ISSN 0536-1052

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

6
2005

ББК 38
И 33
УДК 69

Главный редактор В. Г. СЕБЕШЕВ
Заместители главного редактора В. И. КОСТИН, Г. Б. ЛЕБЕДЕВ
Ответственный секретарь Н. В. БИТКИНА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

проф. А. А. АФАНАСЬЕВ; проф. В. Л. БАЛАДИНСКИЙ; засл. деятель науки и техники России, проф. В. А. ВОРОБЬЕВ; проф. П. А. ДМИТРИЕВ; засл. деятель науки и техники России, проф. В. А. ИГНАТЬЕВ; проф. В. И. КОСТИН; доц. Г. Б. ЛЕБЕДЕВ; проф. Е. М. ЛОБАНОВ; засл. деятель науки и техники России, проф. Л. С. ЛЯХОВИЧ; проф. В. И. МОРОЗОВ; засл. деятель науки и техники России, проф. Ю. П. ПАНИБРАТОВ; проф. Ю. А. ПОПОВ; проф. Ю. П. ПРАВДИВЕЦ; засл. деятель науки и техники России, проф. А. П. ПРОШИН; проф. Г. А. ПУГАЧЕВ; проф. В. Г. СЕБЕШЕВ; проф. И. Б. СОКОЛОВ; проф. Ю. А. ФЕОФАНОВ; проф. А. М. ФОМИНЫХ; засл. деятель науки и техники России, проф. В. М. ХРУЛЕВ; проф. Е. М. ЧЕРНЫШОВ; засл. деятель науки и техники России, проф. Г. Н. ШОРШНЕВ

Научное издание

Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 6 (558) 2005

Научно-теоретический журнал

Редактор *Н. Г. Павлова*
Технический редактор *Н. М. Макаренко*
Корректор *В. В. Борисова*

Сдано в набор 04.03.05. Подписано в печать 16.06.05. Формат 70×108 1/16. Бумага типографская № 2. Гарнитура Антиква. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,8+0,35. Уч.-изд. л. 12. Тираж 410 экз. Заказ № 65. Цена 60 р.

Адрес редакции: 630008, г. Новосибирск, 8. Ленинградская, 113, телефон 266-28-59; телефакс (8-383) 266-28-59; e-mail: izvuz_str@sibstrin. ru

ОАО «Новосибирский полиграфкомбинат», 630007, г. Новосибирск, 7, Красный проспект, 22, телефон 223-64-47.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
АССОЦИАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ СНГ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 6 (558)

Июнь 2005 г.

Издается с марта 1958 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Дукарт А. В., Олейник А. И. О демпфирующих свойствах неоднородного покрытия с регулярными включениями 4

Крылов И. И., Кретинин А. Н. Эффективные балки из тонкостенных профилей 11

Бабелло В. А. Напряженно-деформированное состояние высокой насыпи 15

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Никитенко А. Ф., Сивкова Н. Н. Расчет элементов конструкций на длительную прочность с использованием кинетической теории ползучести 20

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Абдрахманова Л. А., Старовойтова И. А., Хозин В. Г. Модифицированные жесткие пенополиуретаны для теплоизоляции 25

Клименко В. Г., Погорелова А. С. Влияние температурно-временных условий дегидратации природного гипса на его свойства 29

Рахимов М. М., Хабибуллина Н. Р., Рахимов Р. З. Композиционные шлакощелочные вяжущие с цеолитсодержащими добавками 33

Абдрахимов Д. В. Фазовые превращения при обжиге кирпича на основе отходов обогащения и золы ТЭС 36

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Максимычев О. И., Кудрявцев Ю. И. Организация систем автоматического управления строительного производства 42

Подласова И. А., Гусаков А. М., Кули-Оглы Е. Р. Внутренний влагоперенос в свежеуложенном бетоне конструкций, остывающих в зимних условиях 48

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Логачев К. И., Пузанок А. И., Селиванова Е. В. Численный расчет течения вблизи экранированного отсоса-раструба 53

Евстафьев К. Ю., Рульнов А. А., Юлдашева Д. К. Статическая оптимизация процесса сбраживания осадков сточных вод в метантенках 58

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

Завьялов М. А., Завьялов А. М. Энергетический баланс дорожного покрытия 61

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

Устинов Ю. Ф., Тепляков И. М., Авдеев Ю. В., Кононов А. А. Основные концептуальные принципы автоматизации и дистанционного управления землеройно-транспортными машинами 65

Издатель НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (Сибстрин), 2005

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

Вольская Л. Н., Скуднева М. В. О культурном ландшафте исторических городов Сибири 67
Карелин Д. В. Деревянное зодчество городов Западной Сибири конца XVIII — первой половины XIX вв 70
Морозова Е. Б. Смена формообразующих факторов как условие эволюционного развития промышленной архитектуры 74

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Кожухар В. М. Оценка социально-экономической эффективности защитных мероприятий по ограничению внешнего гамма-облучения в помещениях 83
Кользеев А. А. Оценка влияния толщины полок на устойчивость внецентренно-сжатых стержней из прямоугольных труб 85
Локтионов А. П. Концепция модели исследования внутренних силовых факторов в элементах конструкций измерительными ячейками 88
Моисеенко Р. П. Матричная форма энергетического метода в расчетах ребристых прямоугольных пластин на собственные колебания 94
Пузина Н. А., Дейнека В. В. Информационные и коммуникационные технологии в городском управлении 99
Матус Е. П. Применение компьютерного моделирования при расчете прочности на растяжение фибробетона 103
Асанов А. А. Математическая модель для исследования рабочих процессов формировочных машин 106

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

Скибин Г. М. Экспериментальное моделирование работы грунтового основания под подошвой жесткого ленточного фундамента 108

CONTENTS

BUILDING STRUCTURES

Dukart A. V., Oleinik A. I. On Demping Properties of Heterogeneous Coating with Regular Engagements 4
Krylov I. I., Kretinin A. N. Effective Beams out of Thin Walled Outlines 11
Babello V. A. Stress-Strain State of High Embankment 15

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

Nikitenko A. F., Sivkova N. N. Calculation of Structures Elements for a Long Strength with Application of the Kinetic Theory of Creeping 20

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Abdrakhmanova L. A., Starovoitova I. A., Khozin V. G. Modified Hard Foam Polyurethanes for Thermalisolation 25
Klimenko V. G., Pogorelova A. S. The Influence of Temperature-Temporary Conditions of Natural Gypsum Dehydrotation on its Properties 29
Rakhimov M. M., Khabibullina N. R., Rakhimov R. Z. Composite Slag-alkoline Binders with Zeolite Containing Additions 33
Abdrakhimov D. V. Phase Change in Brick Calcinlation Based on Waste Products Enrichment and TES Ashes 36

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION
AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

Maksimychev O. I., Kudryavtsev Yu. I. Organization of Automatic Control Systems in Construction 42
Podlasova L. A., Gusakov A. M., Kuli-Ogly E. P. Internal Moisture Transfer in Fresh Concrete Placement in Structures Cooling down in Winter Conditions 48

SANITARY ENGINEERING

Logachev K. I., Puzanok A. I., Selivanova E. V. Numerical Analysis of the Flow near the Shielded Exhast Suction 53
Evstafiev K. Yu., Rulnov A. A., Yuldasheva D. K. Static Optimization of Sludge Digestion Process in Methanetanks 58

CONSTRUCTION OF MOTOR ROADS AND BRIDGES

Zaviyalov M. A., Zaviyalov A. M. Energetic Balance of a Road Coating 61

BUILDING AND ROAD MACHINES

Ustinov Yu. F., Teplyakov I. M., Avdeev Yu. V., Kononov A. A. General Conceptional Principles of Automation and Distance Control of Earth Moving Machines 65

SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY

Volskaya L. N., Skudneva M. V. On Cultural Landscape of Historical Siberian Towns 67
Karelin D. V. Wooden Architecture of the West Siberian Towns of the End of XVIII and the First Half of XIX Centuries 70
Morozova E. B. Change of Fomation Factors as Condition for Evolutionary Development of Industrial Architecture 74

SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION

Kozhukhar V. M. Estimation of Social and Economical Effectiveness of Defensive Measures to Limit Outer Gamma-Irradiation in Houses 83
Kolzeyev A. A. Estimation of Flange Thikness Influence on the Stability of Eccentrically Compressed Rods of Rectangular Tubes 85
Loktionov A. P. Conception of the Model to Investigate Internal Power Factors in Elements of Structures by Measuring Cells 88
Moiseyenko R. P. Matrix Form of the Energy Method in Calculations of Ribbed Rectangular Plates for Natural Vibrations 94
Puzina N. A., Deineka V. V. Information and Communication Technology in Town Manegement 99
Matus E. P. Application of Computer Simulation to Calculate Tensile Strength of Fibrous Concrete 103
Asanov A. A. A Mathematical Model to Investigate Working Processes of Moulding Machines 106

IN HIGHER SCHOOL LABS

Skibin G. M. Experimental Simulation of Soil Foundation Work under the Base of Rigid Belt Bottom 108

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Известия вузов. Строительство» включен (п. 214) в «Перечень периодических научных изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук», утвержденный решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации от 17 октября 2001 г.

Бюллетень ВАК Минобразования России, № 1, 2002

УДК 624.042 : 534.01

А. В. ДУКАРТ, д-р техн. наук, проф. (Московский государственный строительный университет), **А. И. ОЛЕЙНИК**, д-р техн. наук, доц. (Рудненский индустриальный институт)

О ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВАХ НЕОДНОРОДНОГО ПОКРЫТИЯ С РЕГУЛЯРНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Методом конечных элементов исследуются свойства демпфирующего покрытия в виде слоя, внешняя поверхность которого снабжена регулярной системой тонких включений, имеющих взаимные перекрытия. Выявлено положительное влияние включений на демпфирующую способность покрытия. Численные данные согласуются с результатами, полученными методами теории многослойных конструкций.

В строительстве, машиностроении, авиастроении и ряде других отраслей техники существует острая необходимость в снижении уровня колебаний тонкостенных конструкций пластинчатого и оболочечного типов. Для решения этой проблемы широко применяются однородные однослойные и многослойные демпфирующие покрытия с чередующимися мягкими и жесткими слоями [1–3]. Мягкие слои могут иметь дискретные включения и армирующие элементы, форма и физические свойства которых существенным образом влияют на характер работы слоев [4–7]. Результаты, полученные в перечисленных и других работах, показывают, что стесняющие жесткие слои и дискретные особенности усиливают демпфирование в мягких слоях покрытия. Вместе с тем они увеличивают жесткость и частоты собственных колебаний системы в целом, что [1–3] неблагоприятно отражается на демпфирующих свойствах тонкостенной конструкции.

Многослойное покрытие [8], образуемое взаимно пересекающейся системой локальных демпфирующих слоев различной жесткости, в значительной степени лишено указанного недостатка. Регулярные жесткие включения способствуют возникновению в мягком демпфирующем слое преимущественно сдвиговых деформаций, которые обеспечивают повышенное рассеяние энергии при колебаниях. На рис. 1 приведены различные варианты расположения чередующихся слоев различной жесткости. Варианты распределения включений круглой формы предложены в [8]. В общем случае нанесение чередующихся слоев образует мозаичную структуру, в которой должны быть увязаны как форма отдельных слоев, так и их расположение. Как частный случай авторами в [8] исследовались демпфирующие свойства покрытия с абсолютно жесткими безынерционными линзообразными включениями. Рассматриваемая модель представляет собой комбинацию двух многослойных структур, первая из которых является двухслойной пластинкой с осевой ориентацией слоев, а вторая — с наклонной (в частном случае — трансверсально ориентированной) регулярной системой слоев с линзообразными включениями (линзами). Такая конструкционная модель покрытия естественным образом возникает при частичном нанесении демпфирующих слоев на приконтурных участках пластин и оболочек, где особенно велики сдвиговые деформации, а также при покраске вибрирующей поверхности демпфирующими мастиками и эмалями (компаундами) с различными свойствами. Для численного исследования неоднородной модели в [8] использовался сложный математический аппарат специальных функций и теории многослойных конструкций [9].

Дальнейшее изучение свойств демпфирующего покрытия требует привлечения численных методов. С этой целью в данной работе используется метод конечных элементов, позволяющий детально исследовать влияние жесткости линз и других параметров на демпфирующую способность покрытия. Он дает возможность, в частности, учесть эффект проскальзывания и другие условия на границах контакта линз и демпфирующего материала.

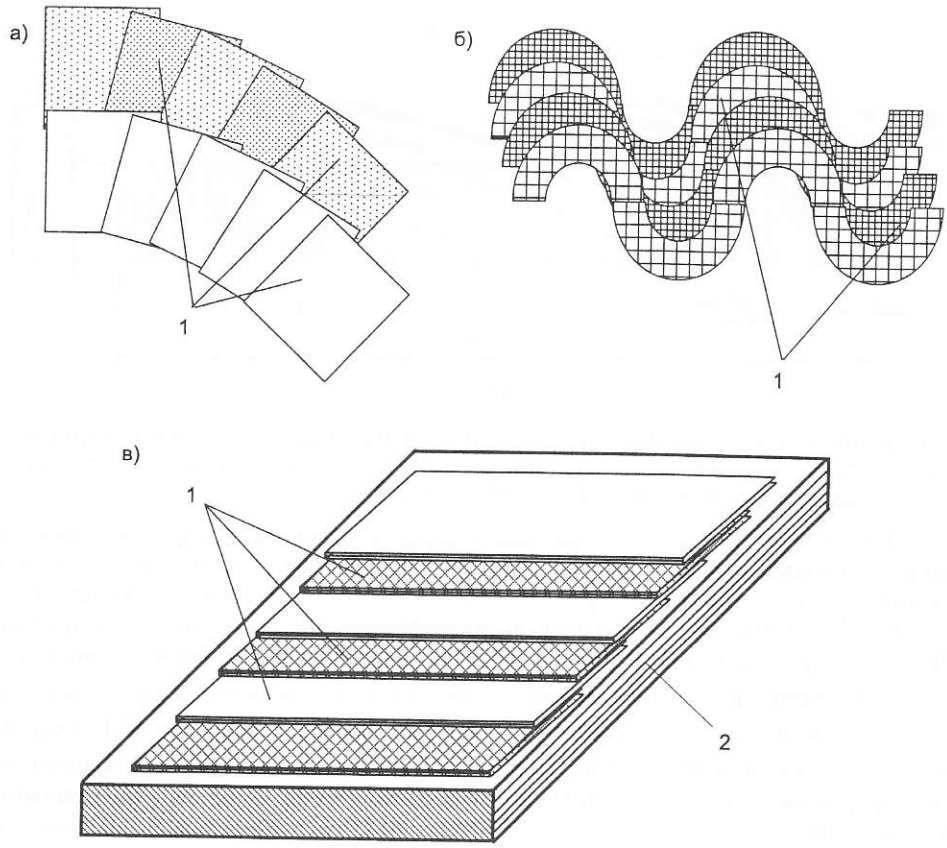


Рис. 1. Варианты демпфирующего покрытия с веерным расположением слоев (*а*), распределением слоев в виде криволинейных (*б*) и прямолинейных (*в*) лент

1 — демпфирующие слои; *2* — несущая пластина

Повышение точности расчета за счет измельчения сетки разбиения на конечные элементы может быть достигнуто путем приведения исследуемой задачи изгиба пластинки к плоской задаче. В качестве расчетной принята двухслойная пластинка конечной ширины и бесконечной длины с шарнирным опеpанием по длинным сторонам и включениями в виде прямоугольных полос, расположенными параллельно длинным сторонам (рис. 1, *в*). В этом случае пластинка (рис. 2) находится в условиях цилиндрического изгиба, и для исследования ее колебаний достаточно рассмотреть полосу единичной ширины.

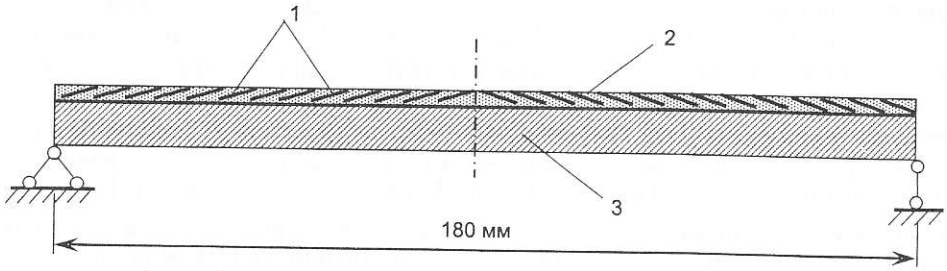


Рис. 2. Поперечное сечение пластинки с демпфирующим покрытием

1 — линзообразные включения; *2* — демпфирующий слой; *3* — пластинка

Ограничимся рассмотрением симметричных форм собственных колебаний изучаемой модели. Этому случаю соответствует расчетная схема, приведенная на рис. 3. Исследуемая модель включает демпфирующий слой *1*, линзообразные включения *2* и несущую пластинку *3*. Каждый из перечисленных элементов ($j = \overline{1,3}$) выполнен из линейного изотропного материала с модулем упругости E_j, коэффициентом Пуассона ν_j, плотностью ρ_j и коэффициентом

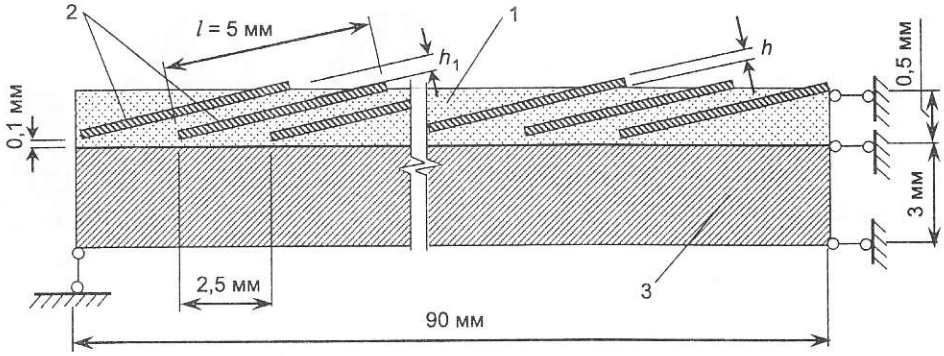


Рис. 3. Расчетная схема задачи

внутреннего трения γ_j. Рассеяние энергии в материале учитывается по гипотезе частотно-независимого трения, в соответствии с которой вводится комплексный модуль упругости $\bar{E}_j = E_j(1 + i\gamma_j)$ [8].

Представляется целесообразным получить результаты расчета в безразмерных параметрах. Для этого введем фиксированные отношения параметров жесткости и плотности материалов демпфирующего слоя и несущей пластинки: $E_1 / E_3 = 0{,}01$, $\rho_1 / \rho_3 = 0{,}5$. Для линзообразных включений принято отношение $\rho_2 / \rho_3 = 1$, а относительная жесткость E_2 / E_3 и величина коэффициента демпфирования γ_2 материала линз меняются в широких пределах. Значения параметров несущей пластинки ($E_3 = 0{,}7 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho_3 = 2700$ кг/м^3) соответствуют алюминиевым сплавам. Параметры жесткости и плотности элементов демпфирующего покрытия, определяемые введенными выше фиксированными отношениями, охватывают широкий класс пластмасс, виброзащитных мастик и компаундов [2, 3].

В работе сделан акцент на изучении демпфирующих свойств тонких покрытий (в несколько раз меньших толщины несущей пластинки), создаваемых, в частности, путем послойного нанесения [2]. С увеличением толщины покрытия его демпфирующие свойства возрастают. Однако при этом происходит существенное искажение частотных характеристик тонкостенной конструкции и ее утяжеление, что во многих ситуациях нежелательно.

В [8] авторами подробно рассмотрено влияние степени взаимного перекрытия линзообразных включений. Здесь основное внимание уделим исследованию влияния на демпфирующую способность покрытия жесткости включений, их линейного размера l и толщины h (см. рис. 3). Шаг распределения линзообразных включений 2, обеспечивающий полное взаимное их перекрытие, принят равным $a = l/2$. Анализировались три варианта расположения линз: I — a = 5 мм (17 линз); II — a = 2,5 мм (35 линз); III — a = 1,5 мм (59 линз); и два варианта толщин включений, соответствующих при h = 0,1 мм тонким, а при h = 0,15 мм — толстым линзам. При заданной толщине линз h и шаге их распределения суммарная толщина δ демпфирующего слоя *1* и величина зазора между линзами h_1 остаются постоянными для всех трех случаев и равны соответственно: $\delta = 2h + 0{,}1$ мм; $h_1 = 0{,}2 - h$. Для тонких линз $h = h_1 = 0{,}1$ мм, т. е. толщина линз совпадает с величиной зазора между ними. В случае толстых линз $h >> h_1 = 0{,}05$ мм, т. е. толщина линз существенно больше величины зазора между включениями.

Для численного анализа рассматриваемой модели демпфирующего покрытия воспользуемся известными программами, реализующими модальный расчет конструкций методом конечных элементов. На рис. 4 показана сетка разбиения расчетной модели на треугольные конечные элементы. Некоторые результаты расчета представлены на рис. 5–8. Техническую сторону задачи иллюстрируют данные автоматической генерации сетки конечных элементов: вся расчетная схема (см. рис. 3) разбита на 8693 элемента и 18244 узла.

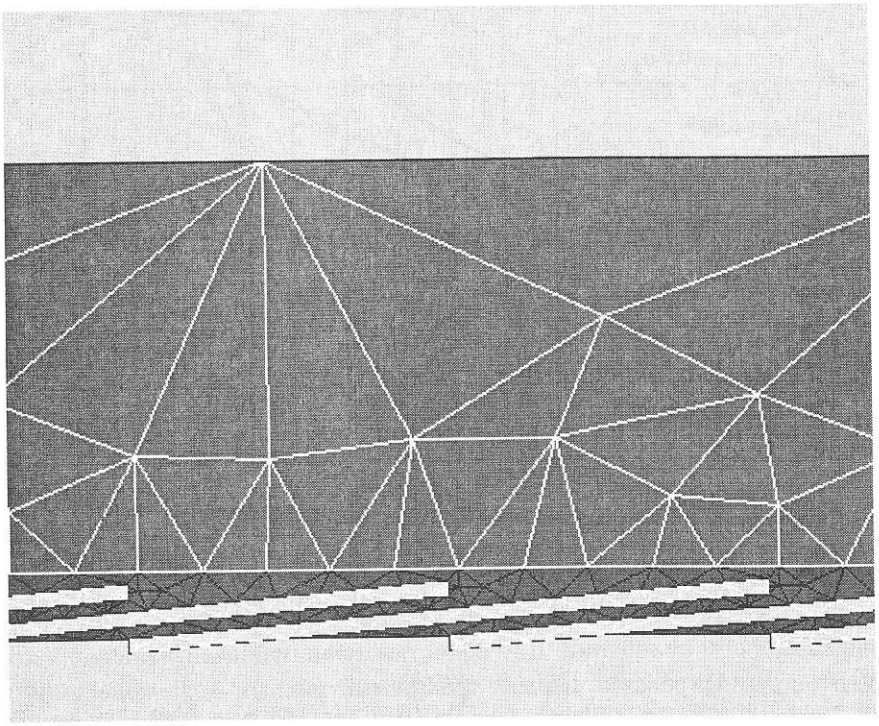


Рис. 4. Разбиение модели на конечные элементы

На рис. 5 приведены первые три формы (Y_k) собственных колебаний модели, где $f_k = \omega_k / \omega_0$ — безразмерный частотный параметр; ω_k — k-я собственная частота, $k = \overline{1,3}$; ω_0 — частота первой формы собственных колебаний модели без демпфирующего покрытия. Графики изменения коэффициентов демпфирования η_k указанных форм колебаний в зависимости от жесткости линз в случае тонких включений представлены на рис. 6. Они иллюстрируют изменение коэффициента демпфирования соответственно для I, II и III вариантов расположения линз первой (кривые $\overline{1,3}$), второй (кривые $\overline{4,6}$) и третьей

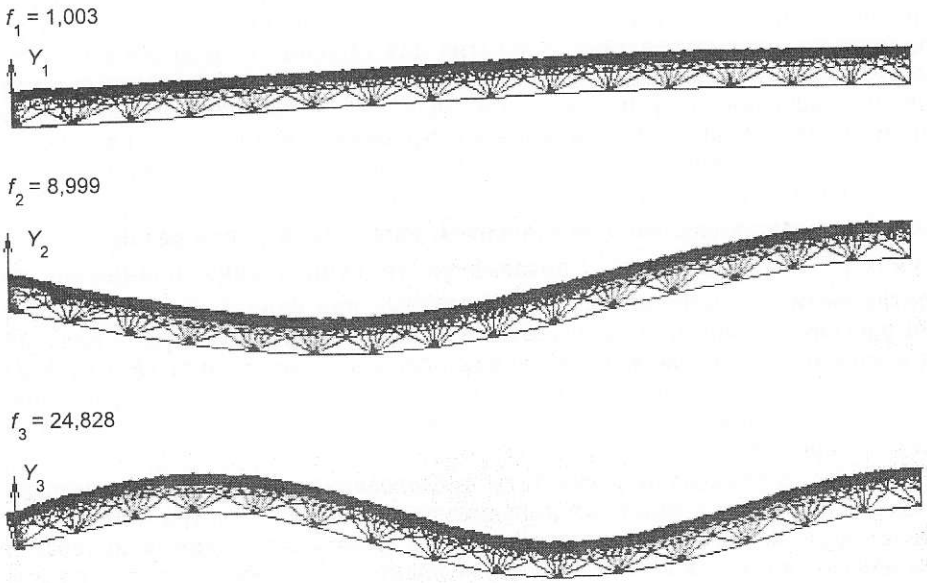


Рис. 5. Симметричные формы собственных колебаний пластинки с демпфирующим покрытием

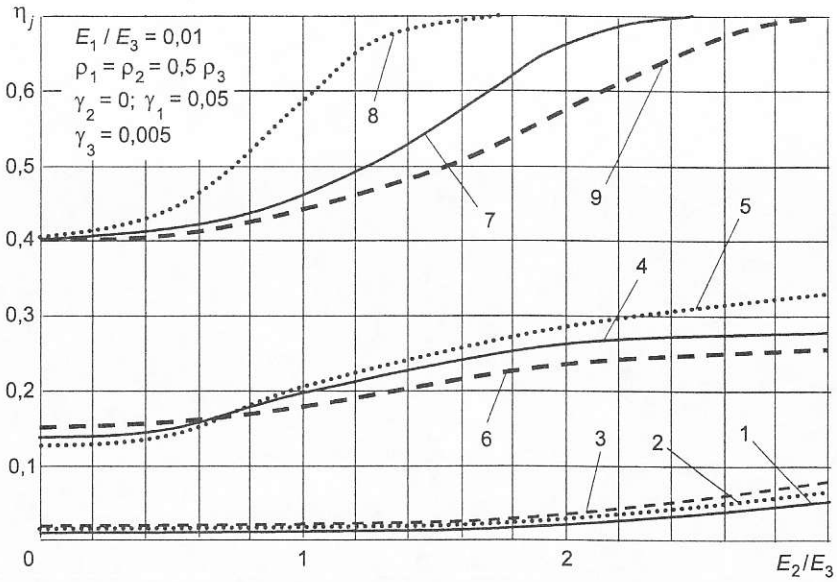


Рис. 6. Влияние жесткости включений на демпфирующую способность покрытия

(кривые $\overline{7,9}$) форм колебаний. Для сопоставления приведены значения коэффициентов демпфирования первых трех симметричных форм колебаний при отсутствии жестких включений: $\eta_1^* = 0{,}016; \eta_2^* = 0{,}145; \eta_3^* = 0{,}40$. Они близки к значениям начальных ординат соответствующих графиков при $E_2/E_3 = 0$. Анализ приведенных кривых показывает, что при слабом демпфировании в покрытии влияние включений становится ощутимым только для относительно жестких линз ($E_2/E_3 > 1$). При $E_2/E_3 = 3$, что практически соответствует абсолютно жестким линзам, эффективность покрытия увеличивается вдвое по сравнению с покрытием без включений. Чрезмерное уменьшение шага распределения линз ($a < 2{,}5$ мм) незначительно влияет на демпфирующую способность покрытия на первой форме колебаний и не дает повышения эффективности покрытия для второй и третьей форм колебаний (кривые 3, 6, 9 на рис. 6). В связи с этим в дальнейших исследованиях ограничимся рассмотрением варианта II. Отметим повышенное влияние включений на рассеивание энергии на второй и третьей формах колебаний, что позволяет рекомендовать рассматриваемое покрытие для гашения колебаний в области высоких частот. Демпфирующая способность покрытия возрастает при увеличении рассеяния энергии в его материале. Это иллюстрирует рис. 7, на котором приведены кривые изменения коэффициента демпфирования для первой формы собственных колебаний модели, полученные при различных значениях параметров γ_1, γ_3. Следует отметить подобие кривых *1*, *3* и *2*, *4*, соответствующих одинаковым значениям параметров γ_1 при различных значениях γ_3. Кривая *4* на рис. 7 показывает, что существенное повышение эффективности покрытия может быть получено при одновременном увеличении рассеяния энергии в демпфирующем слое, материале несущей пластинки и при значительной жесткости линзообразных включений ($E_2/E_3 > 2$). Полученные численные результаты свидетельствуют, что учет рассеяния энергии в материале тонких линз не отражается на демпфирующей способности покрытия.

