, S.T.F.C. et al. Mechanistic modelling of fluidized bed drying processes of wet porous granules: a review [Текст] / S.T.F.C. Mortier et al. // European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics. — 2011. — Vol. 79, N 2. — P. 205–225.
4. Urciuolo, M. et al. Fluidized bed combustion and fragmentation of wet sewage sludge [Текст] / M. Urciuolo et al. // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2012. — Vol. 43. — P. 97–104.
5. Van Caneghem, J. et al. Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues [Текст] / J. Van Caneghem et al. // Progress in Energy and Combustion Science. — 2012. — T. 38, N 4. — P. 551–582.
6. Кошкарев, С.А. О применении на предприятиях стройиндустрии аппаратов пылеулавливания с фильтрующе-взвешенным слоем [Текст] / С.А. Кошкарев, Т.А. Кисленко, В.В. Рыльцев // Биосферная совместимость. — 2013. — № 2. — С. 18–19.
7. Лебедев, В.В. Сушка зернистых материалов в аппарате с модифицированным вихревым слоем [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / В.В. Лебедев. — Иваново, 2007. — 17 с.
8. Дмитриев, К.И. Разработка процесса осаждения дисперсного углерода из аэрозольного потока в слое углеродных гранул [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Дмитриев Константин Игоревич. — Томск, 2012. — 22 с.
9. Пат. № 1816498 Россия, МКИ B 01J 8/44. Газораспределительная решетка для аппаратов с псевдоожженным слоем [Текст] / С.А. Кошкарев, В.Ф. Фролов; заявка № 4923302/26 от 01.04.91; опубл. 23.05.93, Бюл. № 19.

10. Кошкарев, С.А. К описанию пылеулавливания во взвешенно-фильтрующем слое и экспериментальная оценка проскока частиц пыли в системах обеспыливания стройиндустрии [Текст] / С.А. Кошкарев, В.В. Рыльцев // Альтернативная энергетика и экология. — 2015. — № 3. — С. 1–9.

АЗАРОВ Валерий Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: kaf_bgdvt@mail.ru
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет
КОШКАРЕВ Сергей Аркадьевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: cool.koshka12@mail.ru
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 05.02.15

Azarov Valeriy Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: kaf_bgdvt@mail.ru, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Koshkarev Sergey Arkadievich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: cool.koshka12@mail.ru, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

MODEL OF DRYIN DISPERSED BUILDING MATERIALS FOR DUST CAPTURING IN FILTERING-FLUID BED' SEPARATING DEVICES IN CONSTRUCTION INDUSTRY

There is approach of usage high efficiency ecological technology to prevent and to reduce volumes' dust ingredient's substances in emissions of pollutions exhausted in the atmosphere in this article. Distributed supply of moist particulate material (waste) along the length of a rectangular gas spread grid is an effective way to reduce particle agglomeration layer and more complete utilization of the thermal capacity of the drying agent. At the same time maintaining the moisture content of the particulate material (waste) along the length of the unit above the equilibrium values can enhance the efficiency of collecting dust emissions aspiration schemes. The paper was taken into consideration some ways to load the dried materials into dryer and was shown relative solution of drying process. There presented applying quasi-diffusion model for dust separation and aggregation in granular (corns) particles of materials in filtering-fluidized bed' apparatus in this paper. It was suggested to use received solutions for description of drying and dust separation in filtering-fluid bed's devices in building construction industry. It was recommended to apply the results this research for design and proposed construction of gas-spread grid for dust separation's apparatus in those filtering-fluidized beds of granular-corns particles of materials in dust decreasing emissions systems of aspiration schemes at building factories.

Key words: dust, filtering-fluidizing bed, drying, pollutant, material, separation, capture, gas-spread grid, emission, atmosphere, aspiration.

REFERENCES

1. Кошкарев, С.А. Nepreryvnaja sushka dispersnyh materialov v apparatah lotkovoj i cilindricheskoy formy [Text] : avtoref. diss. ... candidate of technical sciences : 05.17.08 / Sergey Arkadievich Koshkarev. — SPb., 1992. — 20 p.
2. Zhang, L. Production of bricks from waste materials – a review [Text] / L. Zhang // Construction and building materials. — 2013. — Vol. 47. — P. 643–655.
3. Mortier, S.T.F.C. et al. Mechanistic modelling of fluidized bed drying processes of wet porous granules: a review [Text] / S.T.F.C. Mortier et al. // European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics. — 2011. — Vol. 79, N 2. — P. 205–225.
4. Urciuolo, M. et al. Fluidized bed combustion and fragmentation of wet sewage sludge [Text] / M. Urciuolo et al. // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2012. — Vol. 43. — P. 97–104.

5. Van Caneghem, J. et al. Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues [Text] / J. Van Caneghem et al. // Progress in Energy and Combustion Science. — 2012. — Vol. 38, N 4. — P. 551–582.
 6. Koshkarev, S.A. About application at the enterprises of building industry of devices of catching of dust with the filtering weighed layer [Text] / S.A. Koshkarev, T.A. Kislenko, V.V. Ryltsev // Biosphere compatibility. — 2013. — N 2. — P. 18–19.
 7. Lebedev, V.V. Drying of granular materials in the device with the modified vortex layer [Text] : author abstract of diss. ... candidate of technical sciences : 05.17.08 /Lebedev V.V. — Ivanovo, 2007. — 17 p.
 8. Dmitriev, K.I. Development of process of sedimentation of disperse carbon of an aerosol stream in a layer of carbon granules [Text] : author abstract of diss. ... candidate of technical sciences: 05.17.08 / Dmitriev Konstantin Igorevich. — Tomsk, 2012. — 22 p.
 9. Pat. N 1816498 Russia, MKI B 01J 8/44. Gazoraspredelitel'naja reshetka dlja apparatov s psevdoozhizhennym sloem [Text] / S.A. Koshkarev, V.F. Frolov; zayavka N 4923302/26 ot 01.04.91; opubl. 23.05.93, Bull. N 19.
 10. Koshkarev, S.A. K opisaniju pyleulavlivanija vo vzveshenno-fil'trujushhem sloe i jeksperimental'naja ocenka proskoka chastic pyli v sistemah obespylivaniya strojindustrii [Text] / S.A. Koshkarev, V.V. Ryltsev // Al'ternativnaja jenergetika i jekologija. — 2015. — N 3. — P. 1–9.
-

УДК 624.072.2

А.А. КОЯНКИН, А.Г. ИЛИЗАРОВ

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА БАЛКИ КУСОЧНО-ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ, ВЫПОЛНЯЕМОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕРЫВАТЕЛЕЙ ГЕРСЕВАНОВА

Распространенность балок кусочно-постоянного сечения в практике современного строительства и одновременное отсутствие простых методов расчета (имеющиеся методики расчета сводятся либо к условному разделению балки на отдельные участки постоянного сечения, либо к приведению внутренних силовых факторов), позволяющих оценить несущую способность и деформативность этих балок, подтолкнули авторов данной статьи к разработке методики расчета балок кусочно-постоянного сечения, основанной на применении одностороннего и двустороннего прерывателей Герсеванова.

Ключевые слова: балка кусочно-постоянного сечения, односторонний и двусторонний прерыватели Герсеванова, дифференциальное уравнение изгиба.

Дифференциальное уравнение оси изогнутой балки в случае постоянной жесткости сечения D имеет вид $D \frac{d^4 w}{dx^4} = q$. Для расчета балок кусочно-постоянного сечения, которые достаточно часто встречаются в практике современного строительства ввиду получаемой существенной экономии материалов, применение данного уравнения требует разделения балки на отдельные участки постоянного сечения или использования приведенных внутренних силовых факторов, что, несомненно, усложняет процедуру расчета.