На рис. 8 приведены результаты исследования эффективности демпфирующего покрытия с толстыми линзами. Кривые *1–7* иллюстрируют изменение коэффициента демпфирования первой формы собственных колебаний при изменении жесткости включений. Характерной особенностью исследуемой модели является существенное влияние рассеяния энергии в линзах (γ_2) на коэффициент демпфирования η_1. Сопоставление кривых на рис. 7, 8 показывает, что демпфирующее покрытие с толстыми линзами значительно

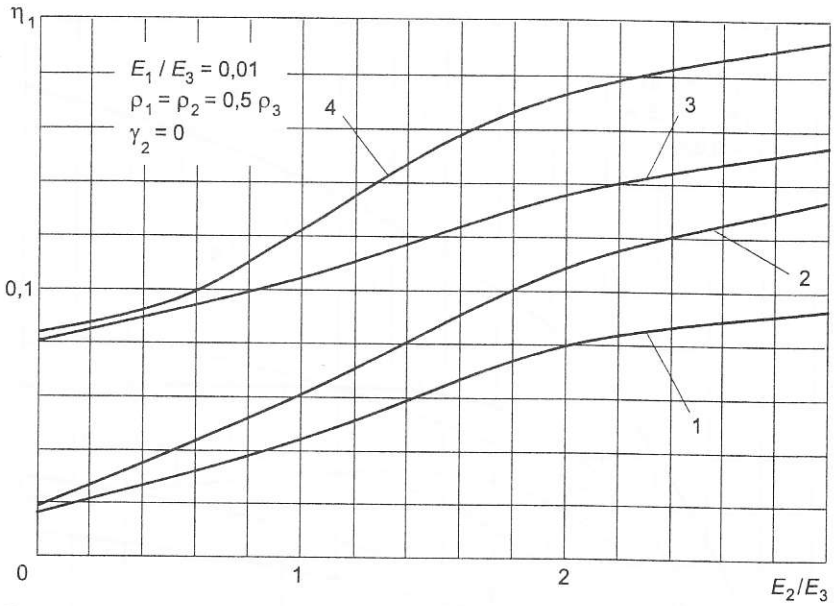


Рис. 7. Влияние рассеяния энергии в несущем слое γ_3 и материале покрытия γ_1 на величину коэффициента демпфирования первой формы собственных колебаний η_1 для покрытия с тонкими линзами

1 — $\gamma_1 = 0{,}2$, $\gamma_3 = 0{,}005$; *2* — $\gamma_1 = 0{,}3$, $\gamma_3 = 0{,}005$; *3* — $\gamma_1 = 0{,}2$, $\gamma_3 = 0{,}025$; *4* — $\gamma_1 = 0{,}3$, $\gamma_3 = 0{,}025$

эффективнее покрытия с тонкими включениями: в частности, существенное повышение эффективности покрытия может быть достигнуто при относительно низкой жесткости линзообразных включений ($E_2/E_3 < 2$). Например, при $\gamma_1 = \gamma_2 = 0{,}3$ уже при $E_2/E_3 \cong 0{,}6$ (кривая *7* на рис. 8) достигается удвоение коэффициента демпфирования по сравнению с покрытием без включений. Аналогичный эффект в случае тонких линз достигается только при $E_2/E_3 = 3$ (кривая *4* на рис. 7). Кривые *3*, *6* на рис. 8 иллюстрируют своеобразный эффект снижения эффективности покрытия при $E_2/E_3 > 1$, выявленный ранее в [8]. Теоретический интерес представляет анализ графиков $\eta_1(E_2/E_3)$ в области значений модуля упругости линзообразных включений $E_2/E_3 = 3$, когда они могут рассматриваться как абсолютно жесткие. В этой ситуации влияние сдвиговых деформаций, обусловленных включениями, сказывается максимально. Следует еще раз подчеркнуть, что высокая эффективность покрытия достигается при весьма низкой жесткости демпфирующего материала и относительно низкой жесткости линзообразных включений.

Демпфирующее покрытие рассматриваемого типа может быть рекомендовано для виброзащиты строительных и машиностроительных тонкостенных конструкций при частотно-широкополосных стационарных и нестационарных внешних воздействиях, и имеет широкий спектр применений. Оно достаточно просто реализуется на практике в различных формах, в частности, посредством чередующейся покраски эмалями и специальными мастиками. В конструктивных формах демпфирующих покрытий с использованием жестких линз крепление последних может осуществляться с помощью специальных клеев. Перспективным является использование таких покрытий для демпфирования колебаний оболочек, в частности, на динамически нагруженных участках труб большого диаметра, испытывающих большие импульсивные нагрузки гидравлической природы; в этом случае вариантом демпфирующего покрытия может служить чередование винтовых пластиковых и металлических обмоток. Подобное демпфирующее покрытие может быть нанесено на поверхности гибких высотных сооружений трубчатого типа, при этом линзообразные включения могут выполнять дополнительные функции защиты конструкции от воздействия внешней среды. Как специальное демпфирующее покрытие конструкцион-

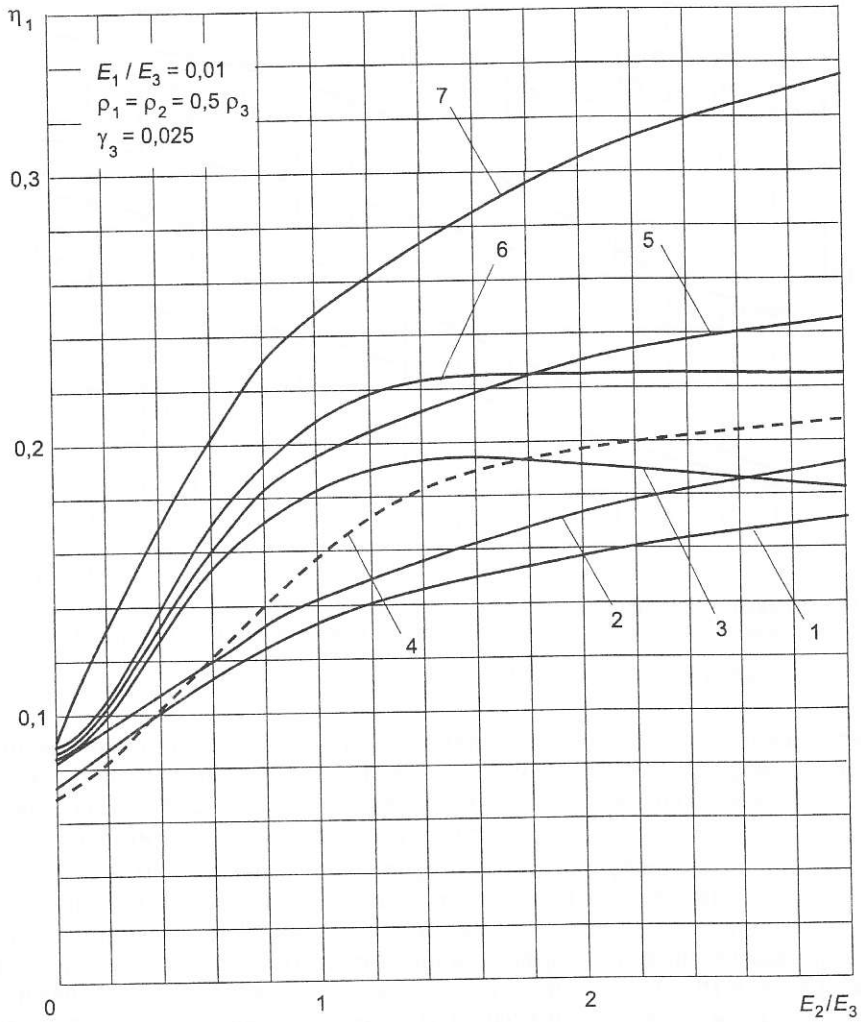


Рис. 8. Влияние рассеяния энергии в материале покрытия γ_1 и материале линз γ_2 на величину коэффициента демпфирования первой формы собственных колебаний η_1 для покрытия с толстыми линзами

1 — $\gamma_1 = 0{,}1$, $\gamma_2 = 0{,}1$; *2* — $\gamma_1 = 0{,}2$, $\gamma_2 = 0{,}05$; *3* — $\gamma_1 = 0{,}1$, $\gamma_2 = 0{,}2$; *4* — $\gamma_1 = 0{,}2$, $\gamma_2 = 0{,}1$; *5* — $\gamma_1 = 0{,}3$, $\gamma_2 = 0{,}1$; *6* — $\gamma_1 = 0{,}1$, $\gamma_2 = 0{,}3$; *7* — $\gamma_1 = 0{,}3$, $\gamma_2 = 0{,}3$

ного типа, рассматриваемое покрытие может быть разработано для гашения колебаний ограждающих конструкций зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров А. С. Вибропоглощение на судах/А. С. Никифоров.— Л.: Судостроение, 1979.— 184 с.
2. Nashif A. Vibration damping/A. Nashif, D. Johes, J. Henderson.— New York: John Wiley and Sons, 1985.— 470 p.
3. Зеленев Ю. В. Виброзащита радиоэлектронной аппаратуры полимерными компаундами/Ю. В. Зеленев, А. А. Кирилин, Э. В. Слободник, Е. Н. Талицкий.— М.: Радио и связь, 1984.— 119 с.
4. Ruzicka J. E. Damping structural resonance using viscoelastic shear — damping mechanism/J. E. Ruzicka//Journal of Engineering for Industry/ Trans. ASME.— 1961.— V. 83.— P. 403—413.
5. Spalding A. B. Placing small constrained layer damping patches on a plate to attain global or local velocity changes/A. B. Spalding, J. A. Mann//Journal of Acoustical Society of America.— June, 1995.— V. 97(6).— P. 3617—3624.
6. Plankett R. Length optimization for constrained layer damping/R. Plankett and C. T. Lee// Journal of the Acoustical Society of America.— July, 1970.— V. 48(1), Part 2.— P. 150—161.
7. Mead D. J. Passive vibration control/D. J. Mead.— Chichester: John Wiley and Sons, 1988.— P. 407—409.

8. Дукарт А. В. Об эффективности демпфирующего покрытия пластин, содержащего распределенные на внешней поверхности регулярные линзообразные включения/А. В. Дукарт, А. И. Олейник//Вісник Дніпропетровського університету. Механіка.— 2003.— Вип. 7.— Т. 2.— С. 52—64.
9. Болотин В. В. Механика многослойных конструкций/В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков.— М.: Машиностроение, 1980.— 375 с.

© Дукарт А. В., Олейник А. И., 2005

Получено 07.02.05

УДК 624.072.2.014

И. И. КРЫЛОВ, канд. техн. наук, проф., А. Н. КРЕТИНИН, асп. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

ЭФФЕКТИВНЫЕ БАЛКИ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования балок из тонкостенных гнутых стальных профилей с соединениями на самонарезающих винтах и болтах. Экспериментально доказана работоспособность и достаточная жесткость балок, разработана инженерная методика расчета и рациональная область применения.

Одноэтажные здания пролетами от 6 до 18 м в последние годы пользуются повышенным спросом. Это складские и производственные помещения предприятий различных отраслей, гаражи, автозаправочные станции, крытые рынки и другие здания. Снижение стоимости несущих конструкций таких сооружений возможно только при комплексном подходе: снижение расхода металла, стоимости изготовления при сокращении транспортных расходов. Создание эффективных балок на основе гнутых профилей позволило реализовать этот принцип. Новизна конструкций подтверждена патентом (Пат. РФ № 40758 "Конструкция из гнутых оцинкованных профилей" от 19 мая 2004 г.).

Разработанные балки — одностенчатые двутаврового сечения. Они состоят из поясов в виде спаренных профилей С-образного сечения высотой 90...250 мм и толщиной стенки 1,5...2,5 мм, в качестве стенки используется профилированный настил высотой 44...75 мм и толщиной 0,7...0,9 мм. Соединения элементов — на самонарезающих винтах и обычных болтах. Для сборки конструкций не требуется специальных приспособлений, из электроинструмента необходимы дрель, углошлифовальная машина ("болгарка") и гайковерт (шуруповерт). Сварные соединения отсутствуют. Конструкция балок предполагает их сборку непосредственно на строительной площадке.

Используемые профили могут быть оцинкованы или обработаны полимерным покрытием. За счет этого достигается долговечность конструкций от 30 до 50 лет.

Недостаток балок — значительное количество дискретных соединений, которые требуют дополнительных затрат времени для постановки.

Область применения балок — несущие элементы покрытия и рамы одноэтажных зданий пролетом от 6 до 18 м. Здания могут быть отапливаемые и неотапливаемые, с компоновкой по прогонной и беспрогонной схемам. Балки могут быть выполнены постоянного и переменного по длине сечения.

Для изучения особенностей работы таких несущих конструкций были проведены экспериментальные исследования двух крупномасштабных моделей балок (балки Б1 и Б2) пролетом 3,2 м и высотой 400 мм (рис. 1).

Пояса балок состоят из спаренных С-образных стальных профилей высотой 90 мм и толщиной 2 мм. Стенка балок выполнена из профилированного листа НС35-1000-0.6, установленного гофрами перпендикулярно поясам.

Крепление к гофрам стенки осуществлялось самонарезающими винтами 4,8×19 мм типа "металл-металл" и болтами М6. Соединения на их основе были испытаны предварительно.

Для балки Б1 использовались только самонарезающие винты.

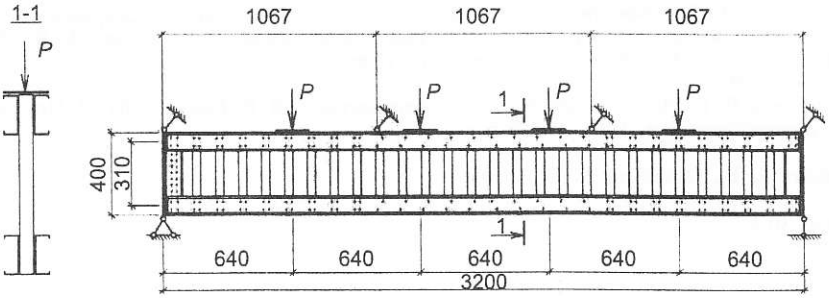


Рис. 1. Схема загружения балок

Конструктивные решения для балки Б2 корректировались на основании результатов испытания балки Б1. Основные внесенные изменения: вместо самонарезающих винтов в приопорной зоне установлены болты М6, а также дополнительные болты крепления площадок передачи нагрузки.

Испытания проводились на стенде в лаборатории кафедры металлических конструкций НГАСУ (Сибстрин). Стенд состоит из жесткого составного ригеля, установленного на колоннах. Схема загружения показана на рис. 1. Нагрузка от домкрата к балкам (силы P) передается через систему траверс. Устойчивость домкрата, траверс, балок обеспечивалась вертикальными направляющими и дополнительными раскосами.

Измерение напряжений осуществлялось с помощью тензорезистов базой 10 мм, наклеенных количеством 40 шт. на каждую балку. Тензодатчики были подключены стандартными кабелями к цифровому коммутатору многоканальной микропроцессорной тензометрической системы СибНИА ММТС-64.01. Показания датчиков обрабатывались программой "Тензометрическая система" версии V3.0 на ЭВМ.

Работа балки Б1 характеризуется следующими стадиями:

I стадия — упругая работа до P = 0,75 т;

II стадия — смятие тонкого металла в приопорных соединениях (от P = 0,75 т до 1 т);

III стадия — упругопластическая работа до нагрузки P = 1,9 т;

IV стадия — наступление предельного состояния (потеря местной устойчивости стенки в приопорных зонах и пояса под сосредоточенной силой P (рис. 3), значительные недопустимые деформации (рис. 2)).

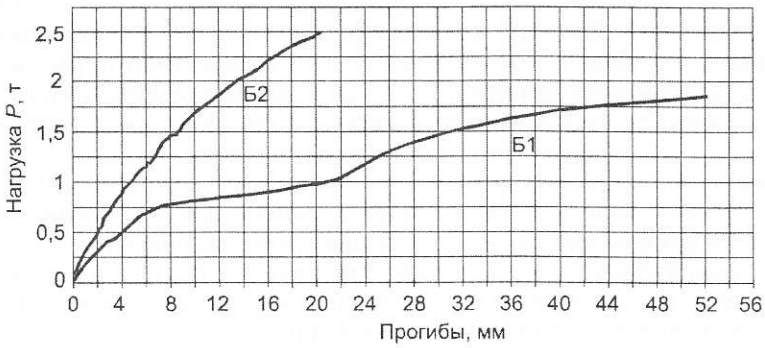


Рис. 2. Графики прогиба балок

Стадии работы балки Б2 следующие (рис. 3):

I стадия — упругая работа до P = 1,7 т;

II стадия — упругопластическая работа до P = 2,5 т;

III стадия — предельное состояние, наступившее за счет потери местной устойчивости верхнего пояса при P = 2,63 т (рис. 4).

Перед испытаниями было произведено компьютерное моделирование исследуемой балки методом конечных элементов с помощью программы "SCAD". Получив незначительные расхождения по прогибам и напряжениям

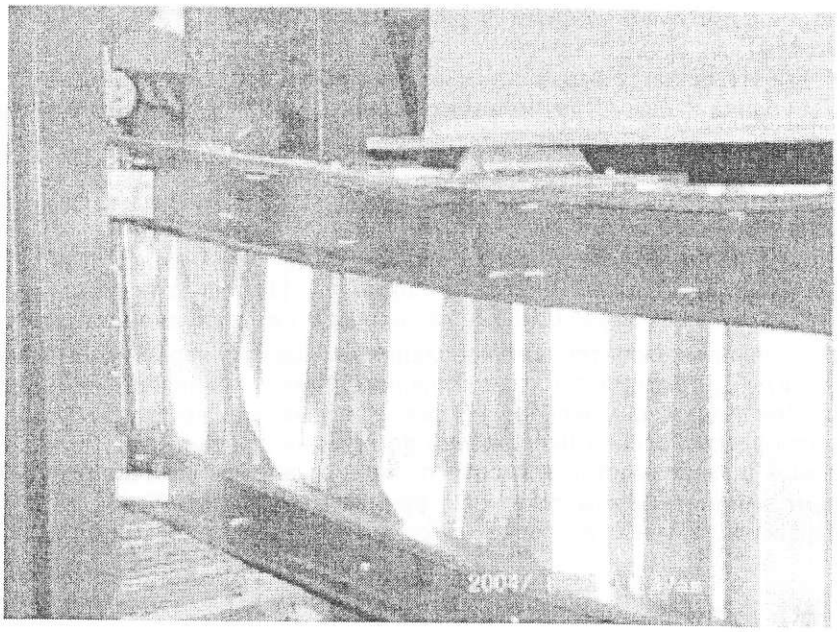


Рис. 3. Потеря устойчивости стенки и пояса балки Б1

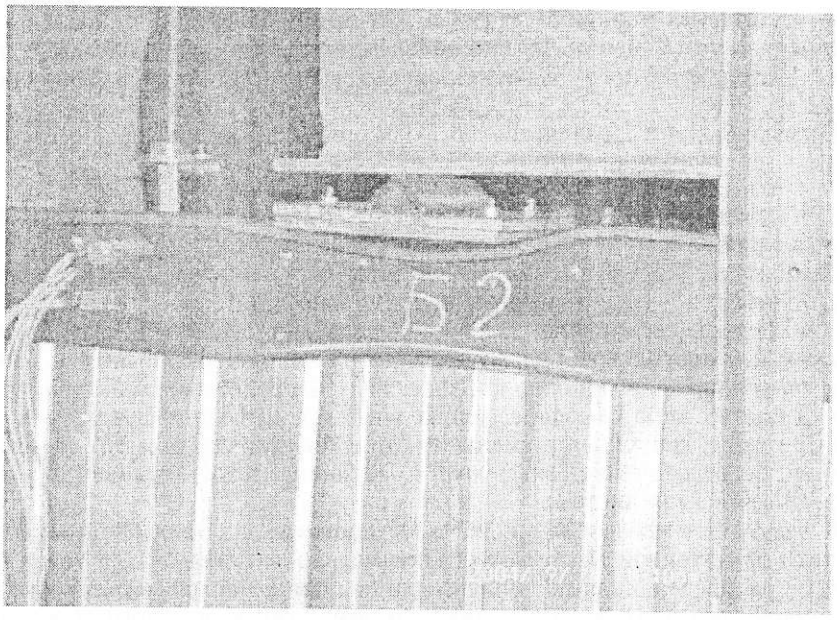


Рис. 4. Потеря местной устойчивости пояса балки Б2

с экспериментальной моделью, были исследованы численно балки пролетами 6, 9, 12 и 15 м. На основании этих результатов была предложена инженерная методика расчета.

Рекомендуется следующий подход. Высота сечения балок принимается в пределах 1/10–1/12 от пролета. Расчет балки производится из условия, что изгибающий момент воспринимается только поясами, на восприятие поперечной силы работает только стенка. Расчет поясов балки симметричного сечения сводится к проверке устойчивости верхнего пояса по формуле

$$\sigma = \frac{M}{\varphi_e \cdot h_0 \cdot A_n} \leq R_y \cdot \gamma_c, \qquad (1)$$

где M — изгибающий момент в расчетном сечении;
A_n — площадь сечения пояса;
h_0 — высота сечения балки по осям поясов.

Для балки несимметричного сечения необходима дополнительная проверка нижнего пояса по формуле

$$\sigma = \frac{M}{h_0 \cdot A_n} \leq R_y \cdot \gamma_c. \qquad (2)$$

Коэффициент φ_e предлагается определять по указаниям п. 5.27* [1]. Условная гибкость λ_{ef} определяется по табл. 7 п.1. [1], как для сквозного стержня с решеткой по формуле (20), где для определения α_1 принимать длину l равной расстоянию между точками крепления гофров самонарезающими винтами (болтами), A_{d1} принимается равной произведению толщины стенки на высоту пояса. При вычислении эксцентриситета e учитывается коэффициент неравномерности распределения напряжений по сечению пояса k_h = 1,15...1,25, принимаемый в зависимости от высоты пояса и от высоты сечения балки. Коэффициент влияния формы сечения η принимать по табл. 73 [1] п. 5.

Проверка прочности стенки на срез производится по формуле

$$\tau = \frac{Q}{\Sigma t_w \cdot h_w} \leq R_s \cdot \gamma_c, \qquad (3)$$

где Q — поперечная сила в расчетном сечении;
h_w — высота стенки;
Σt_w — суммарная толщина стенки в расчетном сечении.

Местная устойчивость стенки обеспечивается при необходимости постановкой дополнительного листа. Проверка выполняется по рекомендациям гл. 5 [2].