Н.М. Герсеванов предложил использовать для представления однократного резкого изменения интенсивности равномерно распределенной нагрузки односторонний прерыватель Γ_a [1–5]:

$$\Gamma_a = \frac{1}{\pi} \lim_{\eta \rightarrow 0} \operatorname{arctg} \frac{\eta}{x-a}, \quad (1)$$

где x и η — переменные величины;

a — координата по оси места изменения интенсивности нагрузки.

Для описания равномерно распределенной нагрузки, приложенной в промежутке между a и b , был предложен двусторонний прерыватель

$$\Gamma_a^b = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a \vee x > b, \\ 1/2 & \text{при } x = a \vee x = b — \text{разрыв функции,} \\ 1 & \text{при } a < x < b. \end{cases} \quad (2)$$

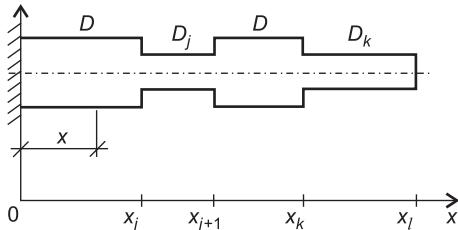


Рис. 1. Балка кусочно-постоянного сечения

Авторы данной статьи предложили для описания скачкообразного изменения жесткости балки кусочно-постоянного сечения (рис. 1) применить односторонний Γ_a или двусторонний Γ_a^b функциональные прерыватели, которые вводятся в дифференциальное уравнение оси изогнутой балки.

Для реализации поставленной задачи необходимо, чтобы прерыватель находился в числитеle правой части дифференциального уравнения. Значение нагрузки q при этом рассматривается как постоянная, а изменяющаяся по длине элемента жесткость как кусочно-постоянная функция. Таким образом, функция жесткости балки, в которой происходит изменение сечения с дальнейшим сохранением измененного значения и описываемая с использованием одностороннего Γ_k или двустороннего Γ_j^{j+1} (в дальнейшем, переходя непосредственно к выводу методики расчета, выразим прерыватели через k и j , отказавшись от общепринятого выражения через a и b) функциональных прерывателей, примет вид:

— в случае однократного изменения жесткости — $D(x) = \frac{D}{1 + \Delta_k \Gamma_k}$;

— в случае многократного (от 1 до m) изменения жесткости в пределах (от x_j до x_{j+1} и т.д.) определенного участка балки — $D(x) = \frac{D}{1 + \sum_{j=1}^m \Delta_j^{j+1} \Gamma_j^{j+1}}$,

где $\Delta_k = \frac{D}{D_k} - 1 = \frac{\Delta D_k}{D_k}$ и $\Delta_j^{j+1} = \frac{D}{D_j} - 1 = \frac{\Delta D_j}{D_j}$ — коэффициенты соотношения жесткостей.

Дифференциальное уравнение оси изогнутой балки переменного сечения имеет вид

$$\frac{d^2 w}{dx^2} \left[D(x) \frac{d^2 w}{dx^2} \right] = q$$

и, интегрируя это уравнение дважды,

$$D(x) \frac{d^2 w}{dx^2} = q \frac{x^2}{2} + c_1 x + c_2.$$

Рассматривая жестко защемленную балку с началом координат на свободном конце, получим $c_1 = 0$ и $c_2 = 0$. В итоге дифференциальное уравнение примет вид

$$D(x) \frac{d^2 w}{dx^2} = q \frac{x^2}{2}.$$

Подставляя функцию жесткости с односторонним прерывателем Γ_k в полученное дифференциальное уравнение, получим выражение

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{q}{D}(1 + \Delta_k \Gamma_k) \frac{x^2}{2} = \frac{q}{D} \left(\frac{x^2}{2} + \Delta_k \frac{x^2}{2} \Gamma_k \right),$$

которое после двукратного дифференцирования примет вид

$$\frac{d^4w}{dx^4} = \frac{q}{D} \left(1 + \Delta_k \Gamma_k + \Delta_k x_k \Gamma'_k + \Delta_k \frac{x_k^2}{2} \Gamma''_k \right).$$

Умножив два последних значения в скобках на $\frac{q}{q}$ и вводя понятие «компенсирующие усилия», равные $Q_k = qx_k$ и $M_k = q \frac{x_k^2}{2}$ (усилия, определенные в элементе в точке x_k), получим дифференциальное уравнение изгиба элемента кусочно-постоянного сечения, выражаемого через односторонний прерыватель Герсеванова:

$$\frac{d^4w}{dx^4} = \frac{q}{D} \left(1 + \Delta_k \Gamma_k + \Delta_k \frac{Q_k}{q} \Gamma'_k + \Delta_k \frac{M_k}{q} \Gamma''_k \right). \quad (3)$$

Рассуждая аналогичным образом, но принимая для рассмотрения балку с другими условиями закрепления, снова придем к выражению (3). К примеру, для шарнирно опертой однопролетной балки дифференциальное уравнение принимает вид

$$\frac{d^4w}{dx^4} = \frac{q}{D} \left(1 + \Delta_k \Gamma_k + \Delta_k \left(x_k - \frac{l}{2} \right) \Gamma'_k + \Delta_k \left(\frac{x_k^2}{2} - \frac{l}{2} x_k \right) \Gamma''_k \right),$$

где $\left(x_k - \frac{l}{2} \right)$ и $\left(\frac{x_k^2}{2} - \frac{l}{2} x_k \right)$ заменяются на $\frac{Q_k}{q}$ и $\frac{M_k}{q}$, что в итоге приводит к (3).

Полученное уравнение (3) достаточно легко интегрируется, в результате чего определяются функции поперечных сил, изгибающих моментов, углов поворота и прогибов. Таким образом, получается система из четырех дифференциальных уравнений, имеющая следующие неизвестные:

- постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 , определяемые из граничных условий;
- компенсирующие усилия Q_k, M_k , определяемые из равенства усилий в месте изменения сечения, по обе стороны сечения, т.е.

$$Q(x_k - 0) = Q(x_k + 0), \quad M(x_k - 0) = M(x_k + 0).$$

Аналогичным образом выводится и дифференциальное уравнение изгиба для балки кусочно-переменного сечения в случае многократного изменения жесткости:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{q}{D} \left(1 + \sum_{j=1}^m \Delta_j^{j+1} \Gamma_j^{j+1} + \sum_{j=1}^m \Delta_j^{j+1} \frac{Q_j}{q} \Gamma'_j - \sum_{j=1}^m \Delta_j^{j+1} \frac{Q_{j+1}}{q} \Gamma'_{j+1} + \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^m \Delta_j^{j+1} \frac{M_j}{q} \Gamma''_j - \sum_{j=1}^m \Delta_j^{j+1} \frac{M_{j+1}}{q} \Gamma''_{j+1} \right), \quad (4)$$

где Q_j , Q_{j+1} , M_j , M_{j+1} — значения компенсирующих усилий в точках x_j и x_{j+1} .

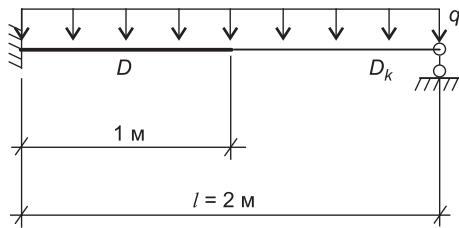


Рис. 2. Расчетная схема балки кусочно-постоянного сечения

В качестве примера выполнены расчет статически неопределенной балки кусочно-постоянного сечения (рис. 2), имеющей следующие параметры: $q = 100$ кН/м, $l = 2$ м, $D(E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $b = 100$ мм, $h = 300$ мм) = 45000 кН·м², $D_1(E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $b = 100$ мм, $h = 150$ мм) = 5625 кН·м², $x_1 = 1$ м.

$$\text{Решение: } \Delta_k = \frac{D}{D_k} - 1 = \frac{45000}{5625} - 1 = 7.$$

Дифференциальное уравнение примет вид

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{q}{D} \left(1 + 7\Gamma_1 + \frac{7}{100} Q_1 \Gamma'_1 + \frac{7}{100} M_1 \Gamma''_1 \right).$$