Прогиб балки определяется по формуле

$$f = k_s \cdot f_b, \qquad (4)$$

где k_s — коэффициент, учитывающий увеличение прогиба за счет деформативности соединений, изменяющийся в пределах 1,3–1,4;
f_b — прогиб, вычисленный, как для обычной балки, с моментом инерции $J_x = 2J_{0x} + An(h_0/2)^2$ (J_{0x} — момент инерции профиля).

Дискретные соединения рассчитываются аналогично расчету болтовых соединений с корректировкой на толщину соединяемых профилей. Требования к соединениям: в приопорной зоне до 1/4 пролета устанавливаются несколько болтов либо самонарезающих винтов в каждой гофре стенки, в остальных гофрах допускается уменьшение количества соединений. Места приложения сосредоточенной нагрузки к верхнему поясу требуется усилить распределительным листом.

В результате исследования балок установлено, что они работоспособны, обладают достаточной жесткостью. Оптимальной нагрузкой для таких балок является распределенная по длине балки нагрузка. Расход металла на покрытия с пролетами 9–18 м, полученный по результатам опытного проектирования, составляет 15–25 кг/м^2.

Проведенный сравнительный анализ ТЭП, учитывавший рыночные цены на металл, изготовление конструкций, монтаж и транспортные расходы, показал снижение стоимости квадратного метра более чем на 30% в сопоставлении с традиционными решениями из металлопроката, что подтверждает высокую эффективность разработанных балок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции.— М., 1991.
2. Бирюлев В. В. Проектирование металлических конструкций/В. В. Бирюлев, И. И. Кошин, И. И. Крылов, А. В. Сильвестров.— Л.: Стройиздат, 1990.

© Крылов И. И., Кретинин А. Н., 2005

Получено после доработки 18.02.05

УДК 624.131.439

В. А. БАБЕЛЛО, канд. техн. наук, доц. (Читинский государственный университет)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОЙ НАСЫПИ

С использованием модели упруго-идеальнопластической среды установлены особенности напряженно-деформированного состояния высоких насыпей (отвалов), имеющих разгрузочные бермы или без них. Показано, что в определенных условиях более экономичны насыпи (отвалы) с контурами, лишенными берм. Выявлены причины разрушения водопропускных труб, выполненных под высокими насыпями.

При добыче полезных ископаемых открытым способом возникает вопрос о рациональном использовании земельных площадей, отводимых под отвалы. Актуальность этого вопроса связана с необходимостью сохранения полезных сельскохозяйственных угодий и защиты экосистемы региона. Эта задача может быть решена путем анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) отвалов и поисков рациональных размеров и конфигурации откосов отвального массива. Последнее обстоятельство существенно зависит от механических свойств отвальных пород (или грунта).

Для установления наиболее надежных механических характеристик отвальных пород (или грунта) разрабатываются специальные установки, позволяющие в натурных условиях определить прочностные и деформационные характеристики материала отвалов [1].

НДС насыпей с различной конфигурацией откосов обычно оценивают с использованием моделей линейно-деформируемой [2] или нелинейно-деформируемой [3] среды. В последнем случае, учитывая неоднородность свойств отвальных пород, целесообразно использовать модель упруго-идеальнопластической среды с осредненными значениями физико-механических характеристик отвального материала — модуля деформации E, коэффициента Пуассона ν, сцепления c, угла внутреннего трения φ, удельного веса грунта γ. Наименьшие погрешности расчета получаются при этом в случае использования физико-механических характеристик отвальных пород, установленных полевыми испытаниями. В условиях вскрыши Уртуйского угольного разреза (Читинская область) таким образом были получены значения $\varphi = 34°$, $c = 60$ и 2,6 кПа, $\gamma = 20{,}4$ и 17,4 кН/м^3, $E = 8000$ кПа для отвалов № 1 и № 2 соответственно. Контуры отвалов представлены на рис. 1. Угол наклона откосов — 35°, общая высота откосов — 45 м, ширина берм — по 50 м. Расчетная область для исследования НДС отвалов методом конечных элементов была представлена системой конечных элементов с размерами 5×7,1 м.

На рис. 1 показаны изолинии полученных расчетом главных напряжений σ_1 и σ_3; установлены также значения углов наклона θ напряжений σ_1 к горизонту (таблица). Положительные значения углов θ означают отклонение напряжений σ_1 от горизонтали против часовой стрелки. Как видно из таблицы, устройство берм на участке между точками 3–10 приводит к заметным отклонениям направлений главных напряжений по сравнению с откосом без берм. Главные максимальные напряжения σ_1 у поверхности откоса естественно имеют направления, параллельные поверхности откоса. Этих данных достаточно для вычисления любых компонентов напряжений, действующих по любому направлению. Здесь же показаны области пластических деформаций (штриховкой) и области разрушений (разрывов, черный цвет) (см. рис. 1).

Начальные контуры откосов отвала с двумя бермами (рис. 1, *а*) не обеспечивают его максимальной приемной емкости. Контур отвала с одной бермой (контур 1б на рис. 1, *б*) по этому показателю более экономичен. Наконец, контур 1в на рис. 1, *в* обеспечивает максимально возможную емкость отвала.

Особенности развития областей пластических деформаций также представлены на рис. 1. Глубина этих областей максимальна на рис. 1, *а* и минимальна на рис. 1, *в*. Области разрушения (разрывов) формируются вблизи по-

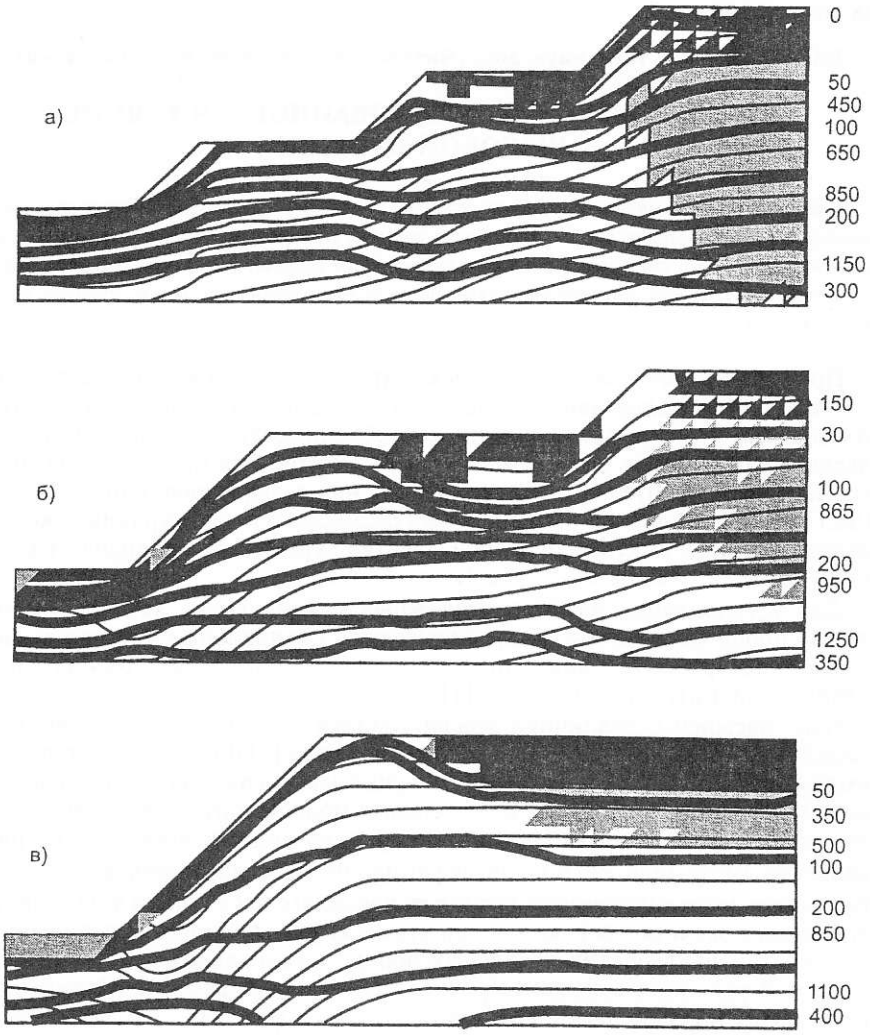


Рис. 1. Контуры отвалов вскрышных пород Уртуйского разреза, установленные традиционными методами расчета их устойчивости (1а), (1б) и с учетом особенностей их напряженного состояния (1в)

— σ_1; — σ_3 (кПа)

№ откоса	№ точки (рис. 3)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
а	θ°	27	35	71	−85	−81	88	86	90	−87	88	89	90	90
б	θ°	26	37	72	86	89	−88	−88	−87	−87	88	89	90	90
в	θ°	25	32	66	82	88	−89	−90	−88	−89	90	90	90	90

верхности отвалов — на участках с наибольшими осадками и с наибольшей неравномерностью осадок. Подобные области появились и у основания откоса; эти области увеличиваются по мере увеличения высоты откоса. Так, на рис. 1, *а* их еще нет, на отвале с одной бермой (контур 1б на рис. 1, *б*) появляются единичные конечные элементы с пластическими деформациями, а на рис. 1, *в* у основания откосной части отвала появляется целая полоса, находящаяся в пластическом состоянии.

Оценивая НДС отвалов по рис. 1, *а* и *в* в целом, следует отметить, что области пластических деформаций при наиболее экономичной форме откоса (контур 1в на рис. 1, *в*) занимают меньшую площадь, чем в отвалах с одной или двумя бермами, а угрожающие выпиранием отвальной породы участки вблизи основания откоса 1в (рис. 1, *в*), можно легко ликвидировать устройст-

вом пригрузочных призм из более прочного материала. Размеры этих призм следует устанавливать соответствующим расчетом.

Таким образом, НДС наиболее экономичного отвала 1в (рис. 1, *в*) менее опасно с точки зрения возможности оползания откоса, чем отвалы, ограниченные откосами с бермами (1а, 1б на рис. 1 *а*, *б* соответственно).

Область пластических деформаций и разрушения отвальных пород отвала № 2 с уменьшенной характеристикой прочности c = 26 кН/м^2 имеют значительно большие размеры, чем в отвалах с более прочной породой (c = 60 кН/м^2 отвала № 1). Значительно больше и размеры пластических областей и у основания откоса; для обеспечения устойчивости этой части откоса в данном случае ее пришлось бы сделать более пологой.

На рис. 2 приведены эпюры вертикальных σ_z и горизонтальных σ_x напряжений в основании отвалов 1а–1в; на рис. 3 — отношения главных напряжений σ_3/σ_1 на этом же уровне. Этими отношениями косвенно оценивается степень приближения напряженного состояния материала отвала к предельному по прочности. Из рис. 2 видно, что очертания эпюр σ_z примерно следуют очертаниям контуров откосов. Из результатов приближенных расчетов напряжений σ_z нельзя не упомянуть результаты, полученные И. З. Лобановым [2], которые неплохо согласуются с приведенными здесь данными. Горизонтальные напряжения σ_x в отвалах 1а–1в имеют лишь количественные расхождения в областях, примыкающих к основаниям откосов.

Минимальные значения σ_3/σ, характерные для НДС, близкого к предельному по прочности, возникают выше подошвы отвала; на уровне подошвы

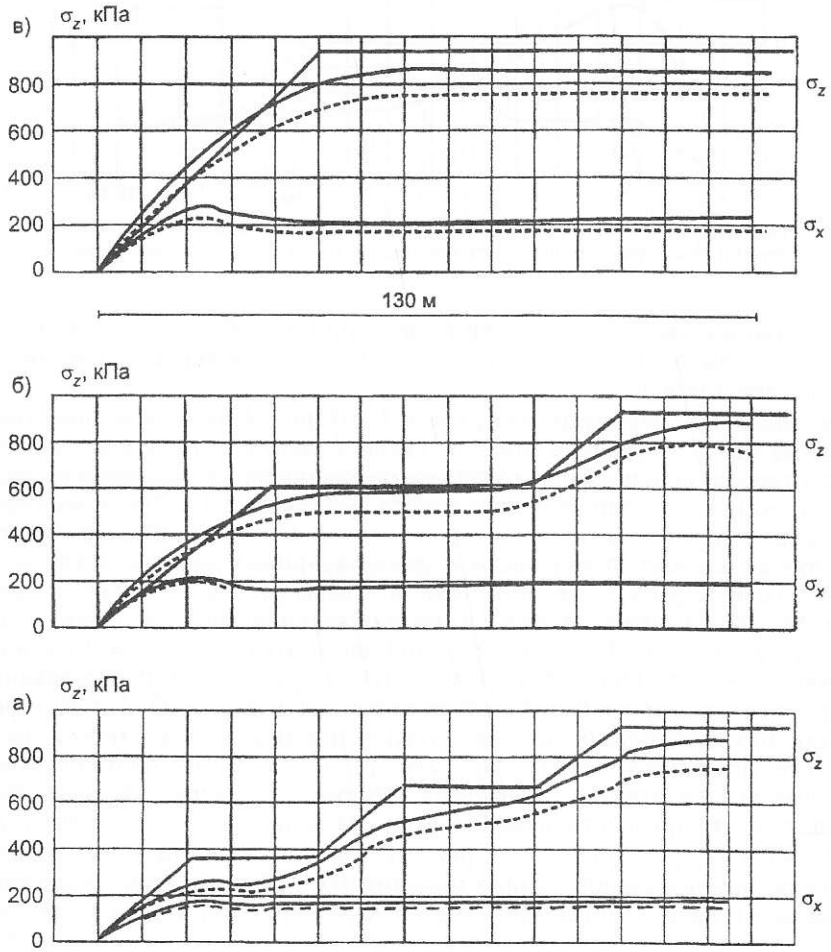


Рис. 2. Эпюры вертикальных (σ_z) и горизонтальных (σ_x) напряжений в основании отвала № 1 (сплошные линии) и № 2 (пунктир) при очертаниях-откосов 1а, 1б, 1в (*а*, *б*, *в* соответственно, см. рис. 1)

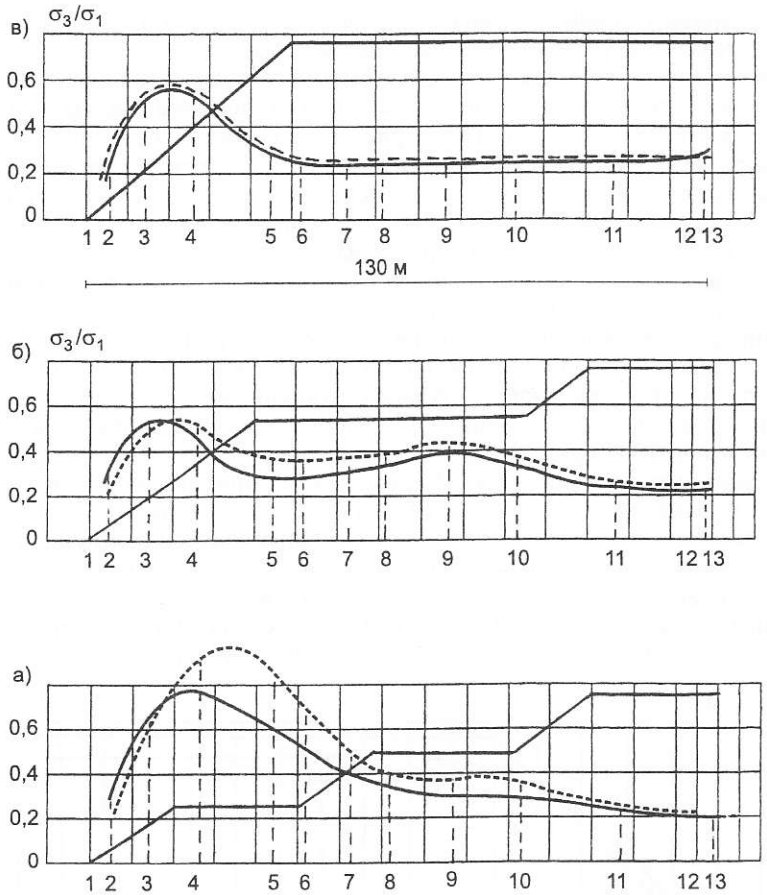


Рис. 3. Эпюры изменения значений σ_3/σ_1 в основании отвалов № 1 (сплошные линии) и № 2 (пунктир) при очертании откосов 1а, 1б, 1в (*а*, *б*, *в* соответственно, см. рис. 1)

отвала четко выраженных областей разрушения или областей, близких к разрушению, не выявлено, хотя форма эпюр σ_3/σ коррелирует с очертаниями поверхностей откосов.

Вертикальные перемещения s_z точек *1–10* (рис. 4) откосной поверхности, вызванные самоуплотнением отвалов, увеличиваются по мере приближения к бровке откосов; перемещения точек, расположенных на поверхности насыпи на некотором расстоянии от бровки откоса выравниваются. Таким же образом увеличиваются вертикальные смещения точек подошвы отвалов; величина смещения их зависит от мощности и деформационных характеристик подстилающего грунта, расположенного ниже подошвы отвала. Абсолютные деформации ΔS отвала определяются разностью вертикальных смещений его поверхности и подошвы. Так, в центральной части отвала 1а $\Delta S_z \approx 2{,}3$ м, а относительные — $\varepsilon_z = 0{,}051$. Эти результаты получены при использовании в расчетах постоянных значений модуля деформации $E = 8000$ кН/м^2. В реальных условиях необходимо учитывать увеличение модуля деформации квазиоднородного (по составу) отвала по глубине [4]. С учетом этого обстоятельства, расчетные осадки отвалов, вызванные собственным весом его, существенно уменьшатся, что приведет к изменению ожидаемой полезной емкости отвала.

Полученные результаты (см. рис. 4) выявили причины многочисленных случаев разрывов железобетонных монолитных и сборных труб, проложенных под высокими насыпями [2]. Как следует из рис. 4, эти причины заключаются в неравномерности осадок основания насыпи и уложенных в насыпи труб. Как видно, изгиб сопровождается увеличением длины трубы, что не обеспечивается прочностью ее материала; следствием последнего является расхождение стыков сборных или разрыв монолитных труб. Дополнительной причиной,

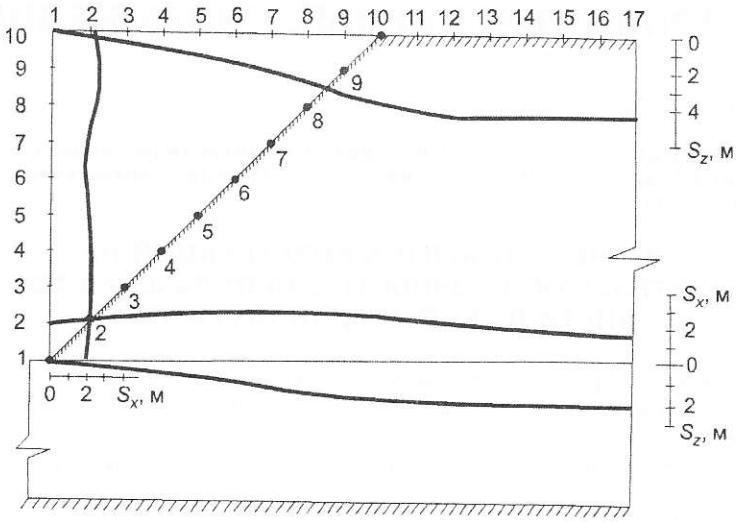


Рис. 4. Эпюры вертикальных (s_z) и горизонтальных (s_x) смещений поверхности и основания отвала № 1 при его самоуплотнении

приводящей к разрушению труб, являются горизонтальные смещения отвального материала в основании насыпи. Эти смещения создают горизонтальные касательные напряжения, воздействующие на верхнюю часть трубы и приводящие к появлению растягивающих напряжений в материале трубы. Утечки, сопутствующие процессу разрушения труб, ухудшают экологическую ситуацию на прилегающей территории.

Выводы. При прочих равных условиях устойчивость наиболее рационального типа отвалов со сплошным откосом без берм не ниже, чем устойчивость высоких отвалов с одной или двумя бермами.

При отсыпке в отвалы пород с низкими прочностными показателями, может потребоваться устройство опорной призмы или выполаживание нижней части откоса высокой насыпи.

Учет изменения модуля деформаций отвальной породы с глубиной может существенно повлиять на расчетную емкость отвала.

Наиболее напряженные области в отвалах развиваются выше их подошвы.

Под откосной частью отвала развиваются существенно различные осадки подошвы отвала. Последнее обстоятельство является главной причиной разрушения водопропускных труб, укладываемых под насыпями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабелло В. А. Совершенствование методики оценки прочности нескальных пород в полевых условиях/В. А. Бабелло//Изв. вузов. Строительство.— 2004.— № 5.— С. 115—118.
2. Лобанов И. З. Расчет слабых талых и оттаивающих оснований под насыпями с учетом пластических деформаций грунтов/И. З. Лобанов//Инженерно-геологические условия и особенности фундаментостроения в условиях Сибири: Межвуз. сб. науч. тр.— Новосибирск: МПС СССР, 1982.— С. 48—61.
3. Ухов С. Б. Сопоставления результатов численных и инженерных расчетов устойчивости склона сложного геологического строения/С. Б. Ухов, В. В. Семенов, Е. Ф. Гулько, М. Г. Мнушкин//Численные методы в геомеханике и оптимальное проектирование фундаментов: Межвуз. сб.— Йошкар-Ола, 1980.— С. 4—8.
4. Криворотов А. П. Влияние природной неоднородности грунта основания на результаты расчета осадок фундаментов/А. П. Криворотов//Изв. вузов. Строительство.— 1999, № 7.— С. 150—153.

© Бабелло В. А., 2005

Получено после доработки 04.02.05

УДК 539.4+539.376

А. Ф. НИКИТЕНКО, д-р физ.-мат. наук, проф. (Институт гидродинамики СО РАН);
Н. Н. СИВКОВА, ассист. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет)

РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Изложена методика расчета напряженно-деформированного состояния и времени начала разрушения балочных элементов конструкций, находящихся в условиях изгиба. В основу расчета положена кинетическая теория ползучести Ю. Н. Работнова. Соответствующие расчеты сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными. Отмечается вполне удовлетворительное их соответствие.

Кинетическая теория ползучести Ю. Н. Работнова, получив практически всестороннее экспериментальное обоснование [1], не нашла еще должного применения в расчетной практике. Ниже представлен один из примеров использования этой теории в расчетах напряженно-деформированного состояния и времени начала разрушения балок, нагруженных стационарными внешними температурно-силовыми воздействиями.

1. Пусть равномерно нагретая балка, поперечное сечение которой имеет две оси симметрии, нагружена постоянными во времени внешними усилиями. Температура считается постоянной. Применительно к этому случаю, т. е. к случаю одноосного напряженного состояния, система определяющих уравнений кинетической теории ползучести имеет вид [1–3]:

$$\dot{p} = \frac{B_1 \cdot \sigma^n}{\varphi(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \omega^{\alpha} \cdot (1 - \omega^{\alpha+1})^m; \tag{1}$$

$$\dot{\omega} = \frac{B_2 \cdot \sigma^{g+1}}{\varphi(\omega)}, \quad \omega(x, y, z, 0) = 0, \quad \omega(x^*, y^*, z^*, t_*) = 1, \tag{2}$$

где σ — напряжение, p — деформация ползучести, ω — параметр повреждаемости;

B_1, B_2, m, n, g, α — характеристики материала, полученные с помощью стандартной обработки экспериментальных данных [1]. Точка над соответствующим символом обозначает производную по времени. Принято считать, что для неповрежденного материала параметр ω равен нулю; если в момент $t = t_*$ в какой-то точке тела (элемента конструкции) он достигает критического значения, равного единице, то время $t = t_*$ будем называть временем начала разрушения тела.

Требуется определить напряженно-деформированное состояние изгибаемой балки на любой момент времени вплоть до начала ее разрушения.

Из (2) легко получить:

$$\omega = (1 - \mu)^{1/\alpha+1}, \tag{3}$$

где введенный для удобства параметр $\mu(x, y, z, t)$ есть:

$$\mu = \left\{ 1 - (\alpha + 1) \cdot (m + 1) \cdot B_2 \cdot \int_0^t \sigma^{g+1} d\tau \right\}^{1/(m+1)}, \tag{4}$$

а функция φ, фигурирующая в (1), (2), с помощью замены (3) принимает вид

$$\varphi(\mu) = \mu^m \cdot (1 - \mu)^{\alpha/\alpha+1}.$$

Очевидно, что с помощью этой же замены (3) от уравнения (2) можно перейти к уравнению

$$\dot{\mu} = -\frac{(\alpha+1)\cdot B_2 \cdot \sigma^{g+1}}{\mu^m}, \quad \mu(x, y, z, 0) = 1, \quad \mu(x, y, z, t_*) = 0, \tag{5}$$

откуда сразу же следует (4).

Обозначим кривизну нейтральной линии балки через æ. Пренебрегая мгновенной упругопластической деформацией на фоне развитой деформации ползучести, запишем в рамках общепринятых допущений [2, 4] гипотезу плоских сечений:

$$\dot{p} = \dot{æ} \cdot y. \tag{6}$$

Напомним, что начало координат прямоугольной системы x, y, z находится в центре тяжести поперечного сечения балки, ось z совпадает с ее геометрической осью.

Из сопоставления между собой (1) и (6) следует:

$$\sigma = \left(\frac{\dot{æ}}{B_1}\right)^{1/n} \cdot y^{1/n} \cdot [\varphi(\mu)]^{1/n}. \tag{7}$$

Вместо неизвестной пока функции $\dot{æ}(t)$ введем функцию $X(t)$ следующим образом:

$$\left(\frac{\dot{æ}}{B_1}\right)^{1/n} = \frac{M(z)}{J_n(z)} \cdot [X(t)]^{-1}, \tag{8}$$

где M — изгибающий момент, а J_n — обобщенный момент инерции поперечного сечения балки, причем $J_n = \int\limits_A y^{(n+1)/n} dA$;

A — площадь поперечного сечения балки.

Подставляя (8) в (7), получаем:

$$\sigma = \frac{M(z)}{J_n(z)} \cdot y^{1/n} \cdot \frac{[\varphi(\mu)]^{1/n}}{X(t)}. \tag{9}$$

Очевидно, что напряжение σ в любой момент времени t должно удовлетворять уравнению равновесия $\int\limits_A \sigma \cdot y \cdot dA = M$, которое с учетом (9) запишется в виде:

$$\int\limits_A y^{(n+1)/n} \cdot [\varphi(\mu)]^{1/n} dA = J_n \cdot X(t). \tag{10}$$

Известно, что решение сформулированной выше задачи в предположении установившейся ползучести материала есть [2, 4]:

$$\sigma^0 = \frac{M(z)}{J_n(z)} \cdot y^{1/n}, \quad \dot{æ}^0 = B_1 \cdot \left[\frac{M(z)}{J_n(z)}\right]^n. \tag{11}$$

Теперь становится очевидным, что решение (см. (8), (9)) исходной задачи свели к решению этой же самой задачи только в предположении установившейся ползучести материала. Для получения истинного решения необходимо известное решение (11) умножить, согласно (8), (9), на соответствующие функции от μ и X. Последние являются решением системы уравнений (5) и (10).

Для упрощения уравнения (5) введем в рассмотрение функцию $t^\circ(y, z)$

$$t^0 = [(\alpha+1)\cdot(m+1)\cdot B_2 (\sigma^0(y, z))^{g+1}]^{-1} \tag{12}$$

и вычислим из (5) время начала разрушения балки в предположении установившейся ползучести материала. Обозначая это время t_*°, получаем

$$t_*^0 = [(\alpha+1)\cdot(m+1)\cdot B_2 \cdot (\sigma^0(y^*, z^*))^{g+1}]^{-1}, \tag{13}$$

где y^*, z^* — координаты точки, в которой σ^0 достигает наибольшего значения.

Сопоставляя (12) и (13), заключаем, что $t_*^0 = t^0(y^*, z^*)$.

Подставим (9) в (5). После простейших операций получим с учетом (12)

$$\int_1^{\mu} \Psi(u)du = -((m+1)\cdot t^0)^{-1} \cdot \int_0^t [X(t)]^{-(g+1)} d\tau, \tag{14}$$

$$\Psi(u) = u^{m(n-g-1)/n} \cdot (1-u)^{-\alpha(g+1)/n(\alpha+1)}.$$

Система уравнений (10), (14) для определения μ и X является окончательной. Время начала разрушения балки вычисляется из условия $\mu(y^*, z^*, t^*) = 0$. Очевидно, что интеграл, стоящий в левой части равенства (14),

$$J = \int_1^0 \mu^{m(n-g-1)/n} \cdot (1-\mu)^{-\alpha(g+1)/n(\alpha+1)} d\mu,$$

в зависимости от числовых значений характеристик материала может представлять собой несобственный интеграл от неограниченной функции. Для его сходимости на характеристики $m \geq 0$, $n \geq 0$, $g \geq 0$, $\alpha \geq 0$ необходимо наложить соответствующие ограничения. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

1.1. Пусть $m = 0$, $\alpha \neq 0$, что соответствует упрочняющемуся в процессе ползучести материалу [1–3].

1.1.1. Положим, что $n \geq g+1$. В этом случае подынтегральная функция является неограниченной при $\mu = 1$, причем показатель степени $k = [\alpha(g+1)/$ $/n(\alpha+1)]$ всегда строго меньше единицы, что и обеспечивает сходимость интеграла.

1.1.2. Положим теперь, что $n < g+1$. Для сходимости интеграла требуем, чтобы показатель степени был меньше единицы, т.е. $k < 1$. Отсюда следует ограничение на показатель упрочнения α:

$$0 \leq \alpha < \frac{n}{(g+1)-n}.$$

1.2. Пусть теперь $\alpha = 0$, $m \neq 0$, что соответствует разупрочняющемуся в процессе ползучести материалу [1–3], а исследуемый интеграл принимает вид

$$J = \int_1^0 \mu^{m(n-g-1)/n} d\mu.$$

Введем необходимые в дальнейшем комбинации из характеристик материала, а именно:

$$\beta = \frac{m}{n + m\cdot(n-g-1)}, \quad \nu = \frac{n + m\cdot(n-g-1)}{n\cdot(m+1)}, \tag{15}$$

и рассмотрим, как и выше, встречающиеся на практике случаи, когда $n \geq g+1$ и $n < g+1$.

1.2.1. $n \geq g+1$. Очевидно, что показатель степени $k = m(n-g-1)/n$ положительный, подынтегральная функция без особенностей, исследуемый интеграл легко вычисляется и имеет конечное значение. Очевидно также, что $\beta \geq 0$, так как всегда $m \geq 0$. Легко показать, что при $n > g+1$ будет:

$$0 < \beta \leq 1, \text{ если } m \leq \frac{n}{[(g+2)-n]}; \quad \beta > 1, \text{ если } m > \frac{n}{[(g+2)-n]}.$$

Так как $m > 0$, то сразу же следует, что $n < g+2$.

При $n = g+1$ получаем $0 < \beta \leq 1$, если $m \leq n$; $\beta > 1$, если $m > n$.

1.2.2. $n < g+1$. В этом случае подынтегральная функция является неограниченной при $\mu = 0$. Для сходимости исследуемого интеграла надо потребовать, чтобы $k = m\cdot[(g+1)-n]/n < 1$. Легко показать, что в этом случае будет:

$$0 < \beta \le 1, \text{ если } m \le \frac{n}{[(g+2)-n]};$$

$$\beta > 1, \text{ если } \frac{n}{[(g+2)-n]} < m < \frac{n}{[(g+1)-n]}.$$

Если же показатель степени $k = m \cdot [(g+1)-n] / n \ge 1$, то исследуемый интеграл расходится, при этом $\beta = m / [n - m \cdot (g+1-n)] < 0$. Очевидно, что выписанные выше ограничения на характеристики материала не являются жесткими, они согласуются с имеющимися экспериментальными данными [1, 2].

2. Исследуем теперь напряженно-деформированное состояние балки и время начала ее разрушения. Пусть она изготовлена из разупрочняющегося в процессе ползучести материала, для которого $\alpha = 0$, $m \ne 0$, и $\varphi(\mu) = \mu^{m/n}$. В этом случае система уравнений (10), (14) принимает вид:

$$\int_1^{\mu} u^{m(n-g-1)/n} du = -((m+1) \cdot t^0)^{-1} \cdot \int_0^t [X(\tau)]^{-(g+1)} d\tau; \tag{16}$$

$$\int_A \mu^{m/n} \cdot y^{(n+1)/n} dA = J_n \cdot X(t). \tag{17}$$

Интегрируя (16), получаем:

$$\mu^{m/n} = \left[1 - \frac{\nu}{t^0} \cdot \int_0^t X(\tau)^{-(g+1)} d\tau\right]^{\beta}. \tag{18}$$

Подставим (18) в (17):

$$\int_A y^{(n+1)/n} \cdot \left[1 - \frac{\nu}{t^0} \cdot \int_0^t X(\tau)^{-(g+1)} d\tau\right]^{\beta} dA = J_n \cdot X(t). \tag{19}$$

В зависимости от числовых значений характеристики материала m, n, g параметр β (см. (15)) может быть отрицательным, положительным и, в частности, может быть $\beta = 1$. Решив систему уравнений (18), (19), допускающую численное решение за исключением случая $\beta = 1$, находим функцию $f = [\varphi(\mu)]^{1/n} / X$, зная которую определяем из (9) напряженное состояние в поперечном сечении балки на любой момент времени. Деформированное состояние определяется из (8) при известной функции $X(t)$.

На практике, как правило, реализуется случай $\beta \ne 1$. Поэтому очевидна целесообразность сопоставления соответствующих расчетных данных по изложенной выше методике с имеющимися экспериментальными результатами.

На рис. 1 в системе координат "кривизна нейтральной оси балки — время" представлены такие результаты. Получены они в условиях чистого изгиба балок прямоугольного поперечного сечения при температуре 250°С. Методика проведения таких экспериментов изложена в [5]. Материал балок — сплав Д16Т (пруток, диаметр 30 мм), ширина поперечного сечения балки $b = 10^{-3}$ м, высота $h = 20 \cdot 10^{-3}$ м. Прогиб балки замеряли на базе 0,1 м. Величина изгибаю-

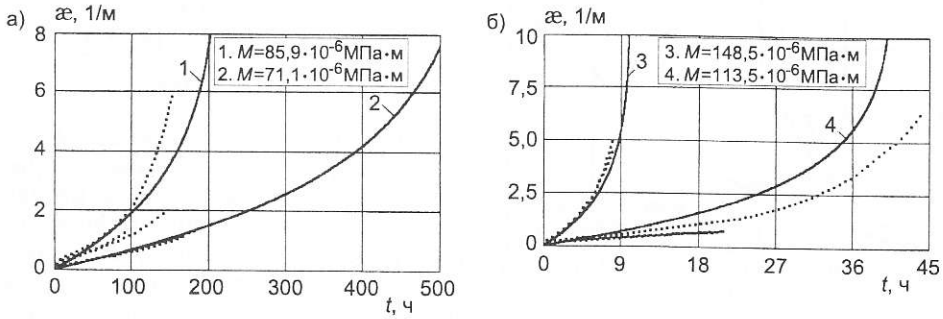


Рис. 1. Зависимость кривизны нейтральной оси балки во времени

щего момента назначалась такой, что продолжительность эксперимента колебалась от 8 до 170 часов. Характеристики материала, полученные с использованием стандартной методики обработки одноосных кривых ползучести, имеют следующие значения: $n = 5{,}35$; $g = 4{,}75$; $m = 11$; $B_1 = 3{,}5172 \cdot 10^{-15}$ $(\text{МПа})^{-n} \cdot \text{ч}^{-1}$; $B_2 = 2{,}7563 \cdot 10^{-15}$ $(\text{МПа})^{-(g+1)} \cdot \text{ч}^{-1}$. Согласно (15) получаем: $\beta = 11{,}6$, что, естественно, далеко от единицы.

На рис. 1 рассчитанная по изложенной выше методике кривизна балки показана сплошной линией, экспериментальные значения представлены точками. Очевидно, что соответствие расчетных данных экспериментальным вполне удовлетворительное.

На рис. 2 *а*, *б* показаны эпюры распределения параметра повреждаемости в поперечном сечении балки на различные моменты времени, практически вплоть до $t = t_*^0$; а на рис. 3 — эпюры распределения напряжений на эти же моменты времени.

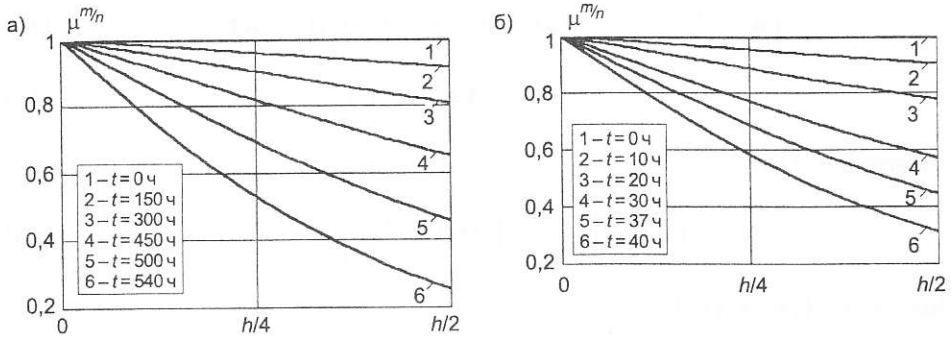


Рис. 2. Эпюры распределения параметра повреждаемости

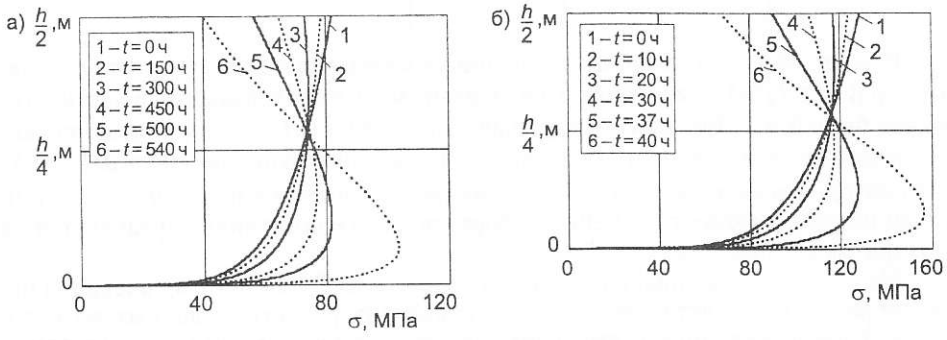


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений по высоте поперечного сечения

В качестве следующего примера рассмотрим аналогичные экспериментальные данные. Материал балок тот же, что и выше; сплав D16T, но только другой плавки. Размеры балок и температура испытания такие же, как и в предыдущих экспериментах. Характеристики материала имеют следующие значения:

$$n = g = 5;\ m = 10;$$

$$B_1 = 14{,}0430 \cdot 10^{-15}\ (\text{МПа})^{-n} \cdot \text{ч}^{-1};$$

$$B_2 = 0{,}9362 \cdot 10^{-15} (\text{МПа})^{-(g+1)} \cdot \text{ч}^{-1}.$$

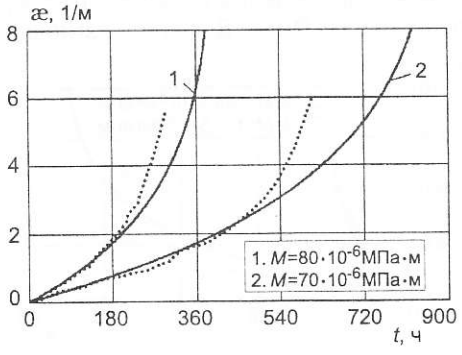


Рис. 4. Зависимость кривизны нейтральной оси балки во времени

На рис. 4 экспериментальные результаты представлены точками, а расчетные по изложенной выше методике — сплошными линиями. Можно с уверенностью утверждать, что, как и на рис. 1, соответствие расчетных данных экспериментальным вполне удовлетворительное.

Выводы. Использование кинетической теории ползучести в расчетах напряженно-деформированного состояния и времени начала разрушения балок, находящихся в условиях чистого изгиба, не встречает каких-либо трудностей математического плана и дает вполне приемлемые результаты, согласующиеся с экспериментальными.

Кинетическая теория ползучести позволила решение исходной задачи свести к решению этой же задачи в предположении установившейся ползучести материала. Методика решения таких задач хорошо разработана [2, 4], поэтому оно считается известным. Чтобы получить истинное решение, надо известное решение умножить на некоторые функции координат и времени, для определения которых получена соответствующая система уравнений.

На основании вышеизложенного методику расчета напряженно-деформированного состояния и времени начала разрушения балочных элементов конструкций целесообразно рекомендовать к использованию в расчетной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закономерности ползучести и длительной прочности: Справочник/Под ред. С. А. Шестерикова.— М.: Машиностроение, 1983.— 101 с.
2. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций/Ю. Н. Работнов.— М.: Наука, 1966.— 752 с.
3. Никитенко А. Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов/А. Ф. Никитенко.— Новосибирск: НГАСУ, 1997.— 278 с.
4. Качанов Л. М. Теория ползучести/Л. М. Качанов.— М.: Физматгиз, 1960.— 455 с.
5. Соснин О. В. К проведению испытаний на чистый изгиб при ползучести/О. В. Соснин, Н. Г. Торшенов//Заводская лаборатория.— 1969.— № 10.— С. 9—12.

© Никитенко А. Ф., Сивкова Н. Н., 2005

Получено после доработки 11.02.05

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.175-405.8

Л. А. АБДРАХМАНОВА, д-р техн. наук, проф., И. А. СТАРОВОЙТОВА, студ., В. Г. ХОЗИН, д-р техн. наук, проф. (Казанская государственная архитектурно-строительная академия)

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ЖЕСТКИЕ ПЕНОПОЛИУРЕТАНЫ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ*

Рассмотрен метод конденсационного наполнения пенополиуретанов, исследована возможность модификации жёстких пенополиуретанов химически активным кремнием и приведены результаты такой модификации. Установлено, что тонкодисперсный кремний (10–15%) в составе связующего не ухудшает технологических режимов и эксплуатационных свойств жёсткого пенополиуретана и может быть использован как активный компонент при конденсационном наполнении.

В связи с ростом жилищного строительства и изменением требований к теплотехническим характеристикам ограждающих конструкций актуальным является использование эффективных теплоизоляционных материалов (ТИМ) с плотностью ниже 200–250 кг/м^3 и коэффициентом теплопроводности не выше 0,08–0,09 Вт/(м·К). Наиболее эффективными ТИМ с позиций теплозащиты являются газонаполненные полимеры или пенопласты. Кроме того, при использовании пенопластов в строительстве появляется возможность изготовления изоляции непосредственно на строительной площадке в полости практически любого размера и конфигурации.

Одними из наиболее распространенных перспективных пенопластов являются жесткие пенополиуретаны (ППУ), так как они обладают очень низким коэффициентом теплопроводности и дают большую экономию энергоресурсов. Жест-

* По конкурсу грантов

кие ППУ отличаются высокими теплоизоляционными свойствами, широким интервалом рабочих температур, малой водо- и паропроницаемостью, достаточной прочностью, высокой адгезией к большинству строительных материалов.

Несмотря на сравнительно высокую цену, применение жестких ППУ для теплоизоляции зданий и сооружений экономически оправдано за счет снижения расхода средств, необходимых для их обогрева. При современных ценах на энергоресурсы все затраты, связанные с применением ППУ, окупаются уже через 2,5 года.

К недостаткам ППУ относятся горючесть и относительно низкая термостойкость (до +150°С). Целенаправленно улучшить эксплуатационные свойства можно наполнением ППУ.

При введении наполнителей в пенопласты преследуют цель экономии дефицитного органического сырья (снижение полимероемкости) и удешевления конечного продукта. Для снижения полимероемкости и стоимости ППУ используются следующие наполнители: карбонат кальция, тальк, тяжелый шпат, каолин, песок, наполнители растительного происхождения (древесная мука, опилки), промышленные отходы. Наполнение различными тонкодисперсными, волокнистыми и другими наполнителями предоставляет возможность применения пенопластов в качестве эффективных ТИМ. Влияние наполнителей на пенопласты преломляется через фактор макроструктуры, который действует тем сильнее, чем ниже плотность пенопласта.

Для усиления жестких ППУ применяют в основном высокомодульные неорганические наполнители, полые микросферы, минеральные и стеклянные волокна. Одновременно все неорганические наполнители способствуют снижению горючести и повышению термостойкости.

Способ получения наполненных пенопластов основан на принципе введения наполнителя: до вспенивания, в ходе вспенивания или после вспенивания. Чаще всего наполнитель совмещают с композицией до вспенивания. При этом достигается наилучшее смачивание и более равномерное распределение наполнителя во вспенивающейся композиции. Наиболее равномерное распределение наполнителя дает наполнение "изнутри" или так называемое конденсационное наполнение. Конденсационное наполнение представляет собой любой процесс превращения жидкой фазы в твердую дисперсную с четкой границей раздела, реализуемый в результате химической реакции или фазового перехода в жидкой среде иного состава [1].

В данной работе способ конденсационного наполнения осуществлен для модификации жесткого ППУ. В качестве реакционноспособного наполнителя был выбран силикат натрия, который в водной среде образует гидратированные растворы, так называемое "жидкое стекло".

В литературе достаточно широко известны композиции на основе водных растворов силикатов щелочных металлов и полиизоцианатов (ПИЦ), являющихся одними из компонентов для получения ППУ [2–4]. Использование изоцианатов в качестве модификаторов жидких стекол связано с наличием в них NCO-групп с высокой степенью ненасыщенности, способных реагировать с соединениями, содержащими подвижный атом водорода.

В результате были получены полимерсиликатные составы, представляющие собой продукты с двумя взаимопроникающими химически связанными матрицами — органической и неорганической. Наполнителем в таких пенопластах являлась поликремниевая кислота, а каркасообразующими полимерами — полиуретан и полимочевина. Вспенивание композиции осуществлялось за счет выделения углекислого газа (CO_2), образующегося в результате химического взаимодействия ПИЦ с водой и ПИЦ с жидким стеклом. Однако введение необходимого для повышения огнестойкости количества жидкого стекла привело к избыточному содержанию воды в композиции, и следствием этого явились нестабильность пены, снижение коэффициента вспенивания и неоднородность структуры полученных образцов пенопласта [5, 6].

При анализе литературы [7] по созданию композиций на основе поризованного жидкого стекла было выявлено, что высокопрочные и водостойкие пеноматериалы на основе жидкого стекла могут быть получены по следующему механизму с использованием активного кремния:

$$Si + 2NaOH + H_2O \rightarrow Na_2SiO_3 + 2H_2\uparrow.$$

Вспенивание здесь осуществляется за счет выделения водорода и испарения несвязанной воды, находящейся в жидком стекле. Было показано [8], что введение активного кремния резко активизирует процесс образования кремнекислоты с переходом золя в гель.

Нами в работе предполагалось осуществить эту реакцию в матрице формирующегося ППУ. Она является экзотермической, и поэтому нет необходимости в термообработке при получении ППУ. На первом этапе исследовалось влияние тонкодисперсного кремния на формирование жесткого ППУ. Результаты такой модификации представлены в данной работе.

Образование ППУ сводится к следующему: при взаимодействии избыточного количества изоцианатов с гидроксилсодержащими олигомерами образуются уретановые звенья, причем на концах растущих макромолекул находятся изоцианатные группы, которые могут вступать в реакцию с водой. Выделяющийся при этом углекислый газ вспенивает композицию, а макромолекулы присоединяются одна к другой через мочевинные группы.

Для исследований в качестве изоцианатного компонента был выбран полиизоцианат марки "Десмодур 44V20" с содержанием NCO-групп 29–33 мас.%, производства фирмы "Bayer".

В качестве полиольного компонента использовался простой олигоэфир "Лапрол 564 ЭС" с молекулярной массой 560, производства "Нижнекамскнефтехим" (г. Нижнекамск).

В качестве наполнителя был применен химически активный кремний с удельной поверхностью 6000 см^2/г, который представляет собой отход металлургических производств, получающийся в качестве золы-уноса при производстве сталей на металлургических комбинатах. По данным рентгеноструктурного анализа отход содержит до 1% железа, остальное — аморфная фаза. Доля химически активного кремния в аморфной фазе составляет до 90%.

Предварительно для регулирования скоростей реакций, протекающих в системе ПИЦ — лапрол — вода, были подобраны катализаторы. Выделение газа и рост полимерных молекул должны происходить с такой скоростью, чтобы газ оставался в полимере, а образовавшаяся пена была достаточно стабильной и не оседала. В качестве катализатора была использована смесь третичных аминов и октоата олова. Эта смесь была подобрана таким образом, чтобы обеспечить определенное соотношение между реакциями ПИЦ с лапролом и ПИЦ с водой. Октоат олова регулирует в основном скорость первой реакции, тогда как третичные амины — скорость второй. Применение смешанного катализатора дало возможность избежать усадки пенопласта и образования пустот, что может быть вызвано неправильным соотношением между количеством выделившегося углекислого газа и свойствами полимера в момент максимального газовыделения.

Также был подобран пеностабилизатор для обеспечения стабилизации пены в момент вспенивания и получения ППУ с требуемым размером замкнутых ячеек. В качестве пеностабилизатора применена смесь оксиэтилированных алкилфенолов ОП-7, ОП-10 с водой в массовом соотношении 1:1.

Составы модифицированного кремнием ППУ приведены в табл. 1. Наполнитель вводился в композицию от 0 до 80 мас. ч. на 100 мас. ч. лапрола.

Таблица 1

Составы модифицированного ППУ (мас. ч.)

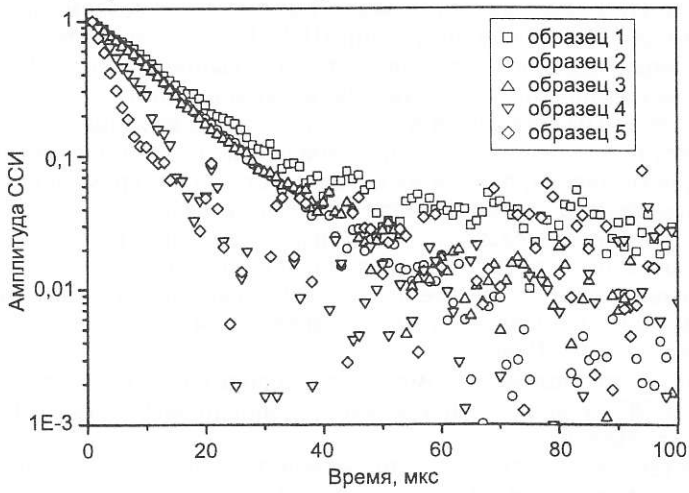
Лапрол	ПИЦ	Кремний	Третичные амины	Октоат олова	ОП-7+ ОП-10	Вода
100	200	0–80	1	0,4	2	2

Образцы готовились следующим образом. Лапрол смешивался с катализаторами и пеностабилизатором в течение 30–35 с. Затем в смесь вводили порошкообразный кремний и ПИЦ. Получившуюся реакционную смесь перемешивали 20–25 с. Затем приготовленная смесь заливалась в заранее подготовленные формы. После вспенивания и отверждения ППУ форму распалубливали.

Из полученных методом компьютерного сканирования картин структуры образцов следует, что введение кремния мало влияет на характер пористой

структуры. Ввиду высокой удельной поверхности и достаточно малого размера частиц (порядка 4 мкм) кремний является внутриструктурным наполнителем, т.е. в процессе образования ППУ встраивается в элементы ячеистой структуры.