Последовательно интегрируя полученное выражение 4 раза, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^3 w}{dx^3} &= \frac{q}{D} \left(x + 7 \left(x - \left(1 - \frac{1}{100} Q_1 \right) \right) \Gamma_1 + \frac{7}{100} M_1 \Gamma'_1 \right) + c_1, \\ \frac{d^2 w}{dx^2} &= \frac{q}{D} \left(\frac{x^2}{2} + 7 \left(\frac{x^2}{2} - \left(1 - \frac{1}{100} Q_1 \right) x + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{100} Q_1 + \frac{1}{100} M_1 \right) \right) \Gamma_1 \right) + c_1 x + c_2, \\ \frac{dw}{dx} &= \frac{q}{D} \left(\frac{x^3}{6} + 7 \left(\frac{x^3}{6} - \left(1 - \frac{1}{100} Q_1 \right) \frac{x^2}{2} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{100} Q_1 + \frac{1}{100} M_1 \right) x - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \left(\frac{1}{6} - \frac{1}{200} Q_1 + \frac{1}{100} M_1 \right) \right) \Gamma_1 \right) + c_1 \frac{x^2}{2} + c_2 x + c_3, \end{aligned}$$

$$w = \frac{q}{D} \left(\frac{x^4}{24} + 7 \left(\frac{x^4}{24} - \left(1 - \frac{1}{100} Q_1 \right) \frac{x^3}{6} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{100} Q_1 + \frac{1}{100} M_1 \right) \frac{x^2}{2} - \left(\frac{1}{6} - \frac{1}{200} Q_1 + \frac{1}{100} M_1 \right) x + \left(\frac{1}{24} - \frac{1}{600} Q_1 + \frac{1}{200} M_1 \right) \right) \Gamma_1 \right) + c_1 \frac{x^3}{6} + c_2 \frac{x^2}{2} + c_3 x + c_4,$$

в которых имеются шесть неизвестных (постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 , а также компенсирующие усилия Q_1 и M_1).

Исходя из граничных условий $M(l) = 0, \varphi(0) = 0, w(0) = \omega(l) = 0$, определяем неизвестные постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 , а из условия равенства усилий $Q(x_1 - 0) = Q(x_1 + 0), M(x_1 - 0) = M(x_1 + 0)$ в месте изменения сечения находим компенсирующие усилия Q_1 и M_1 .

В результате дифференциальные уравнения примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^4 w}{dx^4} &= \frac{q}{D} (1 + 7\Gamma_1 - 2,975\Gamma'_1 - 0,525\Gamma''_1); \\ \frac{d^3 w}{dx^3} &= \frac{q}{D} (x - 1,425 + 7(x - 1,425)\Gamma_1 - 0,525\Gamma'_1); \\ \frac{d^2 w}{dx^2} &= \frac{q}{D} \left(\frac{x^2}{2} - 1,425x + 0,85 + 7 \left(\frac{x^2}{2} - 1,425x + 0,85 \right) \Gamma_1 \right); \\ \frac{dw}{dx} &= \frac{q}{D} \left(\frac{x^3}{6} - 1,425 \frac{x^2}{2} + 0,85x + 7 \left(\frac{x^3}{6} - 1,425 \frac{x^2}{2} + 0,85x - 0,304167 \right) \Gamma_1 \right); \\ w &= \frac{q}{D} \left(\frac{x^4}{24} - 1,425 \frac{x^3}{6} + 0,85 \frac{x^2}{2} + \right. \\ &\quad \left. + 7 \left(\frac{x^4}{24} - 1,425 \frac{x^3}{6} + 0,85 \frac{x^2}{2} - 0,304167x + 0,075 \right) \Gamma_1 \right). \end{aligned}$$

Значения поперечных усилий, полученные из вышеприведенных уравнений:

$$Q(0) = -142,5 \text{ кН}; Q(x_1 - 0) = Q(x_1 + 0) = -42,5 \text{ кН}; Q(l) = -57,5 \text{ кН}.$$