Методом импульсного ЯМР изучена молекулярная подвижность в модифицированных системах. Все образцы имеют спад свободной индукции (ССИ) в виде короткой гауссовой компоненты в начале спада и лоренцовой (экспоненциальной) составляющей. Из рисунка видно, что с увеличеним содержания кремния ССИ ста-



Спады намагниченности модифицированного ППУ.
Содержание кремния, мас. %: *1* — 0; *2* — 5; *3* — 11; *4* — 14; *5* — 20

новится более коротким. Это свидетельствует об уменьшении молекулярной подвижности, т. е. структура ППУ при наполнении становится более жесткой. В табл. 2 приведены данные для лоренцовой компоненты. Из данных следует, что времена T_2 при введении кремния укорачиваются более чем в пять раз, причем с увеличением температуры измерения (от 40 до 180°С) торможение молекулярной подвижности растет. Очевидно, это связано с "доотверждением" композиции при нагреве. В образцах с 15 и 20% кремния наблюдается только очень короткая гауссова компонента. Параметры гауссовой компоненты не оценивались вследствие близости ко времени "парализации".

Таблица 2

Времена поперечной релаксации (T_{2a}) модифицированного ППУ

Температура измерения, °С	T_{2a}, мкс, в присутствии кремния, %				
	0	5	11	14	20
40	100	22	23	–	–
80	120	14	17	–	–
120	118	14	19	–	–

Результаты испытаний ППУ, модифицированного химически активным кремнием, приведены в табл. 3.

Установлено оптимальное содержание кремния — 40 мас. ч. на 100 мас. ч. лапрола. При сохранении невысокой плотности пенопласта, практически неизменной прочности и водостойкости время вспенивания увеличивается в 1,5 раза, и пенопласт переходит из горючих в разряд трудносгораемых.

Таблица 3

Свойства модифицированного ППУ

Содержание кремния, мас. %	Кратность вспенивания	Время вспенивания, с	Плотность, кг/м^3	Прочность на сжатие при 10% деформации, МПа	Сорбционное увлажнение, % за 24 ч	Время самостоятельного горения, с
0	9	40	90	0,38	1,6	Горит
5	8	35	100	0,33	1,8	20
8	7	50	105	0,36	1,9	16
11	8	55	100	0,3	1,9	13
14	7	60	120	0,28	1,8	11
20	7	60	120	0,3	1,8	7

Таким образом, тонкодисперсный кремний (10–15%) в составе связующего не ухудшает технологических режимов и эксплуатационных свойств жесткого ППУ и может быть использован как активный компонент при конденсационном наполнении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тараканов О. Г. Наполненные пенопласты/О. Г. Тараканов, И. В. Шамов, В. Д. Альперн.— М.: Химия, 1989.— 216 с.
2. Веселовский Р. А. Водные растворы щелочи в реакциях с изоцианатами/Р. А. Веселовский, С. С. Ищенко, Т. И. Новикова, Н. Л. Збанацкая//Ж. прикладной химии.— 1988.— № 8.— С. 1872–1876.
3. Веселовский Р. А. Исследование процессов формирования композита на основе ПИЦ и жидкого стекла/Р. А. Веселовский, Н. Л. Збанацкая//Пластмассы.— 1988.— № 9.— С. 21–27.
4. Ищенко С. С. Взаимодействие изоцианатов с водными растворами силикатов щелочных металлов/С. С. Ищенко, А. Б. Придатко, Т. И. Новикова, Е. В. Лебедев//Высокомолек. соед.— 1996.— Т. 38А.— № 5.— С. 786–791.
5. Абдрахманова Л. А. Новые теплоизоляционные материалы на основе гибридных связующих/Л. А. Абдрахманова, И. В. Соловьева, Д. А. Солдатов, В. Г. Хозин//Изв. вузов. Строительство.— 2001.— № 12.— С. 41–46.
6. Абдрахманова Л. А. Структура и свойства модифицированного пенополиуретана/Л. А. Абдрахманова, И. В. Соловьева, В. Г. Хозин//Сб. ст. Всерос. конф. "Структура и динамика молекулярных систем".— Йошкар-Ола, 2001.— Ч. 1.— С. 177–180.
7. Сидоров В. И. Использование модифицированного жидкого стекла для получения водостойких утеплителей методом холодного вспенивания/В. И. Сидоров, Н. И. Малявский, Б. В. Покидько//Изв. вузов. Строительство.— 2002.— № 8.— С. 27–32.
8. Дж. Кемпбел. Современная общая химия/Кемпбел Дж.— М.: Мир, 1975.— Т. 2.— 612 с.

© Абдрахманова Л. А., Старовойтова И. А., Хозин В. Г., 2005

Получено 07.02.05

УДК 691.55

В. Г. КЛИМЕНКО, канд. техн. наук, доц. (Белгородский инженерно-экономический институт);
А. С. ПОГОРЕЛОВА, асп. (Белгородский государственный технологический университет)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЙ ДЕГИДРАТАЦИИ ПРИРОДНОГО ГИПСА НА ЕГО СВОЙСТВА

Исследовано влияние количества остаточной гидратной воды, активности продуктов термообработки сульфата кальция и скорости нагрева на свойства монофазовых и многофазовых вяжущих из природного гипса. Предложены критерии проектирования и получения многофазовых гипсовых вяжущих.

При получении модификаций сульфата кальция в качестве основного критерия чаще всего используется температура термообработки. В то же время на температуру дегидратации гипса влияет наличие примесей, структура и текстура исходного сырья [1]. Неслучайно в литературе приводятся различные температуры дегидратации гипса. Одни [2] предлагали температуру 107°С, другие [3] — 125–180, третьи — 150–160°С [4]. Те, кто изучал природные гипсы, пришли к выводу, что прочностные показатели гипсовых вяжущих повышаются при увеличении температуры дегидратации до 180°С и более.

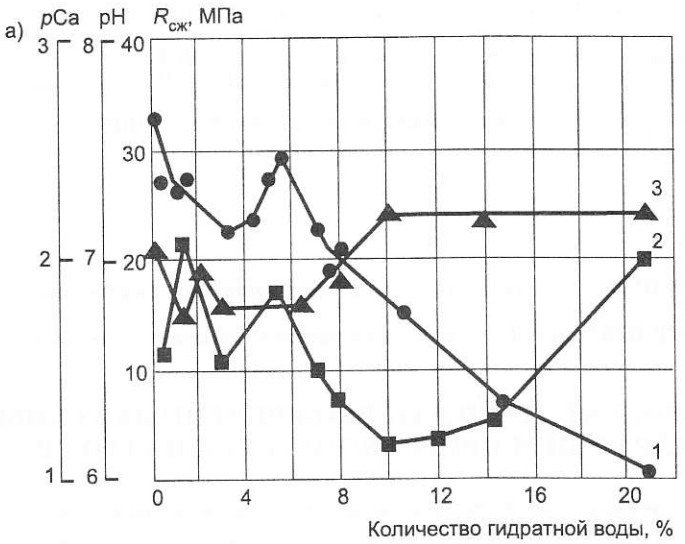
Гипс является кристаллогидратом. При его дегидратации наряду с устойчивыми фазами могут образовываться промежуточные метастабильные фазы. Поэтому при получении модификаций сульфата кальция необходимо, кроме температуры, учитывать время термообработки, количество остаточной гидратной воды, активность продуктов термообработки (pH, pCa), их фазовый состав и скорость нагрева.

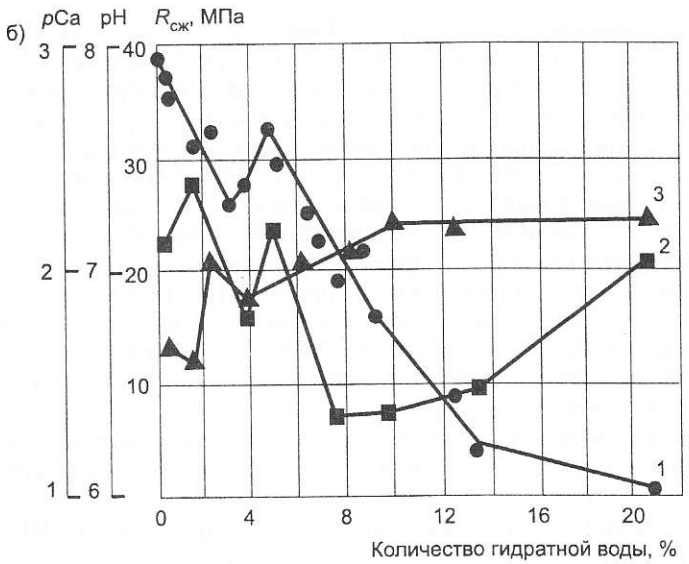
Целью данной работы было исследование влияния количества остаточной гидратной воды, скорости нагрева и активности сульфата кальция на свойства монофазовых и многофазовых гипсовых вяжущих.

В качестве гипсового сырья использовали природный гипс Шедокского месторождения мелкомозаичной ориентированной структуры с содержанием

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ — 98% и продукты его термообработки. Количество карбонатов в гипсе — 2%. Гипс предварительно подвергали помолу до полного прохождения через сито с размером ячеек 0315 мм. Нерастворимый ангидрит (Ап II) получали обжигом гипса в керамических чашках в муфельной печи при 750°С, а остальные модификации сульфата кальция изотермической термообработкой гипса в сушильном шкафу при температурах 142, 180 и 300°С. Во всех опытах масса проб гипса оставалась постоянной и равнялась 100 г. Контроль температуры производили ртутным термометром непосредственно в объеме материала. Величина pH водных суспензий Ап II —11,8. Предел прочности на сжатие вяжущих определяли на образцах размером 2×2×2 см при водогипсовом отношении (В/Г), равном 0,5. Для определения активности суспензий вяжущих использовали pH-метр, милливольтметр pH-121 и иономер ЭВ-74. Суспензии вяжущих (В/Г = 12,5) готовили на кипяченой дистиллированной воде с pH = 7. Фазовый состав сульфата кальция контролировали с помощью рентгенофазового метода анализа и по методикам, разработанным Б.С. Бобровым [5, 6].

В результате проведенных исследований установлено, что свойства продуктов термообработки гипса зависят от количества остаточной гидратной воды, скорости нагрева, активности сульфата кальция и генезиса гипсового сырья (рис. 1). Увеличение температуры и снижение времени изотермической





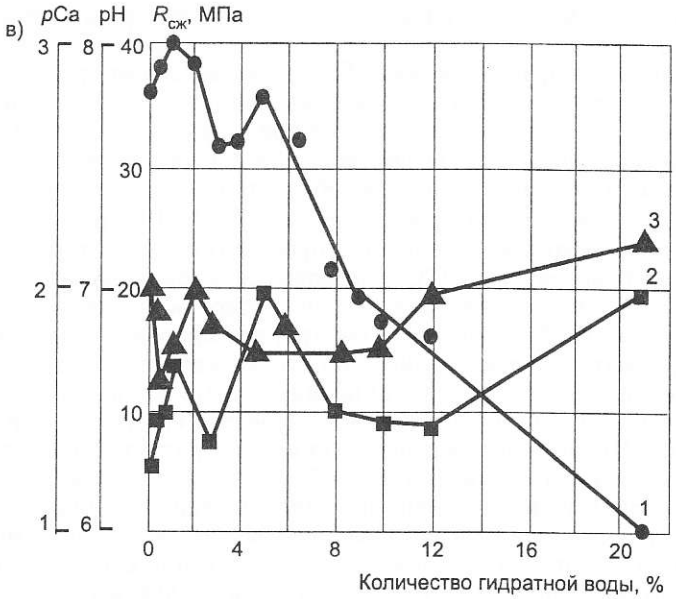


Рис. 1. Влияние количества остаточной гидратной воды на свойства продуктов термообработки гипса Шедокского месторождения.

Температура изотермической выдержки, °С: *а* — 142; *б* — 180; *в* — 300; *1* — предел прочности на сжатие через 7 сут твердения; *2* — pH; *3* — pCa

термообработки улучшает характеристики вяжущих, получаемых из природного гипса. С уменьшением количества гидратной воды прочность гипсовых вяжущих, в общем, увеличивается. Причем эта зависимость немонотонна и имеет ряд максимумов в интервале количеств гидратной воды 0,2–7,0 мас. %, связанных с образованием устойчивых (β-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$; β-обезвоженного полугидрата сульфата кальция; растворимого ангидрита (Ап III)) и активных фаз сульфата кальция. Промежуточные высокоактивные фазы образуются при следующих количествах остаточной гидратной воды, мас. %: 8–12; 3,0–4,0; 0,5. Характерной особенностью их водных суспензий является более кислая реакция среды и большая растворимость сульфата кальция. Окончанию образования фаз сульфата кальция соответствует падение активности.

Максимальную прочность (37–41 МПа) имеют продукты изотермической термообработки природного гипса при 142–180°С с количеством гидратной воды 0,2–0,35 %. Для 300°С максимум прочности продуктов термообработки смещен в область 1–2 мас. % остаточной гидратной воды. Содержание Ап III в таких пробах составляет 88–92 мас. %. Необходимо учитывать, что Ап III на воздухе быстро гидратируется до β-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ и изменяет фазовый состав сульфата кальция.

Второй максимум прочности связан с образованием β-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$. Он меньше первого (29–35 МПа) и соответствует количеству гидратной воды 4,5–5,5%. Большие и меньшие количества гидратной воды приводят к резкому падению содержания β-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ в продуктах термообработки гипса. Получение продуктов с таким количеством воды осложняется возможностью появления в композиции двуводного гипса как первичного, так и вторичного происхождения и Ап III. А это приводит к сокращению сроков схватывания, появлению ложного схватывания и падению прочности продуктов термообработки гипса. Основная масса β-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ гидратируется до двуводного гипса твердофазно.

Для всех исследованных температур изотермической выдержки при количестве гидратной воды 3,0–4,0% наблюдается снижение активности и прочности вяжущих на основе продуктов термообработки гипса и увеличение сроков схватывания. Состав образующихся продуктов следующий, мас. %: Ап III — 10–30; β-$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ — 60–80; двуводный гипс — 5–10. Причем, снижение прочности отмечается как в ранние (2 часа), так и в поздние (7 сут) сроки твердения. Большие и меньшие количества гидратной воды приводят к сокращению сроков схватывания вяжущих. Согласно дифференциально-термическому ана-

лизу продукты термообработки кристаллогидрата сульфата кальция, содержащие 3,0–4,0% кристаллизационной воды, гидратируются не полностью, происходит нарушение координации воды. Потеря воды такими продуктами замедляется, а температура, наоборот, резко увеличивается. Снижение прочности гипсовых вяжущих с количеством остаточной гидратной воды 2–3 мас. % отмечалось П.Ф. Гордашевским [1] при исследовании фосфогипса.

Продукты изотермической термообработки гипса с количеством гидратной воды 1,5–2,5 мас. % содержат по 50 мас. % An III и β-$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$. Для них характерно некоторое улучшение прочностных характеристик вяжущих, особенно при температуре 300°С. Растворимость таких продуктов ниже, чем у остальных фаз. Сульфат кальция с количеством остаточной гидратной воды 6–14 и 1,5–2,5 мас.% теряет воду быстро, что приводит к задержке подъема температуры материала и увеличению его активности.

Удлинение периода "первого кипения" при снижении температуры обжигаемого материала, обычно улучшающее качество вяжущего, при обжиге природного гипса Шедокского месторождения, наоборот, ухудшает его свойства.

Контролируя количество остаточной гидратной воды и активность продуктов термообработки гипса, можно получать материалы с определенным соотношением фаз сульфата кальция и заранее заданными свойствами, что важно при проектировании многофазовых и комбинированных гипсовых вяжущих.

Для подтверждения данной гипотезы были исследованы составы гипсоангидритовых (80% продуктов термообработки гипса +20% An II) и ангидритогипсовых вяжущих (80% An II +20% продуктов термообработки гипса).

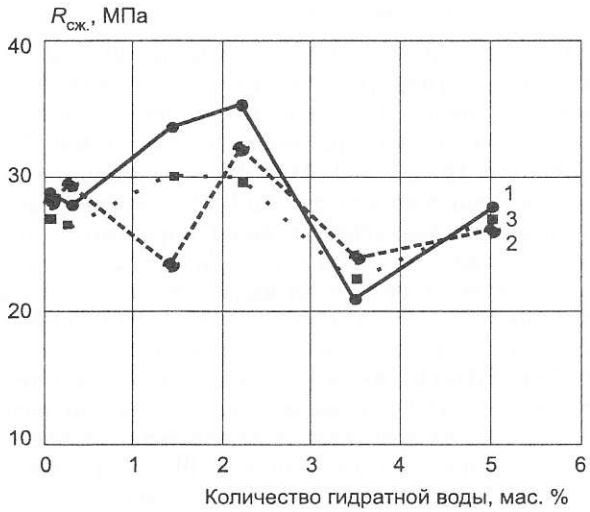


Рис. 2. Влияние количества остаточной гидратной воды продуктов термообработки гипса на свойства МГВ составов

1 — (30% An II + 70% продуктов термообработки гипса); *2* — (50% An II + 50% продуктов термообработки гипса); *3* — (80% An II + 20% продуктов термообработки гипса)

Продукты термообработки гипса в данных составах содержали разное количество остаточной гидратной воды.

Установлено (рис. 2), что лучшие характеристики имеют многофазовые гипсовые вяжущие (МГВ), содержащие An II и продукты термообработки гипса с количеством остаточной воды 1,8–2,45 мас. %. В их состав входит 45–55% An III и 40–50% β-$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$. Для продуктов термообработки гипса с количеством гидратной воды 2,27 мас. % концентрация ионов Ca^{+2} с первых минут гидратации сразу уменьшается, хотя и не так резко, как для β-$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$.

Уменьшение количества гидратной воды до 0,2–0,3 мас. % и увеличение до 3,0 мас. % снижает активность сульфата кальция в МГВ. An III, образующийся при количестве гидратной воды 0,2–0,3 мас. %, гидратируется двухступенчато сначала до β-$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$, а затем до двуводного гипса, что увеличивает время существования повышенных концентраций ионов Ca^{+2} и наступления пересыщения.

Таким образом, при проектировании МГВ наряду с температурой термообработки гипса необходимо учитывать количество остаточной гидратной воды, фазовый состав и активность продуктов термообработки гипса в качестве основных критериев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордашевский П. Ф. Результаты термического и рентгенографического анализов гипса/П. Ф. Гордашевский//Строительные материалы.— 1963.— № 12.— С. 28—30.

2. Пащенко А. А. Вяжущие материалы/А. А. Пащенко, В. П. Сербин, Е. А. Старчевская.— Киев: Вища школа, 1975.— 443 с.
3. Бутт Ю. М. Химическая технология вяжущих материалов/Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев.— М.: Высшая школа, 1980.— 472 с.
4. Гордашевский П.Ф. Производство гипсовых вяжущих материалов из гипсосодержащих отходов/П. Ф. Гордашевский, А. В. Долгорев.— М.: Стройиздат, 1987.—105 с.
5. Бобров Б. С. Определение фазового состава строительного и высокопрочного гипса/ Б. С. Бобров, Л. В. Киселева, И. Г. Жигун, А. В. Ромашков//Строительные материалы.— 1983.— № 7.— С. 23—24.
6. Бобров Б. С. Определение содержания двуводного гипса в природном сырье/Б. С. Бобров, А. В. Киселева, И. Г. Жигун//Строительные материалы.— 1983.— № 2.— С. 25—26.

© Клименко В. Г., Погорелова А. С., 2005

Получено 11.01.05

УДК 691.51/55

РАХИМОВ М. М., начальник МУП ("Казметрострой"); ХАБИБУЛЛИНА Н. Р., канд. техн. наук, доц., РАХИМОВ Р. З., д-р техн. наук, проф. (Казанская государственная архитектурно-строительная академия)

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ШЛАКОЩЕЛОЧНЫЕ ВЯЖУЩИЕ С ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИМИ ДОБАВКАМИ

Приведены результаты исследований свойств композиционных шлакощелочных вяжущих с цеолитсодержащими добавками. Установлено, что рассмотренные цеолитсодержащие добавки в количестве 10% повышают прочность композиционных шлакощелочных вяжущих на одну-две марки и придают водостойкость композиционным шлакощелочным вяжущим на кислых шлаках. Степень увеличения прочностных характеристик вяжущего с цеолитсодержащими добавками зависит от их минерального состава.

Природные цеолитсодержащие породы (ЦСП) в силу своих уникальных свойств являются наиболее многоцелевым сырьем из всех полезных ископаемых [1]. Большой интерес ЦСП представляют и для промышленности строительных материалов. Положительное влияние ЦСП, обусловленное их химическими и структурными особенностями, на свойства вяжущих позволяет их использовать в качестве модифицирующих добавок к портландцементу [2], гипсовым [3], шлакощелочным [4–6] (ШЩВ) и другим вяжущим. При введении в ШЩВ добавки ЦСП повышают щелочность среды, ускоряют завершение гидратационных и кристаллизационных процессов, связывание щелочи в составе водостойких фаз, стимулируют кристаллизацию сходных с ними по составу и структуре синтетических цеолитов. В результате, вследствие повышения жесткости алюмосиликатного каркаса, свойственной формирующимся в составе продуктов твердения щелочным гидроалюмосиликатам и обусловленной повышением степени совершенства кристаллической структуры, улучшаются физико-механические и деформативные показатели искусственного камня, их стабильность во времени и т.д. [4–6]. Отмечается [5], что из природных минералов эффективным является клиноптилолит, характеризующийся щелочным составом катионов и значительными размерами полостей и каналов. Вместе с тем вопросы влияния содержания цеолита в породе и ее минерального состава на свойства ШЩВ исследованы недостаточно.

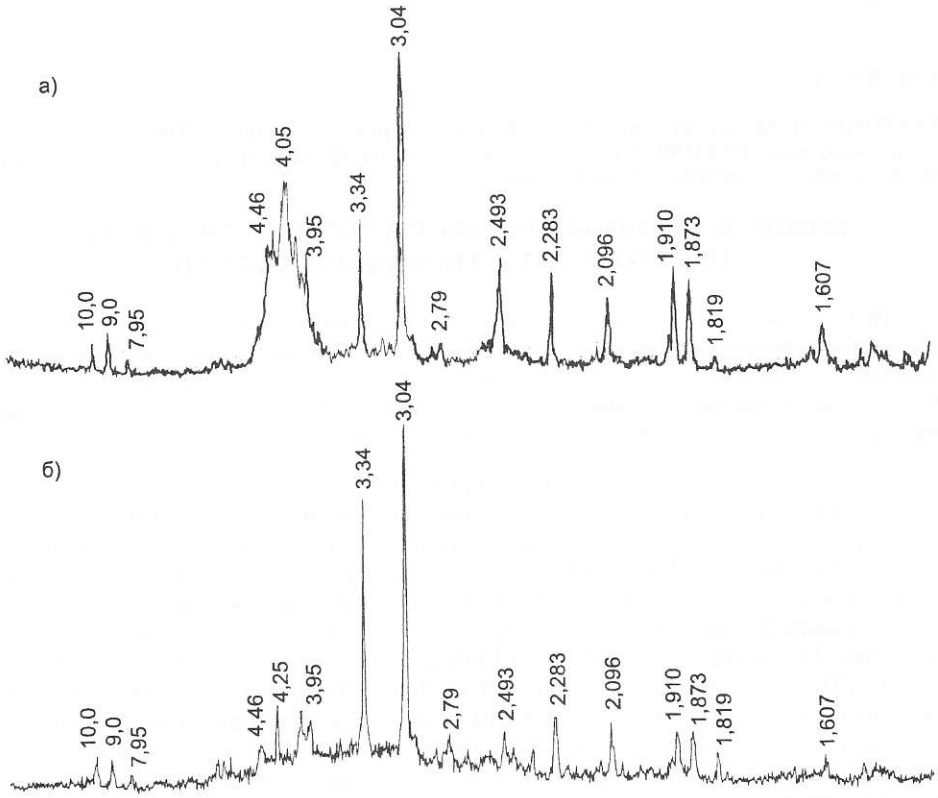
Проведенные нами исследования позволили расширить область использования ЦСП в ШЩВ и бетонах. В ЦНИИГеолнеруде (г. Казань) разработан безавтоклавный метод получения водных растворов силиката натрия из минерального кремнеземсодержащего сырья — опок, кремнистых ЦСП и т.д. [1, 7]. На жидком стекле, полученном из кремнистых ЦСП Татарско-Шатршанского месторождения РТ (табл. 1), и шлаках ОХМК и ММК нами получены ШЩВ и шлакощелочные бетоны М500–900.

Таблица 1

Минеральный состав ЦСП Татарско-Шатршанского месторождения РТ

Цеолит (клиноптилолит)	Опал-кристобалит	Глинистые минералы	Кальцит	Кварц
19–20	47	9	20–22	2

Процесс получения жидкого стекла из кремнистых ЦСП включает ее обработку раствором гидроокиси натрия с последующим отделением продукта. Отходом является твердый осадок (ТО) — «обработанная порода», отличающаяся минеральным составом от исходной ЦСП. По результатам рентгенофазового анализа (рисунок) ТО характеризуется меньшим содержанием кристаллических фаз (предположительно на 40%), отсутствием одного из основных компонентов — опал-кристобалит-тридимитовой фазы (d = 4,05 Å), сложенной квазикристаллическим кремнеземом (так как именно эта фаза переходит при обработке в состав жидкого стекла), пониженным содержанием породообразующих минералов. Содержание клиноптилолита (d = 9; 7,95; 3,95; 2,79 Å) снижается с 19–20 до 10–15%.



Рентгенограмма цеолитсодержащей породы (*а*) и отхода варки стекла (*б*)

Целью настоящей работы являлось исследование свойств КШЩВ с цеолитсодержащими добавками — ЦСП Татарско-Шатршанского месторождения и ТО-отхода производства жидкого стекла из этой породы.