Значения изгибающих моментов составят:

$$M(0) = 85 \text{ кН} \cdot \text{м}; M(x_1 - 0) = M(x_1 + 0) = -7,5 \text{ кН} \cdot \text{м}; M(l) = 0.$$

При этом максимальное значение изгибающего момента будет определено в точке, где функция поперечной силы равна нулю. Таким образом,

$$Q(x) = \frac{d^3 w}{dx^3} D(x) = \frac{q}{D} D_1 (x - 1,425 + 7(x - 1,425)\Gamma_1 - 0,525\Gamma'_1) = 0,$$

откуда следует, что $x = 1,425$ м, исходя из $\Gamma_1 = 1$ и $\Gamma'_1 = 0$, так как при $\Gamma_1 = 0$ координата с нулевым значением поперечной силы не принадлежит отрезку балки, при котором $\Gamma_1 = 0$. В итоге максимальный изгибающий момент $M(1,425) = -16,5$ кН · м.

Значения прогибов равны:

$$w(0) = 0; \quad w(x_1 - 0) = (x_1 + 0) = 0,51 \text{ мм}; \quad w(l) = 0.$$

При этом максимальное значение прогиба будет определено в точке, где угол наклона касательной к оси изогнутой балки равен нулю. Таким образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dx} &= \frac{q}{D} \left(\frac{x^3}{6} - 1,425 \frac{x^2}{2} + 0,85x + \right. \\ &\quad \left. + 7 \left(\frac{x^3}{6} - 1,425 \frac{x^2}{2} + 0,85x - 0,304167 \right) \Gamma_1 \right) = 0, \end{aligned}$$

откуда следует, что $x = 1,306$ м, исходя из $\Gamma_1 = 1$ и $\Gamma'_1 = 0$, так как при $\Gamma_1 = 0$ координата с нулевым значением угла поворота не принадлежит отрезку балки, на котором $\Gamma_1 = 0$. В итоге максимальный прогиб $w(1,306) = 0,62$ мм.

С целью проверки точности предложенной методики расчета были проведены расчеты балки кусочно-постоянного сечения в ПК SCAD в линейной постановке задачи. При этом рассматривались три варианта моделирования балки: стержневые КЭ, пластинчатые КЭ и объемные КЭ. Результаты расчетов приведены в таблице.

Усилия, полученные в результате расчета по предложенной методике, полностью совпадают с усилиями, полученными в ПК SCAD. При этом прогибы имеют незначительное расхождение (не более 6 %) в сравнении с объемными КЭ и полное совпадение в сравнении со стержневыми и пластинчатыми КЭ. Это объясняется тем, что в случае расчета с применением объемных КЭ дополнительно учитываются концентрации напряжений в местах скачкообразного изменения сечения балки (иссле-

Эскиз	Точки	Усилия, мм			
		Расчет		SCAD (стержни)	
		Q , кН	M , кН · м	Q , кН	M , кН · м
	1	-142,5	85,0	-142,5	85,0
	2	-42,5	-7,5	-42,5	-7,5
	4	0	-16,5	0	-16,5
	5	57,5	0	57,5	0
	Точки	Прогибы, мм			
		Расчет	SCAD		
			Стержни	Пластины	Объем
	2	0,51	0,51	0,51	0,54
	3	0,62	0,62	0,62	0,64

дования по возможности учета концентраторов напряжений при расчете по предложенной методике продолжаются).