Для проведения испытаний использовали кислый и нейтральный доменные гранулированные шлаки — отходы Магнитогорского (ММК) (M_o = 0,9) и Орско-Халиловского (ОХМК) (M_o = 1,0) металлургических комбинатов. КШЩВ получали совместным помолом шлаков с 5–10% добавок в лабораторной планетарной мельнице МПЛ-1. При постоянном времени помола удельная поверхность шлаков составляла 3100 см^2/г, шлаков с ТО — 3700 см^2/г, а с ЦСП — 6300 см^2/г (по ПСХ-9). КШЩВ затворяли водным раствором каустической соды плотностью 1,15–1,2 г/см^3. Прочность определяли после пропаривания на образцах-кубиках 2×2×2 см, изготовленных из теста нормальной густоты, и балочках 4×4×16 см, изготовленных из шлакопесчаного раствора в соответствии с требованиями ТУ 67-1020-89. Анализ полученных экспериментальных данных показал следующее (табл. 2, табл. 3).

Увеличение количества добавки в диапазоне 5–15% сопровождается снижением плотности и ростом величин водопоглощения и нормальной густоты, что, видимо, обусловлено высокой удельной поверхностью материалов доба-

Таблица 2

Влияние добавок ЦСП и ТО на свойства КШЩВ

№	Шлак	Добавка	$R_{сж}$, МПа образцов 2×2×2 см	Нормальная густота, %	ρ, г/см³	W, %
1	ОХМК	–	53,9	27	1,82	16,73
2	ОХМК	ЦСП-5%	90,6	27	1,79	16,8
3	ОХМК	ЦСП-10%	96,1	28	1,76	17,1
4	ОХМК	ЦСП-15%	88,2	28	1,66	17,5
5	ОХМК	ТО-5%	77,5	27	1,79	18,35
6	ОХМК	ТО-10%	79,6	27	1,75	19,73
7	ОХМК	ТО-15%	69,4	28	1,71	19,8

вок. Оптимальное содержание рассматриваемых добавок составляет 10%. С введением ЦСП прочность шлакощелочного камня увеличивается в 1,78 раза, марка — с М300 до М500, а с введением ТО — в 1,47 раза и до М400 соответственно. Представленные результаты позволяют предположить, что уменьшение содержания клиноптилолита в добавке с 19–20 до 10–15% снижает прочность камня из КШЩВ на 16%, а активность на одну марку. С другой стороны, меньший эффект от введения ТО в КШЩВ может быть связан с отсутствием в составе добавки активного кремнезема, играющего важную структурообразующую роль в формировании искусственного шлакощелочного камня, особенно в случае использования в качестве щелочного компонента не силикатов, а карбонатов натрия.

Таблица 3

Влияние добавок ЦСП и ТО на марку КШЩВ

№	Шлак	Добавка	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа
1	ОХМК	–	30,5	5,8
2	ОХМК	ЦСП-10%	53,3	7,0
3	ОХМК	ТО-10%	40,2	8,98

Помимо улучшенных прочностных характеристик, КШЩВ на кислом шлаке ММК с добавками ТО и ЦСП отличаются от бездобавочных водостойкостью (табл. 4). Состав без добавок после хранения в течение 28 сут в воде разрушается, а значения прочностных характеристик КШЩВ с добавками после твердения в воде сопоставимы с пропаренными. Следовательно, добавки 10%-х цеолитсодержащих добавок способствуют синтезу водостойких соединений в количестве, необходимом для обеспечения набора прочности КШЩВ в воде.

Таблица 4

Влияние добавок ЦСП и ТО на прочностные характеристики КШЩВ на шлаке ММК

№	Шлак	Добавка	Предел прочности, МПа			
			После пропаривания		После 28 сут хранения в воде	
			при сжатии	при изгибе	при сжатии	при изгибе
1	ММК	–	31,3	6,9	разрушились	разрушились
2	ММК	ЦСП-10%	52,8	7,5	59,8	8,6
3	ММК	ТО-10%	40,0	6,1	40,0	5,9

Выводы. Цеолитсодержащие добавки как в виде исходной породы, так и отхода производства из нее жидкого стекла в количестве 10% повышают прочность КШЩВ на одну-две марки и придают водостойкость КШЩВ на кислых шлаках.

Степень увеличения прочностных характеристик КШЩВ с цеолитсодержащими добавками зависит от минерального состава последних, а именно, содержания в них клиноптилолита и (или) опал-кристобалит-тридимитовой фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение / Под ред. А. В. Якимова, А. И. Бурова.— Казань, Изд-во «Фэн» АН РТ, 2001.— 176 с.
2. Марданова Э. И. Многокомпонентные цементы с добавками из местного минерального сырья / Э. И. Марданова: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— КГАСА, 1995.
3. Алтыкис М. Г. Влияние добавок цеолитсодержащих пород на свойства гипсовых вяжущих / М. Г. Алтыкис, М. И. Халиуллин, Р. З. Рахимов, В. П. Морозов, А. И. Бахтин / / Изв. вузов. Строительство.— 1996.— № 3.— С. 56—59.
4. Кривенко П. В. Повышение стабильности физико-механических характеристик шлакощелочных вяжущих в условиях попеременного увлажнения и высушивания / П. В. Кривенко, Е. К. Пушкарева, Л. В. Щербина / / Цемент.— 1991.— № 11—12.— С. 9—15.

5. Сидоренко Ю. А. Гидратация и твердение шлакощелочных цементов на основе сульфата натрия/Ю. А. Сидоренко, Ж. В. Скурчинская, П. В. Кривенко, М. А. Саницкий//Цемент.— 1993.— № 5—6.— С. 34—37.
6. Кривенко П. В. Эффективные пути совершенствования ШЩВ/П. В. Кривенко, Ж. В. Скурчинская//Цемент.— 1990.— № 6.— С. 17—19.
7. Пат. 2143396, C01B 33/32. Способ получения жидкого стекла/Т. П. Конюхова, О. А. Михайлова, У. Г. Дистанов, Д. А. Кикило, С. З. Нагаева: Опубл. 27.12.99; Бюл. № 36.

© Рахимов М. М., Хабибуллина Н. Р., Рахимов Р. З., 2005

Получено 02.02.05

УДК 666.342

Д. В. АБДРАХИМОВ, ст. науч. сотр. (ПК «Наука», г. Усть-Каменогорск, Казахстан)

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОБЖИГЕ КИРПИЧА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ И ЗОЛЫ ТЭС

На основании проведенных исследований было выявлено, что зола ТЭС при температурах обжига в интервале температур 1000–1050°С способствует образованию и увеличению содержания муллита в керамическом кирпиче, полученном на основе глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд. Наиболее быстрый рост содержания муллита в образцах наблюдается в интервале температур 1050–1100°С. Дальнейшее повышение температуры обжига не способствует заметному увеличению содержания муллита.

Промышленность керамических строительных материалов является одной из самых материалоемких отраслей народного хозяйства. Рациональное использование топлива, сырья и других материальных ресурсов становится решающим фактором успешного развития керамической промышленности в условиях современной экономической и экологической обстановки в странах СНГ и России. В связи с этим проблема применения в керамических материалах техногенного сырья приобретает особую актуальность.

Использование отходов цветной металлургии и энергетики — один из эффективных способов экономии природных материалов, при этом одновременно происходит утилизация побочных продуктов, и вносится вклад в охрану окружающей среды.

В работе [1] была показана возможность получения керамического кирпича из техногенного сырья без применения традиционных природных материалов. Кирпичи, полученные из 30% глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд и 70% золы ТЭС, соответствовали марке 150.

Глинистая часть «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд (ГЦИ) и зола ТЭС достаточно хорошо изучены [1–3] как сырье для керамических материалов. Химический состав исследуемых компонентов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас.%						
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	R_2O	ППП
ГЦИ	58,74	21,39	1,76	1,22	6,21	1,82	7,34
Зола ТЭС	56,85	18,80	3,59	2,12	5,98	3,40	6,26

ГЦИ от традиционных глин отличается более равномерным составом, так как получается мокрогравитационным способом [2–4]. Известно, что каолины обогащаются мокрогравитационным и сухим способом, при этом первый способ наиболее эффективен. Кроме того, добыча ГЦИ не нуждается в предварительных, вскрышных работах и в усреднении. В табл. 2 приведены качественные характеристики пяти проб ГЦИ.

Как видно из табл. 2, ГЦИ более однородна в отличие от традиционных тугоплавких глин. Однородность сырца, сформованного из глины, выдержанной в глинозапаснике, повышается, а прочность изделий увеличивается на

Таблица 2

Качественные характеристики пяти проб ГЦИ

№ пробы	Число пластичности	Чувствительность к сушке	Гранулометрический состав, содержание фракций, %					Группа сырья ГОСТ 9169-75
			0,1–0,05·10⁻³ м	0,05–0,01·10⁻³ м	0,01–0,005·10⁻³ м	0,005–0,001·10⁻³ м	< 0,001·10⁻³ м	
1	25	90	0,8	12,1	16,1	23,0	48,0	Средне-дисперсное
2	23	100	0,9	14,0	18,1	24,2	42,8	
3	24	100	0,8	14,1	17,5	21,1	46,6	
4	23	100	0,7	18,4	22,3	15,7	42,9	
5	22	110	0,6	19,6	22,2	15,8	41,8	

10–15% по сравнению с изделиями, изготовленными из глины, взятой непосредственно из карьера [1]. Гранулометрический состав ГЦИ однороден, так как при извлечении из нее руды цветных металлов мокрогравитационным способом происходит ее усреднение. Высокую однородность за короткое время можно получить только в суспензии и шликере.

Зола ТЭС — рыхлый материал черного или серого цвета. Кроме минеральных веществ, в ней присутствует органическая составляющая. Микроскопическое изучение зол, освобожденных от органического вещества, показало, что основными составляющими фазового состава являются аморфизованные глинистые агрегаты, стекловидное вещество и кристаллические фазы. Последние представлены кварцем, полевым шпатом, кальцитом и (в меньшей степени) магнетитом и гематитом. В табл. 3 представлен минералогический состав золы гидроудаления Усть-Каменогорской ТЭС, полученной из углей Кузнецкого бассейна.

Таблица 3

Минералогический состав пяти проб золы ТЭС

№ пробы	Содержание минералов, мас. %						
	Кварц	Полевой шпат	Кальцит	Оксиды железа	Муллит	Стекло-фаза	Аморфизованные глинистые агрегаты
1	10	10	3	7	2	50	18
2	8	12	4	6	2	48	20
3	10	10	3	5	2	50	20
4	10	12	3	5	1,5	48,5	20
5	10	10	4	6	2	50	18

Стекловидная фаза исследуемой золы неоднородна и представлена двумя разновидностями стекла: бесцветной (светопреломление 1,54–1,58) в виде оплавленных шариков размером до $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м и желтого, реже — желто-бурого цвета, обусловленного наличием оксида железа, поэтому ее светопреломление более высокое (N = 1,60–1,63). Кварц присутствует в виде бесцветных кристаллов размером $(30–250) \cdot 10^{-6}$ м. Карбонаты представлены бесцветными мелкими образованиями кальцита и доломита размером до $4 \cdot 10^{-7}$ м. Объемная масса золы около 890 кг/м³, плотность 2180 кг/м³, удельная поверхность 690 см²/г.

С помощью высокотемпературного микроскопа МБС-2 были определены температура начала плавления (1300°С) и полного плавления (1390°С) золы.

Гранулометрические составы золы представлены в табл. 4.

Одним из основных свойств золы (при использовании ее в качестве отощителя в производстве кирпича) является теплотворная способность, дающая возможность использовать ее в качестве исходного топливосодержащего материала, позволяющего отказаться от ввода топлива в шихту. Содержание угле-

Таблица 4

Гранулометрические составы золы

№ пробы	Содержание фракций (10·10⁻³ м), мас. %					
	более 0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	менее 0,001
1	7,69	10,79	35,41	30,09	12,69	2,41
2	7,58	11,89	34,40	31,10	11,50	3,60
3	5,19	13,20	34,10	31,40	12,00	3,10
4	7,34	11,14	35,31	30,19	12,39	2,71
5	6,30	12,18	34,01	31,49	12,09	3,01

рода и теплотворная способность золы ТЭС определены согласно ГОСТ 147-84. В исследуемой золе C_a (углерода) 5–7%; теплотворная способность $\theta_p^н$ — 2982 кДж/кг.

Известно, что золы, используемые для производства керамических материалов, получаемых пластическим способом, должны удовлетворять требованиям:

содержание серы в пересчете на SO_3 не более 2%;

содержание несгоревшего топлива не должно превышать 10%;

содержание Al_2O_3 должно быть не менее 15%, иначе материал будет иметь низкую прочность.

Исследуемая зола ТЭС отвечает вышеуказанным требованиям [1].

Учитывая, что эксплуатационные свойства керамического кирпича определяются главным образом фазовым составом, настоящая статья посвящена исследованию фазовых процессов, происходящих при обжиге кирпича из указанных выше компонентов.

Для исследования фазовых превращений при обжиге керамических образцов использовался оптимальный состав, мас. %: 1) ГЦИ — 100; 2) ГЦИ — 30, зола ТЭС — 70 (состав 1 взят для сравнения). Из составов 1 и 2 изготовляли образцы-цилиндры размером $(50\times50)\cdot10^{-3}$ м и обжигали в муфельной печи при температурах 550–1150°С с интервалом 50°С. При этом образцы приобретали ярко выраженную зональность: периферийную, промежуточную и центральную [1, 4].

Рентгенографический анализ порошкообразных проб проводили на дифрактометре ДРОН-3 с использованием CuKα-излучения при скорости вращения столика образца 1 мин$^{-1}$. ИК-спектры поглощения получены на спектрофотометре «Spetcord-75JR». Образцы были приготовлены в виде суспензии порошка с вазелиновым маслом. Микроскопический анализ проводили на микроскопе МИН-8 в проходящем свете с применением иммерсионных препаратов.

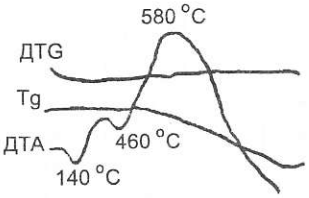


Рис. 1. Термограмма зологлиняной смеси (состав 2)

1, 2, 3, 4 — температура обжига соответственно 900; 950; 1050; 1100°С

На термограмме (рис. 1) в образцах из состава 2 при температуре 140°С наблюдается незначительный эндоэффект, связанный с удалением гигроскопической воды. При температурах 450–600°С на термограмме смеси фиксируется большой экзоэффект, связанный с воспламенением и горением коксовых и полукоксовых остатков, содержащихся в золе. Эти особенности смеси, отмеченные на термограмме, способствуют интенсификации процессов при обжиге.

В образцах из состава 2, обожженных при 550°С, сохраняются неизменными кварц, карбонаты, обломки полевых шпатов (микроклин с решетчатой структурой), оксиды и гидрослюды железа, сцементированные глинистой составляющей. Очень редко (до 1%) встречаются иголки муллита, образовавшегося в золе еще при сгорании угля в топках ТЭС. В глинистой массе выделяются округленные шарики диаметром до $20\cdot10^{-6}$ м, состоящие из стекла или слабоанизотропной фазы с показателем преломления около $N = 1{,}516$, представленной полевым шпатом.

Микроскопический анализ образцов при обжиге в интервалах температур 650–850°С существенных изменений не показал. При температуре обжига 850°С под микроскопом наблюдается кварц, претерпевший изменения (зерна его оплавлены). Карбонаты разрушены и перешли в тонкодисперсные агрегаты, сохраняющие показатели преломления $N = 1{,}516$ и 1,540. Встречаются сильно измененные, прозрачные остеклованные зерна полевого шпата с показателем преломления $N = 1{,}516$. Они имеют слабую анизотропию. В этом интервале температур продолжается выгорание углерода.

Выгорание органики в керамических материалах, по-видимому, имеет зональный характер [4]. В процессе обжига по мере диффузии кислорода зона выгорания непрерывно перемещается внутрь изделия, повышая при этом местную температуру.

Мы предполагаем, как и в работе [2], что начальный процесс спекания протекает, как точечная сварка, за счет вспышек при воспламенении и выгорании час-

тиц органических веществ, содержащихся в исследуемых глинистом компоненте и золе ТЭС, вследствие чего резко повышается температура в микроучастках и создается восстановительная среда, способствующая переходу оксида железа в закисную форму. В результате этого щелочно-железистый первичный расплав появляется в отдельных локализованных участках, обогащенных оксидами щелочных металлов и железа. Возникший низкотемпературный расплав обеспечивает физико-химические условия для ускорения процессов спекания продуктов обжига.

Содержание расплава становится значительным при растворении в щелочно-железистом первичном расплаве стеклофазы и аморфизованных глинистых веществ, которые следует принимать как основной источник образования жидкой фазы в процессе термической обработки глинистых компонентов в условиях восстановительной среды. Процессы спекания в присутствии жидкой фазы сопровождаются порообразованием за счет вспучивания в местах выделения газообразных продуктов реакций, протекающих при вспышке и горении органических веществ, удалении химически связанной воды глинистых фракций и спекании частиц с преобразованием межзерновых пустот во внутренние поры [4]. Поры в основном образуются закрытого и полузакрытого типа, стенки их, смачиваясь стеклофазой, упрочняются.

Повышение температуры обжига образцов из состава 2 до 1000°С способствует появлению муллита, что отмечается появлением на рентгенограмме линий: 0,344; 0,288 и 0,220 нм, это свидетельствует о начале его кристаллизации (рис. 2). Кроме того, некоторое количество муллита содержалось в золе ТЭС (1,5–2%, см. табл. 3). Микроскопический анализ показывает образование стекловидной фазы с показателем преломления от $N = 1,5$ до $N = 1,54$. На от-

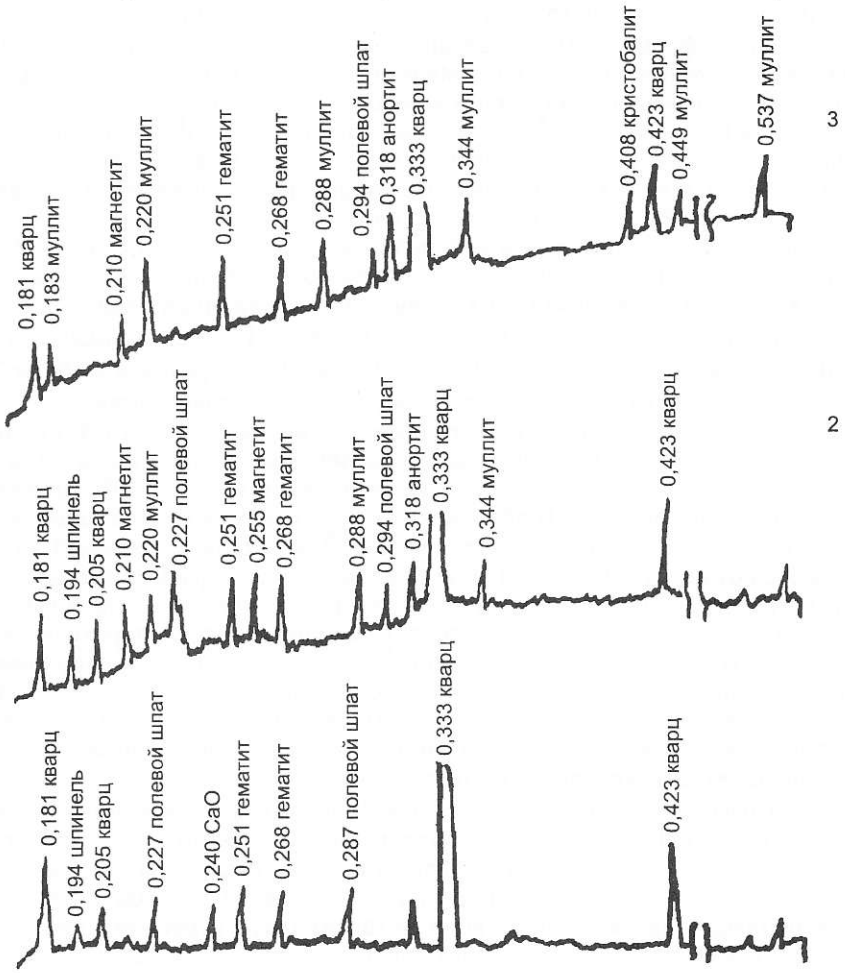


Рис. 2. Рентгенограмма образцов из состава 2, обожженных при различных температурах, °С: *1* — 1000; *2* — 1050; *3* — 1100

дельных участках стеклофазы наблюдается кристаллизация тонкодисперсных частиц муллита, анортита, гематита.

Температура обжига 1050°С заметно интенсифицирует кристаллизацию муллита в образцах из состава 2. На рентгенограмме образца, обожженного при этой температуре, появляются новые линии муллита (0,537 и 0,187 нм) и увеличение высоты других пиков его линий. Размер кристаллов муллита доходит до 10 мкм. При этой температуре обжига в образцах из состава 2 на рентгенограмме отмечается появление линии α-кристобалита 0,408 нм, что свидетельствует о начале его кристаллизации (см. рис. 2). Кристаллизация кристобалита отмечается по трещинам и краям зерен кварца. Аморфный кремнезем, образующийся при муллитизации, по-видимому, растворяется в расплаве, который в значительном количестве появляется при 1050°С.

Увеличение температуры обжига зологлиняной смеси (состав 2) до 1100°С не приводит к заметным изменениям, за исключением появления на рентгенограмме нового пика муллита 0,449 нм (см. рис. 2). Можно отметить лишь незначительное увеличение высоты ранее появившихся пиков муллита, гематита, магнетита.

Под микроскопом в пробах образцов, обожженных при 1050–1100°С, наряду с кристаллами игольчатой формы наблюдаются и короткопризматические кристаллы муллита. При температуре 1100°С муллит образуется в виде хорошо сформированного правильного кристалла призматической формы. Содержание муллита и стеклофазы в образцах достигает соответственно 15–20 и 40–45%. Значительное содержание муллита в виде игловидной и призматической формы цементируется стеклофазой и служит микроарматурой, увеличивающей прочность главного структурного компонента материала.

Необычная форма муллита связана с содержанием в зологлиняной смеси значительного количества оксидов железа и титана. С возникновением твердых растворов замещения образуется муллит различного химического состава. При этом Fe^{3+} замещает Al^{3+}, а Ti^{4+} замещает Si^{4+} [4, 5]. Внедрение в образование твердого раствора оксидов железа и титана в муллите приводят к кристаллизации его в виде короткопризматических кристаллов вместо тончайших игл и удлиненно-призматических кристаллов.

Решетка муллита построена из близких количеств групп $[AlO_4]^{5-}$, $[AlO_6]^{9-}$ и островных групп $[SiO_4]^{4-}$. Для получения таких групп, при внедрении в твердый раствор оксидов железа необходимы ионы с величиной радиуса не более $0{,}7 \cdot 10^{-10}$ м [4], поэтому в качестве иона замещения Fe^{2+} не подходит, так как величина радиуса его иона равна $0{,}8 \cdot 10^{-10}$ м, а величина радиуса иона Fe^{3+} равна $0{,}67 \cdot 10^{-10}$ м, что соответствует вышеуказанному требованию.

Увеличение температуры обжига образцов из состава 2 до 1200°С интенсифицирует образование значительного количества жидкой фазы. При этой температуре содержание жидкой фазы увеличивается до 55–60%, что приводит к деформации образца. В обожженных образцах под микроскопом наблюдается увеличение содержания стеклофазы. Показатели преломления стекол изменяются от $N = 1{,}50$ до $N = 1{,}061$. Кристаллические фазы представлены на рентгенограмме лишь линиями муллита, анортита, кристобалита и гематита. Другие кристаллические фазы (магнетит, шпинели и т.д.) переходят в расплав. На рентгенограмме исчезают линии этих минералов, не обнаруживается их присутствие и под микроскопом. Можно предположить, что матрица стекла захватывает в свою структуру также часть анортита и гематита, так как интенсивность их линий снижается. При этой температуре продолжается полиморфный переход α-кварца в α-кристобалит.

Петрографические исследования показали, что в обожженных образцах состава 2 при 1000°С муллит представлен в виде точечных тонкодисперсных кристаллических образований и в виде отдельных игольчатых и призматических кристаллов. С повышением температуры обжига до 1100–1150°С в образцах наблюдается увеличение количества муллита и рост его кристаллов. При этом изменяется габитус кристаллов муллита. Из точечных тонкодисперсных образований формируются игольчатые и призматические кристаллы муллита. Они образуют переплетенную спутанную сетку, что положительно

отражается на свойствах изделий и согласуется с данными, полученными нами в работах [2–5]. При увеличении времени выдержки, при максимальной температуре обжига процесс муллитообразования интенсифицируется, кристаллы муллита приобретают вид бесцветных призм. Наибольшее количество муллита образуется в интервале температур 1050–1100°С в виде призматических и игольчатых кристаллов, это обусловлено особенностью минералогических составов ГЦИ и золы ТЭС, содержащих повышенное количество железа и 50% стеклофазы. Таким образом, химический и минералогический составы ГЦИ и золы ТЭС обусловливают количественный выход муллита, рост и габитус его кристаллов.

Процесс муллитизации в зологлиняных смесях имеет свои особенности. В исходных золах уже имеются точечные тонкодисперсные зародыши муллита, вырастающие при термообработке в игольчатые и призматические кристаллы [2, 5]. Горение остаточного кокса и полукокса золы приводит к созданию восстановительной газовой среды внутри образца и местному повышению температуры в области вспышки. В восстановительной газовой среде оксиды железа переходят в закисную форму, ускоряя процессы появления жидкой фазы реакции и образования шпинели, муллита, герцинита. Это особенно характерно для материалов с повышенным содержанием оксидов железа.

Исследования показали, что процесс муллитизации интенсифицируется в присутствии щелочных добавок. Влияние щелочных добавок на процессы муллитизации изучались на образцах состава, мас. %: ГЦИ — 30; зола ТЭС — 65; стеклобой (с содержанием щелочей 14–15%) — 5. Результаты исследований свидетельствуют о том, что щелочные добавки способствуют муллитообразованию (рис. 3, кривая *3*).