Вывод. Предложенная методика расчета изгибающего элемента, использующая функциональные прерыватели Герсеванова, позволяет произвести достаточно точный линейный расчет балок кусочно-постоянного сечения, при этом значительно упрощается сам процесс проведения расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Т р а в у ш, В.И. Функциональные прерыватели Герсеванова и расчет конструкций на упругом основании [Текст] / В.И. Травуш // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2000. — № 4. — С. 8–23.
2. Г е р с е в а н о в, Н.М. Основания и фундаменты [Текст] / Н.М. Герсеванов, Д.Е. Польшин, Г.И. Покровский, В.Г. Булычев, Б.П. Попов, Р. Шеляпин. — М. : Госстройиздат, 1933. — 135 с.
3. И л и з а р о в, А.Г. Апробация методики расчета прогибов изгибающей балки кусочно-постоянного сечения, выполняемого с использованием прерывателей Герсеванова [Текст] / А.Г. Илизаров, А.А. Коянкин // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 8. — С. 93–98.
4. С и м в у л и д и, И.А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании [Текст] / И.А. Симбулиди. — М. : Высш. школа, 1973. — 431 с.
5. Г е р с е в а н о в, А.М. Функциональные прерыватели в строительной механике и их приложение к расчету ленточных фундаментов [Текст] / А.М. Герсеванов // Труды ВИОСа. — М., 1934.

КОЯНКИН Александр Александрович, канд. техн. наук; E-mail: koyankinaa@mail.ru
Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета,
г. Красноярск

ИЛИЗАРОВ Александр Гаврилович, канд. техн. наук; E-mail: ailizarov@rambler.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 12.02.15

Koyankin Alexander Alexandrovich, candidate of technical sciences; E-mail: koyankinaa@mail.ru, Institution of Civil Engineering of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Ilizarov Alexander Gavrilovich, candidate of technical sciences; E-mail: ailizarov@rambler.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

DEVELOPMENT OF CALCULATION METHODS OF BEAM WITH PIECEWISE-CONSTANT SECTION MADE WITH THE USE OF GERSEVANOV BREAKERS

Popularity of beams with piecewise-constant section in practice of modern construction and contemporary lack of simple calculation methods (available calculation methods deal with conditional separation of a beam for particular areas of constant section or reduction of internal force factors), which allow to estimate the load capacity and deformation of these beams, have pushed the authors of this article for development of the calculation methods of beams with piecewise-constant section, based on the use one-side and two-side Gersevanov breakers.

Key words: beams with piecewise-constant section, one-side and two-side Gersevanov breakers, differential equation of a bending.

REFERENCES

1. Travush, V.I. Functional Gersevanov breakers and calculation of constructions on elastic foundation [Text] / V.I. Travush // Bases, foundations and soil engineering. — 2000. — N 4. — P. 18–23.
 2. Gersevanov, N.M. Bases and foundations [Text] / N.M. Gersevanov, D.E. Polshin, G.I. Pokrovskiy, B.G. Bulychev, B.P. Popov, P. Shelyapin. — M. : Gosstroyizdat, 1933. — 135 p.
 3. Ilizarov, A.G. Approbation of calculation methods of a bending beam with piecewise-constant section with the use of Gersevanov breakers [Text] / A.G. Ilizarov, A.A. Koyankin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 8. — P. 93–98.
 4. Simvulidi, I.A. Calculation of engineering constructions on elastic foundation [Text] / I.A. Simvulidi. — M. : Vysh. School, 1973. — 431 p.
 5. Gersevanov, A.M. Functional breakers in constructional engineering and their application to calculation of strip foundations [Text] / A.M. Gersevanov // Works of VIOS. — M., 1934.
-

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
 - сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подписью автора или руководителя представляющей статью 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 Сыг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список;

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и **e-mail** авторов;

— **название статьи на английском языке**;

— **аннотация на английском языке**;

— **ключевые слова на английском языке**;

— **библиографический список на английском языке**.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. **Русские и греческие буквы** и индексы, а также **цифры**, **аббревиатуры** и **стандартные функции** (Re, cos и др.) набираются **прямым шрифтом**. **Латинские буквы** набирать **курсивом**. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2015 г. — из расчета 900 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 и www.izvuzstr.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

12. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

13. Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

14. Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

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

На 1-е полугодие 2015 г.**каталожная цена за 6 месяцев — 3000 р.****цена отдельного номера — 500 р.**

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 3 (675) 2015

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*