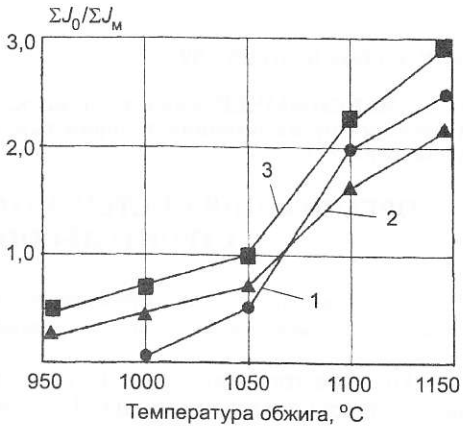


Рис. 3. Изменение суммарной интенсивности отражений муллита, составы, мас. %: *1* — ГЦИ; *2* — ГЦИ-30, зола ТЭС-70; *3* — ГЦИ-30, зола ТЭС-65, стеклобой-5

Образование щелочно-силикатного расплава при обжиге золокерамики способствует получению муллита устойчивой формы с более совершенной структурой. Микроскопические исследования показали, что муллит кристаллизуется преимущественно в игловидной и призматической формах с хаотично расположенными кристаллами. В результате проведенных исследований, установлены особенности фазовых превращений при обжиге зологлиняной смеси без применения традиционных природных материалов.

Выводы. На основе данных, полученных исследованиями, можно предположить, что в интервале температур 1000–1050°С образуется наибольшее количество муллита в золокерамическом материале. Повышение температуры обжига до 1100°С способствует увеличению содержания муллита в образцах из ГЦИ. Наиболее быстрый рост содержания муллита наблюдается в интервале температур 1050–1100°С. Очевидно, что при обжиге исследуемых керамических образцов в них до температуры 1100°С происходит формирование и рост кристаллов муллита, а затем усовершенствование его кристаллической решетки. Дальнейшее увеличение температуры обжига приводит к плавному увеличению содержания муллита, в основном игольчатых кристаллов. Таким образом, химический и минералогический составы ГЦИ и золы ТЭС обусловливают количественный выход муллита и рост его кристаллов. Щелочные оксиды активизируют муллитообразование в золокерамике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахимов Д. В. Керамический кирпич из отходов производств/Д. В. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов//Строительные материалы.— 1999.— № 3.— С. 34–35.

2. Абдрахимова Е. С. Особенности фазовых превращений при обжиге отходов цветной металлургии/Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов//Материаловедение.— 2001.— № 7.— С. 51–56.
3. Абдрахимова Е. С. Полиморфные превращения SiO_2 в глинистых материалах различного химико-минералогического состава / Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов//Материаловедение.— 2002.— № 7.— С. 35–41.
4. Абдрахимов Д. В. Керамический кирпич из отходов производств без применения традиционных природных материалов/Д. В. Абдрахимов, П. Г. Комохов, А. В. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов//Строительные материалы.— 2002.— № 8.— С. 26, 27.
5. Сайбулатов С. Ж. Фазовые превращения при обжиге зологлиняной смеси/С. Ж. Сайбулатов, Е. С. Абдрахимова, В. З. Абдрахимов, Д. В. Абдрахимов//Вестник ВКТУ.— Усть-Каменогорск.— 2000.— № 1.— С. 133–136.

© Абдрахимов Д. В., 2005

Получено после доработки 30.11.04

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.003:65.014:62-52

О. И. МАКСИМЫЧЕВ, канд. техн. наук, доц., Ю. И. КУДРЯВЦЕВ, канд. техн. наук (Московский автомобильно-дорожный институт (Государственный технический университет))

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Обосновываются структуры управления с применением нечетких алгоритмов. Рассматриваются вопросы динамики и надежности управляющих систем.

По мере того, как предприятия вступают в эпоху совместного производства, согласованного с помощью Internet, все более актуальным становится вопрос о создании сети интеллектуальных устройств и датчиков для сбора и распространения данных, сгенерированных при управлении производством на нижних уровнях подсистем. Эта организация производства следующего поколения позволит создать полный цикл от «рабочего» уровня производства до корпоративного уровня приложений управления цепочками поставок (SCM — supply chain management) и жизненным циклом изделий (PLM — product life cycle management), зависящих от данных, получаемых на производстве.

Управляющие производственные системы, оснащенные программным обеспечением следующего поколения, служат своего рода посредником, распределяющим операции по обработке информации.

Различные технологические компоненты систем индустриальной автоматизации будут объединены в пакетах автоматизации производства следующего поколения.

Серьезным стимулом к такой интеграции являются ставшие стандартными для отрасли интерфейсы программного обеспечения промежуточного слоя, такие как COM/DCOM/OPC, которые могут применяться на системах на базе ПК.

Развитие методов автоматизации производства в будущем приведет к созданию единой среды, объединяющей открытые архитектуры на базе персональных компьютеров, встроенные системы, Web-службы, программируемые контроллеры, коммуникационные средства — наподобие Industrial Ethernet и компонентные программные технологии. И основой такой среды будет служить бизнес-модель, предполагающая отказ от использования неинтероперабельного программного и аппаратурного обеспечения.

Принципы организации систем автоматического управления. Любой достаточно сложный объект автоматизации следует представлять сово-

купностью иерархических технологических подсистем, объединенных алгоритмом, так что по структуре соответствующая система управления оказывается адекватной объекту управления. Ключевой проблемой в этом случае становится организация взаимодействий между подсистемами [3].

Разбиение по функциональным узлам связано со структурированием общей сложной технологии на менее сложные задачи нижних уровней, где каждое устройство в составе технологического узла сравнительно автономно, а взаимодействия осуществляются централизованно через подсистемы верхних уровней или по горизонтальным функционально-логическим связям.

С усложнением системы становится существенным вопрос обеспечения функциональной надежности без дублирования подсистем. Традиционные меры повышения надежности, ориентированные на усовершенствование аппаратных средств (дублирование, усложнение алгоритмов, модернизация аппаратных средств), часто оказываются недостаточно эффективными для иерархических систем, в связи с принципом — быстродействие и надежность регламентируется самым слабым звеном.

Основы обеспечения надежности, диктуемые самой сущностью задач автоматизации таких объектов, состоят в следующем:

1) единичные отказы в системе не должны приводить к нарушению главных технологических функций;

2) алгоритмы управления и прикладные программы должны иметь модульную структуру, построенную по стандартам открытых систем;

3) предпочтительно гетеиерархическое взаимодействие уровней подсистем;

4) требуется предусмотреть возможности автономного структурного восстановления нарушенных функций. Вышедшая из строя подсистема должна восстанавливаться (заменяться, дублироваться или передавать свои функции) без ущерба для остальной части системы. Алгоритм управления должен «отработать» сбой и распределить функции вышедшей из строя подсистемы на измененную структуру.

Таким образом, увеличение производительности не всегда возможно путем изменения аппаратной части реализации алгоритма. Дополнительных затрат требует также модернизация аппаратной структуры.

Изменение принципов реализации алгоритмов управления «классических» структур управления позволит решить проблемы не только производительности, но надежности без изменения аппаратной структуры, так как изменения будут происходить только на программно-логическом уровне.

Базовая структура подсистем автоматического управления. Характерной особенностью автоматизации технологических линий современного производства является последовательность выполнения операций, составляющих рабочий процесс, и ступенчатый характер переходов между ними. Многорежимный характер работы машин вызывает необходимость построения регуляторов, которые реализовывали бы алгоритмы, изменяющиеся в зависимости от режима управления. Многорежимную систему можно рассматривать как логическое устройство с конечным числом дискретных состояний — режимов, в каждом из которых к процессу управления предъявляются вполне определенные требования. Переключение режимов осуществляется сигналами управления по текущей информации о состоянии контролируемого объекта или технологического процесса. Таким образом, каждому состоянию соответствует свой определенный регулятор (логический или аппаратный), каждый из которых реализует свой локальный алгоритм [1]. Структура и параметры локального регулятора выбираются в соответствии с требованиями, в целом предъявляемыми к системе в текущем режиме.

Структура регулятора (рис. 1) состоит из блока макровычислений по определению принадлежности к множеству и блока точных вычислений целевой функции [4]. На рис. 2 показана номограмма вычислений (принятия решений) при достижении целевой функции во времени, из которой видно разбиение времени вычислений по двум функциональным блокам: блоку макровычислений и блоку точного вычисления параметров целевой функции. Таким образом, процесс управления разбивается на потоки, разделённые по точности и степени важности.

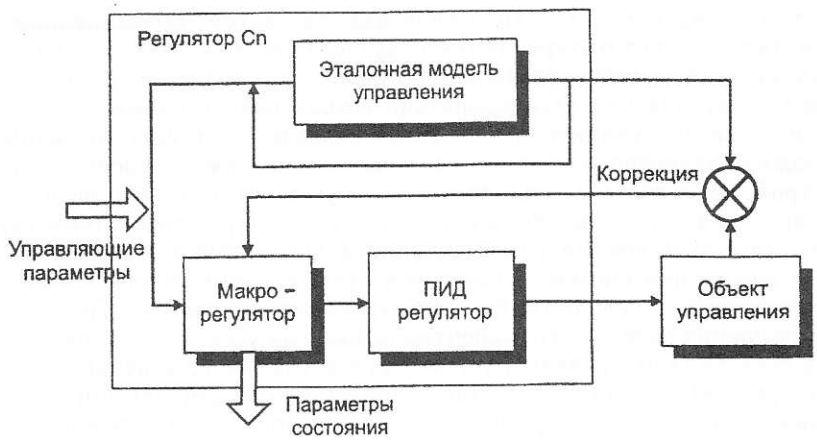


Рис. 1. Структура с разделением алгоритма вычислений

Часто алгоритмы следуют некоторой целевой функции, однако не всегда необходимо производить точные вычисления параметров на всем интервале времени управления, достаточно лишь производить вычисления для тех точек активности, где возникает необходимость. Применение нечеткой логики (fuzzy logic) и ее математического аппарата позволяет при наличии экспертных знаний о протекании процесса сокращать количество вычислений (см. рис. 2), разбивая их на два потока точных и нечетких оценок.

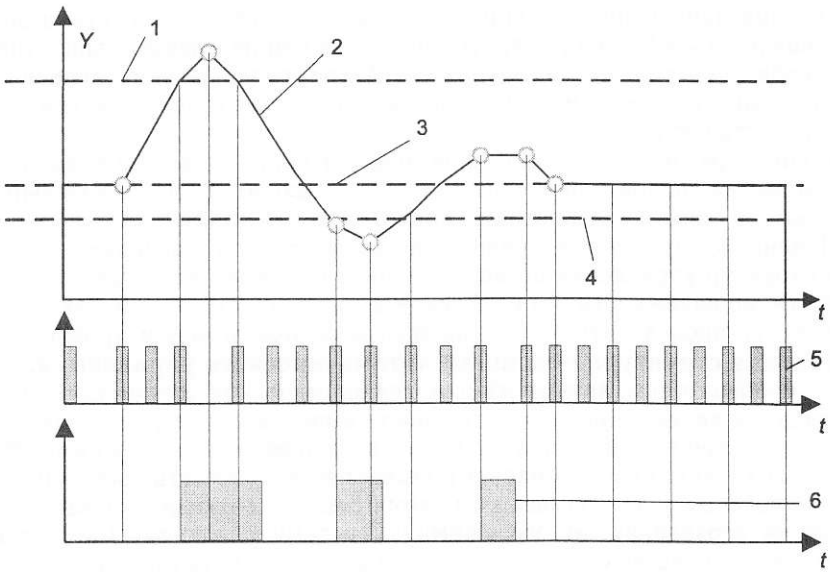


Рис. 2. Номограмма функционирования регулятора

1 — верхняя граница; *2* — контролируемый процесс; *3* — зона оптимального управления; *4* — нижняя граница; *5* — макровычисления; *6* — ПИД-регулирование

В результате такой организации структуры достигается повышение производительности системы, ее устойчивость и управляемость, что проблематично при выборе системы, построенной только на одном из блоков вычислений.

Таким образом, многорежимная система может быть представлена алгоритмами независимых регуляторов и процедурами изменения структуры. Порядок изменения в общем случае определяется ходом выполнения алгоритма и условиями протекания технологического процесса (см. рис. 2). С другой стороны, применение микропроцессорных систем позволяет реализовывать системы управления с переменной иерархической структурой. Это связано с простотой программной реализации алгоритмов и возможностью использования в качестве локальных регуляторов различных ветвей общей программы или микроЭВМ (рис. 3).

Изменения вносятся в логическую структуру, оставаясь по аппаратной реализации одноранговой системой (рис. 3), данные и команды в которой передаются по двум параллельным шинам. В процессе выполнения технологических операций управления осуществляется иерархический принцип согласно алгоритмам структурирующих процедур макрорегуляторов.

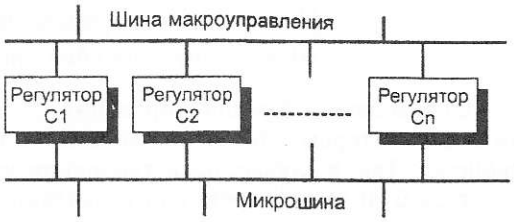


Рис. 3. Реализация переменной структуры
C_n — локальный регулятор-модуль (управляющая подпрограмма)

Синтез структур систем автоматического управления. Применение систем автоматики в управлении с использованием распределенных алгоритмов потребовало разработки принципов обеспечения надежности. В этой связи уместен принцип, сформулированный фон Нейманом: «При построении сложных вычислительных машин не следует бороться с ненадежными компонентами путем увеличения их надежности. Нужно добиться их организации, при которой надежность всего компьютера будет больше, чем надежность его отдельных частей» [5]. Этот принцип справедлив и к любым сложным вычислительным процессам.

Вся система управления состоит из подсистем менее надежных (и менее производительных), чем вся система в целом, например, система управления определяется с применением трех подсистем (рис. 4, *а*).

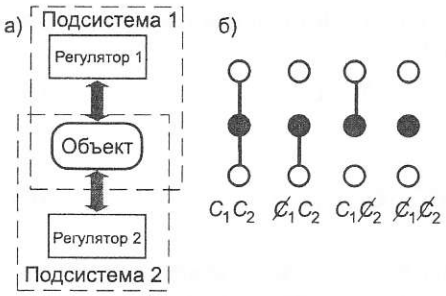


Рис. 4.

В результате комбинированного управления повышается точность и надежность всей системы в целом при относительно низких параметрах каждой из подсистем в отдельности. Отмечено, что система управления состоит из нескольких уровней: организационного, обеспечивающего, оперативного, исполнительного. Каждый из уровней имеет разные свойства при различных технологических операциях и условиях протекания процесса управления, поэтому только совместное функционирование в структуре приводит к улучшению качества всей структуры, в целом, и каждой из подсистем, в частности.

Современные аппаратные средства позволяют создавать не только гибкие быстродействующие системы управления, но и обеспечивать достаточный уровень надежности. Речь идет о технической и функциональной надежности, защищенности от помех, невосприимчивости к ударным и вибрационным нагрузкам, перебоям в электропитании, температурным и другим факторам. Немаловажное значение имеют субъективные факторы: человеческий фактор в человеко-машинных системах, логические коллизии и т. д.

Будем различать две основные модели выхода из строя: сбой в работе объекта и сбой в работе регулятора и рассматривать надёжность как функциональную способность адаптировать алгоритм под возникающую технологическую ситуацию.

Чтобы представить количественные показатели того, как повышается надежность многокомпонентных схем управления, воспользуемся основной концепцией теории надежности (Барлоу и Прошан, 1975) и присвоим каждому регулятору двоичное число:

$$C_i = \begin{cases} 1, \text{ если } i\text{-й регулятор функционирует;} \\ 0, \text{ если имеется сбой } i\text{-го регулятора,} \end{cases} \quad (1)$$

где $i \in M = \{1, 2, \ldots, M\}$, а M — число регуляторов в системе.

Полная система управления описывается двоичным индикатором:

$$\phi_i = \begin{cases} 1, \text{ если система управления функционирует;} \\ 0, \text{ если имеется сбой систем управления.} \end{cases} \quad (2)$$

Определению функционирования соответствует отсутствие «неохваченных» регулятором или алгоритмом C частей взаимосвязанного объекта или процесса. Так, в случае, представленном на рис. 4, *а*, где два включенных регулятора C_1 и C_2 одновременно управляют одним объектом P, существуют четыре возможных конфигурации управления, как показано на рис. 4, *б*. Выход из строя регулятора или алгоритма изображается отсоединением соответствующего светлого круга от черного, обозначающего объект. Первые три структуры будем считать функционирующими, а 4-е состояние — сбоем, поскольку объект обладает неустойчивыми элементами. В случае, если он работает самостоятельно, система становится неустойчивой и нефункционирующей.

Состояния регуляторов определяются вектором $C = (C_1, C_2, ..., C_N)^T$, а состояние всей системы управления задается функцией

$$\Phi = \Phi(C), \quad (3)$$

которую назовем структурой управления Φ.

Структура управления *последовательного типа* описывается в виде

$$\Phi(C) = \prod_{i=1}^{N} C_i = \min\{C_1, C_2, ..., C_N\}. \quad (4)$$

Многокомпонентная система управления, представленная на рис. 4, *а*, имеет параллельную структуру управления

$$\Phi(C) = 1 - (1 - C_1)(1 - C_2) = \max\{C_1, C_2\}. \quad (5)$$

Для N параллельных регуляторов:

$$\Phi(C) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - C_1) = \max\{C_1, C_2, ..., C_n\}. \quad (6)$$

Система может быть скомбинирована из двух основных конфигураций: децентрализованного управления и многокомпонентного управления (см. рис. 4, *а*), представляя конфигурацию параллельно и последовательно связанных регуляторов. В связи с этим вполне естественно анализировать устойчивость связанных структур, поскольку из улучшения надежности на уровне их компонент следует улучшение на уровне всей системы [5]. В детерминированном анализе структур управления связанные системы описываются монотонно возрастающей функцией $\Phi(C)$.

Состояние C_i-го регулятора является случайной переменной величиной с функцией вероятности

$$P = \{C_i = 1\} = p_i = \varepsilon_{c_i}, \quad i \in N, \quad (7)$$

где ε_{c_i} — математическое ожидание случайной переменной c_i.

Будем считать, что p_i является надежностью i-го регулятора. Надежность полной системы управления имеет вид

$$P\{\phi(c) = 1\} = \chi = \varepsilon\phi(c). \quad (8)$$

Поскольку все регуляторы независимы, надежность всей системы можно представить в виде функции надежностей регуляторов с помощью функции надежности

$$\chi = \chi(p). \quad (9)$$

На рис. 5 (*а*, *б*, *в*) показаны структуры управления со следующими функциями надежности, соответствующими системам управления:

последовательная структура (*а*)

$$\chi_a(p) = p^3;$$

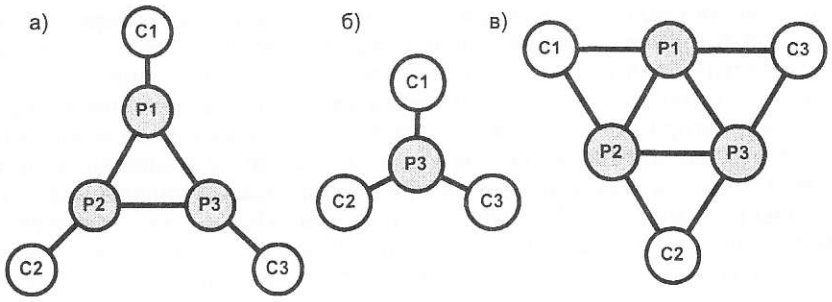


Рис. 5. Структура из трех регуляторов

параллельная структура (*б*)

$$\chi_б(p) = 1 - (1-p)^3;$$

структура два из трех (*в*)

$$\chi_в(p) = 3p^2(1-p) + p^3. \qquad (10)$$

В предположении, что регуляторы (процессы) имеют одинаковую надежность P, функции принадлежности имеют вид, представленный на рис. 6. Особый интерес представляет S-образная кривая, характеризующая структуру вида два из трех, поскольку она является доказательством того, что мы можем достичь желаемую надежность системы управления, используя достаточно малое число регуляторов невысокого качества. Этот результат в точности совпадает с результатом Мура и Шенона (1956 г.), полученным для цепей с запаздыванием.

Кривая (*б*) на рис. 6 показывает, что если надежность регуляторов P больше $1/2$, то функция вероятности $\chi(p)$ лежит выше диагонали $\chi(p) = p$, и надежность системы выше, чем надежность отдельного регулятора. Видно также, что децентрализованная структура (*а*) является менее надежной при сбоях в управлении, но самой надежной при возмущениях во взаимосвязях между объектами, т. е. при сбоях в объекте.

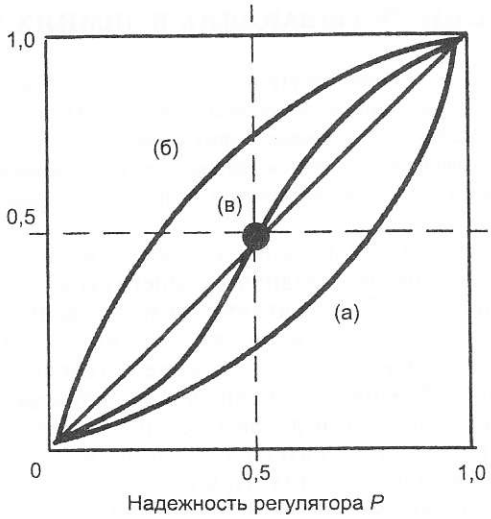


Рис. 6. Надежность системы

Приведенный анализ показывает, что для учета сбоев в управлении и возмущений во взаимосвязях между объектами необходимо использовать некоторую комбинацию децентрализованности и многокомпонентности.

Существует несколько причин, по которым многокомпонентные конфигурации регуляторов превосходят любые другие возможные конфигурации. Наиболее ценным является то обстоятельство, что в свете существующей тенден-

ции интеграции различных информационных систем и компьютерных технологий идея избыточности регуляторов (информационных систем) становится привлекательной для расчета систем автоматического регулирования на всех уровнях. Если вместо этого используется единственный регулятор (принцип управления, алгоритм), то дублирование происходит на уровне компонент, и в процессе функционирования нельзя исключить сбойные компоненты системы.

Таким образом, важной задачей при автоматизации управления остается рациональный выбор конфигурации структуры. Повышение эффективности автоматизации за счет алгоритмически изменяемой архитектуры в зависимости от складывающейся технологической ситуации становится все более актуальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максимычев О. И. Средства синтеза системы управления с нечетким алгоритмом. Теория и практика информационных технологий/О. И. Максимычев, С. Ю. Кудрявцев.— М.: МАДИ (ГТУ), 2004.
2. Максимычев О. И. Информационное обеспечение систем автоматизации в строительстве/О. И. Максимычев, Г. М. Звягин.— М.: Изд. РИА, 2000.
3. Васьковский А. М. Тенденции развития систем автоматического управления дорожно-строительных машин/А. М. Васьковский, О. И. Максимычев.//Сб. тр. МАДИ (ГТУ) «Моделирование и автоматизация в управлении».— Ч. 2.— М., 2003.
4. Воробьёв А. В. Автоматизация уплотнения грунтов виброкатками/А. В. Воробьёв, А. М. Васьковский//Изв. вузов. Строительство.— 1992.— С. 147—150.
5. Шильяк Д. Децентрализованное управление сложными системами/Д. Шильяк.— М.: Мир, 1994.

© Максимычев О. И., Кудрявцев Ю. И., 2005

Получено 25.01.05

УДК 693.547.3.001.24

И. А. ПОДЛАСОВА, канд. техн. наук, доц., А. М. ГУСАКОВ, асп., Е. Р. КУЛИ-ОГЛЫ, студ. (Томский государственный архитектурно-строительный университет)

ВНУТРЕННИЙ ВЛАГОПЕРЕНОС В СВЕЖЕУЛОЖЕННОМ БЕТОНЕ КОНСТРУКЦИЙ, ОСТЫВАЮЩИХ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Разработана методика исследования внутреннего массопереноса в свежеуложенном бетоне при помощи установки регулируемых температурных градиентов. Результаты экспериментов на составах мелкозернистого бетона показали существование новых условий присутствия этого процесса при его остывании. В границах условий экспериментов подтвержден термокапиллярный механизм перемещения влаги под действием градиента температуры и присутствия льда.

Отсутствие периода предварительного выдерживания бетона в построечных условиях зимой вызывает градиент температуры, а затем и влажности сразу после укладки смеси. При контакте свежеуложенного бетона с арматурой, основанием, рабочими швами, опалубкой, имеющими температуру наружного воздуха, и возникновением льда даже в течение короткого времени (2–4 часа) происходит образование ледяных линз, которые не только снижают прочность контактной зоны, но и делают бетон неоднородным [1]. Проблема актуальна также для безобогревного способа выдерживания бетона зимой, бетонировании в вечномерзлых грунтах. При подборе количества противоморозных добавок оптимальная расчетная льдистость бетона составляет 45–60% при температуре замерзания раствора [2]. Температурные градиенты в начальный период твердения могут достигать 1,5–2,5°С/см. Как показано в [3–4], перераспределение влаги в период, предшествующий схватыванию, необратимо увеличивает пористость, уменьшает плотность и прочность охлажденных увлажненных зон. Схватывание фиксирует цементный камень со сложившимся к этому времени водоцементным отношением.

Несмотря на указанный выше негативный эффект, ограничение температурного градиента в нормативной литературе связывают только с опасностью

трещинообразования на стадии распалубки. Исследования процесса влагопереноса в свежеуложенном бетоне при его охлаждении в 1980–90-х годах выявили особенности его проявления на различных составах: пониженное водоцементное отношение и «жирные» смеси проявляли большую способность к миграции влаги, чем «тощие» с повышенным водоцементным отношением составы [3]. Этот эффект косвенно наблюдали при раннем замораживании смесей с противоморозными добавками [1]. В работе [4] разработана модель этого процесса на основании капиллярного течения влаги в сторону пониженных температур. Однако наши дальнейшие эксперименты на различных составах и различных температурных градиентах показали, что процесс миграции влаги в сторону пониженных температур в остывающем бетоне наблюдается не всегда. Методика эксперимента также была очень трудоемкой. Это побудило нас к продолжению работы в этом направлении. В результате были разработаны новые технические средства для изучения процесса. Ниже изложены результаты этих исследований.

Оборудование. Для исследования нами была разработана установка регулируемых температурных градиентов, позволяющая в автоматическом режиме создавать и поддерживать в течение заданного времени неоднородное температурное поле в трех горизонтально расположенных образцах твердеющего бетона (рис. 1). Установка состоит из теплообменника, термостата, устройства для крепления образцов, нагревателей, комплекта приборов измерения и регулирования температуры.

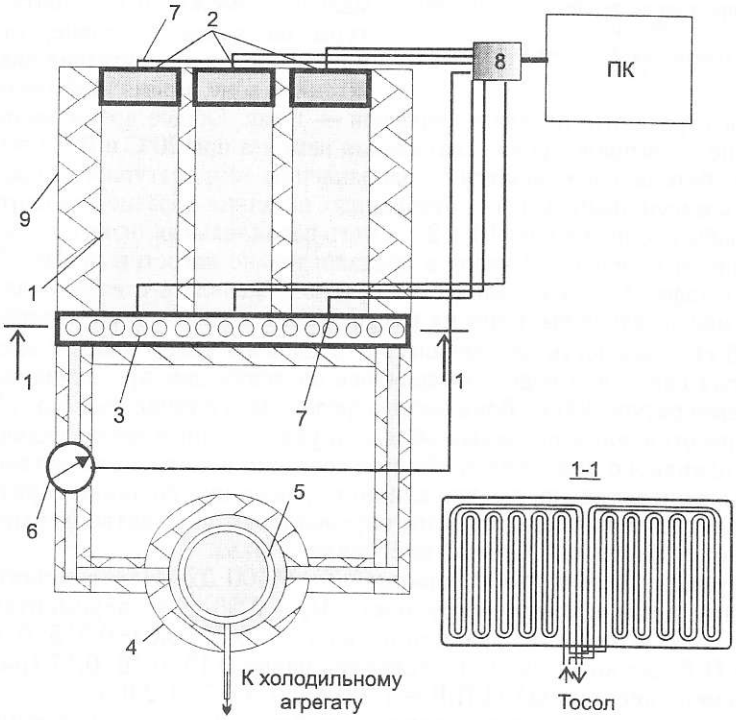


Рис. 1. Схема установки

1 — образцы; *2* — нагреватели; *3* — теплообменник; *4* — термостат; *5* — испаритель холодильного агрегата; *6* — насос; *7* — датчики температуры; *8* — АЦП; *9* — теплоизоляция

Термостат представляет собой металлическую емкость объемом 20 л, заполненную антифризом (тосолом). Охлаждение тосола производится холодильным агрегатом с мощностью охлаждения 500 Вт. Теплообменник — медная трубка-змеевик диаметром 8 мм, залитая в алюминиевую пластину, через насос связана с термостатом. Минимальная температура охлаждения антифриза — минус 22°С.

Формы с внутренними размерами 100×100×300 мм выполнены из стеклопластика с металлическими пластинами-торцами, герметичны и изолированы от изменения температуры в поперечном сечении. Стальные пластины — тор-

цы форм с одной стороны соприкасаются с нагревателями, с другой — с алюминиевой пластиной-теплообменником.

Измерение и регулирование температуры в периоды нагрева-охлаждения и изотермического интервала производится контрольно-измерительным комплексом (АЦП и программ), соединенным с термопарами, установленными по длине образцов. В тестовых экспериментах температура по сечению образцов параллельно измерялась независимыми термоэлектронными регистраторами.

Методика экспериментов. Приготовленная смесь мелкозернистого бетона помещалась в формы, уплотнялась и сразу подвергалась температурному воздействию. Таким способом имитировалось остывание бетонных конструкций через опалубку в зимних условиях. Температура «горячего» торца поддерживалась при температурах 30–45°С. Температура «холодного» торца поддерживалась на задаваемом уровне в пределах значений 0 ÷ –3,5°С. Максимальное значение принято из условия уменьшения или исключения механизма перемещения влаги за счет расширения пара, значительного при температурах около 80°С (рис. 2).

Рис. 2. Распределение температуры по длине образцов

1 — исходная температура; *2* — через 4 часа выдерживания

Значение температуры «холодного» торца обусловлено созданием максимально возможного градиента температуры на холодном торце, отсутствие или, наоборот, присутствие льда в охлажденной зоне. Время стабилизации температурного градиента по длине образцов — 1 час. Общее время эксперимента 4 часа — не превышало срока схватывания цемента при 20°С и В/Ц = 0,43–0,7. Влажность бетона, сложившаяся по направлению температурного градиента, определялась высушиванием проб, отобранных по длине образцов из центра их сечений. Пробы отбирались по 10–12 г в пять параллельных бюкс с последующим высушиванием в течение 4 часов в предварительно нагретом до 180–200°С сушильном шкафу. Масса и количество проб определялась степенью заполнения бюкс для максимально быстрого их высушивания и ошибкой определения массы (± 0,00125 г). Влажность определялась отношением массы влаги к массе сухой пробы. Доля связанной воды определялась последующим прокаливанием образцов при температуре 800°С. Влажность определялась с точностью 1,5–2% абс.

При изготовлении песчаных образцов увлажненный песок укладывался в формы и одинаково уплотнялся. Формы согласно конструкции установки расположены горизонтально, так что влияние гравитации по длине образцов было постоянным. Длина замерзшей зоны определялась по ее затвердеванию, изменению цвета (матовый). Опыты повторяли 3 раза.

Материалы: цемент М500 Топкинского, М400 Д20 Искитимского цементных заводов, песок с модулем крупности $M_к$ = 2,56. В экспериментах использовались также отдельные фракции песка 1,25–0,63; 0,63–0,315; 0,315–0,14, исходное П:В для которых соответственно равно 0,15; 0,16; 0,17 (рис. 3). Составы (цемент:песок:вода) Ц:П:В = 1:2:0,43; 1:4:0,7; 1:2:0,5.

В качестве испытуемого материала выбран именно мелкозернистый бетон, так как ставилась задача выявления термокапиллярного механизма течения влаги, в большей степени актуального для мелкого заполнителя и водно-цементной пасты; также определение влажности тяжелого бетона связано с отбором проб значительно большей массы, что увеличивает время их высушивания. Результаты проведенных экспериментов показаны на рис. 3–6.

Обсуждение результатов. Анализ показал, что основной причиной движения влаги в охлажденную зону в песчаных образцах является не градиент температуры, а образование льда: изменение влажности на холодном торце при его замораживании (рис. 3, *б*) на 17,6–26% выше, чем при отсутствии льда (рис. 3, *а*). Реакция на его появление увлажненных песчаных фракций различная: чем тоньше фракция, тем количество переместившейся влаги меньше от 14,9 (фракция 0,14–0,315) до 34% (фракция 0,63–1,25). Исходная

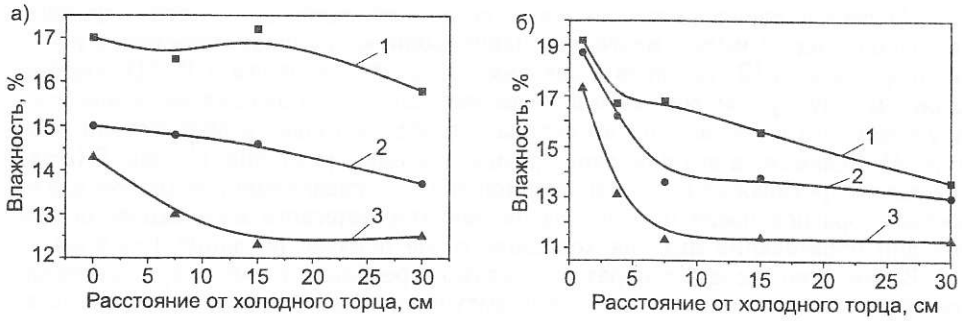


Рис. 3. Распределение влажности через 4 часа неизотермического выдерживания по длине увлажненных песчаных образцов

а — без замораживания холодного торца; *б* — с замораживанием холодного торца; *1* — фракция 0,14–0,315; *2* — фракция 0,315–0,63; *3* — фракция 0,63–1,25

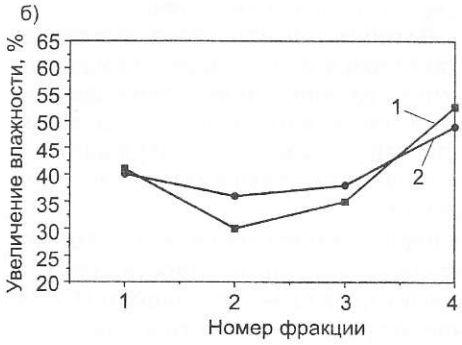
влажность принималась различной с целью достижения одинакового количества свободной воды из предположения, что часть ее адсорбируется на частицах песка. Предполагаем, что различие в степени переувлажнения охлажденной зоны в различных фракциях песка связано с механизмом переноса влаги. В песчаных образцах капиллярно-менисковое течение воды под действием градиента температуры гораздо слабее из-за значительных размеров капилляров и наличия воздушных пор. Термокапиллярно-пленочное течение в таких пористых средах играет более значимую роль [5]. Последняя зависит от размера частиц: при равном количестве свободной воды сопротивление потоку жидкости увеличивается с уменьшением размера песчинок из-за образования на них более толстой адсорбированной пленки.

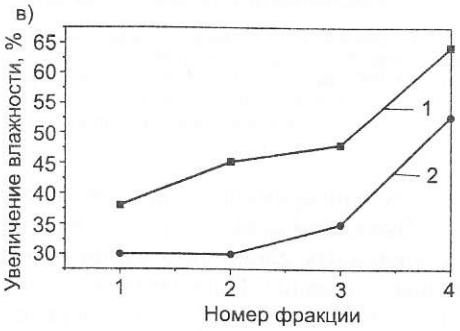
Рис. 4. Распределение влажности через 4 часа неизотермического выдерживания по длине цементно-песчаных образцов состава 1:2:0,43. Топки М500

1 — исходная влажность; *2* — то же, $T_{х.т}$ = 0,5°С; *3* — через 4 часа неизотермического выдерживания, $T_{х.т}$ = −0,5°С

Рис. 5. Влияние фракций песка мелкозернистого бетона с Ц:П = 1:2 на увеличение влажности замороженной зоны образца длиной 1,5 см от холодного торца; фракции 0,14–0,315 (*1*); 0,315–0,63 (*2*); 0,63–1,25 (*3*); песок с $M_к$ = 2,56 (*4*);

а) *1* — Топки М500, В/Ц = 0,43; 2 — Искитим М400 Д20, В/Ц = 0,43





б) *1* — Топки М500, В/Ц = 0,5; *2* — Искитим М400, В/Ц = 0,5;
в) *1* — Топки М500, В/Ц = 0,43; *2* — Топки М500, В/Ц = 0,5

На два-три порядка меньшие, чем в песке, капилляры образуются в цементно-водной смеси (пасте). Благодаря индукционному периоду, цементная паста некоторое время (2–12 часов в зависимости от температуры и В/Ц) подобна влажному грунту. Так же, как и в песке, массоперенос в охлажденной зоне свежеуложенного мелкозернистого бетона наблюдали только в присутствии льда (рис. 4). Реакция на его появление разных составов различна. На рис. 5 (*а–в*) показано переувлажнение замороженной зоны по сравнению с исходной влажностью образцов после четырех часов неизотермического выдерживания при условии образования льда на холодном торце образца на длине 1–1,5 см.

В цементно-песчаных образцах, видимо, преобладает капиллярно-мениковое течение влаги под действием температурного градиента и образования льда. Его скорость зависит от размеров капилляров (исходной влажности) и величины температурного градиента. Это видно из рис. 5 (*в*): с понижением В/Ц уменьшаются размеры капилляров, заполненные жидкостью, следовательно, увеличивается капиллярное давление, вызванное разностью температур и обратно зависящее от квадрата радиуса капилляров. С этих же позиций объясняется роль более тонко- (М500) или грубодисперсного (М400) цемента, формирующего капилляры меньшего или большего размера. Присутствие льда создает дополнительный фактор для перемещения влаги не только из-за химического сродства с водой (увеличение пленочного потока в замороженной области), но и, возможно, из-за создания суховоздушной зоны за счет изменения агрегатного состояния воды.

Влияние фракций песка объяснить сложнее, так как при равном исходном В/Ц количество свободной воды в образцах увеличивалось с увеличением фракции из-за ее адсорбции цементными и песчаными частицами. Поэтому анализ рис. 5 (*а–б*) производился по двум факторам. По сравнению с песчаными образцами влияние фракций подобно при В/Ц = 0,43: в составах на фракционированном песке количество переместившейся воды тем больше, чем крупнее фракция. При В/Ц = 0,5 эта зависимость сглаживается. Видимо, здесь имеем дело с некоторым критическим значением $W_к$ цементно-песчаной смеси, ниже которого преобладает термокапиллярно-пленочное течение, а выше — термокапиллярно-менисковое. Наибольшее значение влажности во всех случаях соответствует песку со смешанными фракциями. Это объясняется формированием более плотной структуры каркаса смеси, который, в соединении с цементно-водной композицией обеспечивает наименьший, по сравнению с другими вариантами, радиус капилляров, а значит, его наибольшую способность отдавать влагу под действием льда и градиента температуры.

Рис. 6. Плотность по сечению образцов мелкозернистого бетона, изготовленного из цемента Топки М500, выдержанного 4 часа в неизотермических условиях (рис. 2), а затем 28 сут твердевшего в нормальных условиях

—▲— 1 : 2 : 0,43

Результат воздействия градиента температуры и присутствия замороженной зоны можно проследить по изменению плотности в охлажденной зоне образцов, выдержанных 4 часа в неизотермических условиях с температурой холодного торца $T_{хт} = -0{,}5°C$, а затем твердевших 28 сут в нормальных условиях (рис. 6). Плотность определялась в соответствии с ГОСТ 12730.1-78 после разрушения образцов.

Выводы. Разработана методика, позволяющая получать достаточно надежную картину поля влагосодержания в свежеизготовленных цементно-песчаных образцах, выдержанных в неоднородном температурном поле при их одновременном нагреве и охлаждении.

Выявлены новые условия присутствия процесса миграция влаги в сторону охлажденных слоев свежеуложенного бетона — модуль крупности песка и льдообразование. Присутствие последнего фактора в слое толщиной от 0,3 мм способно вызвать за 4 часа переувлажнение этого и ближайшего к нему слоя (1–3,5 см) на 21–65% от исходного влагосодержания. Это необратимо уменьшает плотность цементного камня последующих периодов твердения.

Экспериментально установлено влияние отдельных фракций мелкого заполнителя на распределение влаги за период до схватывания цемента. Определено, что для цементно-песчаных составов существует «критическая» влажность, ниже значения которой увеличение фракции способствует переносу влаги.

Подтвержден термокапиллярный механизм миграции влаги в области границ рассмотренных влажностей. Присутствие льда вызывает резкий скачок потока влаги за счет возникновения дополнительного механизма ее миграции в промерзающую зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов С. А. Бетоны, твердеющие на морозе/С. А. Миронов, А. В. Лагойда.— М.: Стройиздат, 1974.— 263 с.
2. Руководство по применению бетонов с противоморозными добавками.— М.: Стройиздат, 1978.— 81 с.
3. Лагойда А. В. Теоретические основы технологии бетона с противоморозными добавками. Автореф. ... д-ра техн. наук/А. В. Лагойда.— М, 1987.— 37 с.
4. Лагойда А. В. Прогнозирование внутреннего неизотермического массопереноса на начальном этапе выдерживания бетона/А. В. Лагойда, А. И. Гныря, Б. В. Дудка, Ю. С. Саркисов, И. А. Подласова//Бетон и железобетон.— 1996.— № 3–4.— С. 7—11, 8—12.
5. Глобус А. М. Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена/А. М. Глобус.— Л.: Гидрометеоиздат, 1983.— 370 с.

© Подласова И. А., Гусаков А. М., Кули-Оглы Е.Р., 2005

Получено после доработки 25.01.05

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.921.42.001.24

К. И. ЛОГАЧЕВ, д-р техн. наук, доц., А. И. ПУЗАНОК, асп., Е. В. СЕЛИВАНОВА, инж. (Белгородский государственный технологический университет)

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ЭКРАНИРОВАННОГО ОТСОСА-РАСТРУБА*

На основе метода дискретных вихрей рассчитано воздушное течение у отсоса-раструба, экранированного кольцевой струей, истекающей из торцов раструба. Исследовано развитие вихревой структуры течения и распределение поля скоростей при различных геометрических и кинематических параметрах экранированных отсосов в неограниченном пространстве и над непроницаемой плоскостью.

В ряде экспериментальных исследований [1, 2] показана целесообразность аэродинамического экранирования местных отсосов закрученной кольцевой струей. Дальнобойность всасывающего факела (скорость воздуха в характерных точках) в этом случае может быть повышена в 2–3 раза. Однако исследования воздушных течений у местного отсоса проводились над непроницаемой плоскостью. Такая непроницаемая плоскость (механический экран), очевидно, вызывает большее влияние на скорость подтекающего к отсосу воздуха, чем закрученная кольцевая струя (аэродинамический экран).

Целью данной работы является численное исследование воздушных течений у механически и аэродинамически экранированного местного отсоса. В качестве аэродинамического экрана используется прямоточная кольцевая струя, поскольку при натекании ее на непроницаемую плоскость возникает бóльшая скорость возвратного течения воздуха, чем при использовании закрученной струи, которая способствует выбросу из зоны локализации пылевых частиц за счет центробежных сил.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-31.2003.08.

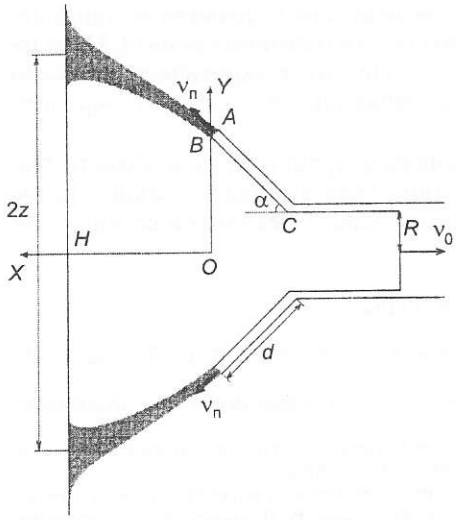


Рис. 1. Круглый отсос-раструб, экранированный кольцевой приточной струей, над непроницаемой плоскостью

Исследуем течение при фиксированной скорости отсоса v_0 и переменной скорости истечения приточной кольцевой струи $v_п$, различных углах α и длинах раструба d. Необходимо найти такие α и d, при которых возвратное течение (рис. 1) имеет наибольшую величину осевой скорости.

Численный алгоритм расчета. Решать задачу будем в осесимметричной постановке на основе метода дискретных вихрей [3, 4]. Граница дискретизируется системой бесконечно тонких вихревых колец, между которыми посредине находятся расчетные точки (кольца), где задаются граничные условия: на твердых стенках — условие непроницаемости, в приточных и вытяжных отверстиях — соответствующие величины нормальной составляющей скорости. В каждый момент времени с острых кромок (точки A, B, C) сходят три кольцевых вихря. Для моделирования вихревой пелены используется система "урезанных" вихревых колец без самоиндукции, корректность использования которой обоснована в [4]. Это означает, что в точках, удаленных от вихревого кольца на расстояние, меньшее шага дискретности, скорость, индуцированная действием кольца, принимается равной нулю. Для точек, расположенных на больших расстояниях, скорость в заданном направлении $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ определяется из выражения [5]

$$v_п = \Gamma \frac{\xi_2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(\xi_2 - r\cos\theta)n_1 + (x - \xi_1)n_2 \cos\theta}{[(x-\xi_1)^2 + \xi_2^2 + r^2 - 2r\xi_2\cos\theta]^{3/2}} d\theta,$$

где x, r — цилиндрические координаты произвольной точки области; ξ_1, ξ_2, θ — цилиндрические координаты точек вихревого кольца с циркуляцией Γ.

После несложных преобразований выражение для скорости примет вид

$$v_п = \Gamma \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{[g - k\cos\theta]^{3/2}} + \Gamma \frac{\xi_2}{4\pi}[(x-\xi_1)n_2 - rn_1] \int_0^{2\pi} \frac{\cos\theta d\theta}{(g - k\cos\theta)^{3/2}}$$

или иначе

$$v_п = \Gamma \cdot G, \tag{1}$$

где

$$\begin{cases} G = \dfrac{(A_1 k + A_2 g)}{k} \cdot \dfrac{4}{(g-k)\sqrt{g+k}} E\left(\dfrac{\pi}{2}, t\right) - \dfrac{A_2}{k} \cdot \dfrac{4}{\sqrt{g+k}} K\left(\dfrac{\pi}{2}, t\right) \text{ при } k \neq 0, \\ G = \dfrac{\xi_2^2 \cdot n_1}{2g\sqrt{g}} \quad \text{при } k = 0; \end{cases} \tag{2}$$

$k = 2r\xi_2 \geq 0$, $g = (x-\xi_1)^2 + \xi_2^2 + r^2 > 0$; $A_1 = \dfrac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}$, $A_2 = \dfrac{\xi_2}{4\pi}[(x-\xi_1)n_2 - rn_1]$;

$K\left(\dfrac{\pi}{2}, t\right) = \int_0^{\pi/2} \dfrac{d\theta}{\sqrt{1 - t^2 \sin^2\theta}}$, $E\left(\dfrac{\pi}{2}, t\right) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - t^2 \sin^2\theta} d\theta$ — полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го родов, $t = \dfrac{2k}{g+k}$.

При вычислении эллиптические интегралы представлялись разложениями:

$$K\left(\frac{\pi}{2},t\right)=\sum_{i=0}^{4}c_i(1-t)^i+\sum_{i=0}^{4}d_i(1-t)^i\ln\frac{1}{1-t};$$

$$E\left(\frac{\pi}{2},t\right)=1+\sum_{i=0}^{4}c_i(1-t)^i+\sum_{i=0}^{4}d_i(1-t)^i\ln\frac{1}{1-t};$$

коэффициенты c_i, d_i — из таблиц [6].

Скорость, индуцируемая в произвольной точке течения всей совокупности вихревых колец в m-й момент времени ($t = m\Delta t$), определяется по формуле

$$\nu_{\text{п}}^{\text{р}}=\sum_{k=1}^{N}\Gamma^k G^{pk}+\sum_{\tau=1}^{m}\sum_{l=1}^{3}G_l^{p\tau}\gamma_l^{\tau}, \qquad (3)$$

где Γ^k — циркуляция k-го присоединенного вихря;

G^{pk} — функция, определяющая действие k-го вихря на p-ю точку, выражается формулой (2);

Δt — шаг по времени;

$G_l^{p\tau}$ — функция, выражающая влияние свободного вихря интенсивностью γ_l^{τ}, сошедшего с l-й точки в момент времени τ на ту же p-ю точку. Эта функция вычисляется по формуле (2), где (ξ_1, ξ_2) — координаты вихря интенсивности γ_l^{τ}. Изменяя в (3) p от 1 до $N-1$, получим систему $N-1$ линейных алгебраических уравнений с N неизвестными $\Gamma^1, \Gamma^2, \ldots, \Gamma^N$.

К системе уравнений (3) добавим условие неизменности циркуляции

$$\sum_{k=1}^{N}\Gamma^k+\sum_{\tau=1}^{m}\sum_{l=1}^{3}\gamma_l^{\tau}=0. \qquad (4)$$

Решив полученную систему уравнений (3), (4), определим неизвестные циркуляции присоединенных вихрей.

В $m+1$-й момент времени количество свободных вихрей увеличивается на три за счет схода их по направлению потока с трех острых кромок. Все вихри, находившиеся в потоке до этого момента времени, приобретают свои новые положения:

$$x'=x+\nu_x\Delta t; \qquad y'=y+\nu_y\Delta t,$$

где ν_x, ν_y — составляющие скорости движения вихря. Эти скорости вычисляются по формуле (3), где $\vec{n}=\{1;0\}$ и $\vec{n}=\{0;1\}$ для ν_x и ν_y соответственно. Здесь учитывается действие на точку (x, y) всей вихревой системы в m-й момент времени.

Результаты расчета и их обсуждение. Во всех расчетах шаг дискретности (расстояние между соседними расчетной точкой и присоединенным вихрем) $h = 0{,}01$ м; шаг по времени $\Delta t = h/\nu_{\text{п}}$ при $\nu_{\text{п}} \geq 1$ м/с и $\Delta t = h$ при $\nu_{\text{п}} < 1$; $R = 0{,}15$ м; толщина стенок 0,02 м.

При представлении результатов численных расчетов все кинематические и геометрические параметры преобразовывались к безразмерному виду

$$(\bar{x}=x/R,\ \bar{d}=d/R,\ \bar{H}=H/R,\ \bar{z}=z/R,\ \bar{\nu}=\nu/\nu_0).$$

Далее оперируем только безразмерными величинами, черточки над буквами опускаем.

Поскольку задача решается в нестационарной постановке, то рассчитываемые величины усреднялись по времени.

Рассмотрим вначале течение у аэродинамически экранированного местного отсоса, расположенного в неограниченном пространстве. Здесь имеем две характерные картины течения (рис. 2). Первая — истекающая кольцевая струя полностью улавливается отсосом; вторая — одна часть воздушного потока улавливается отсосом, другая достаточно быстро смыкается и далее развивается по законам турбулентной струи.

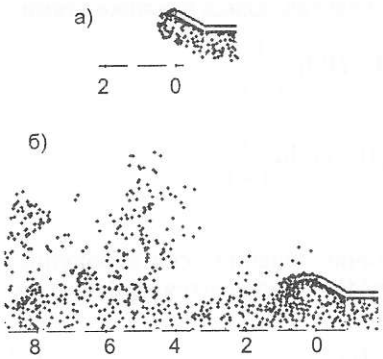


Рис. 2. Вихревая структура течения у экранированного отсоса-раструба в неограниченном пространстве: приточная струя полностью улавливается отсосом (*а*) и разделяется на две (*б*)

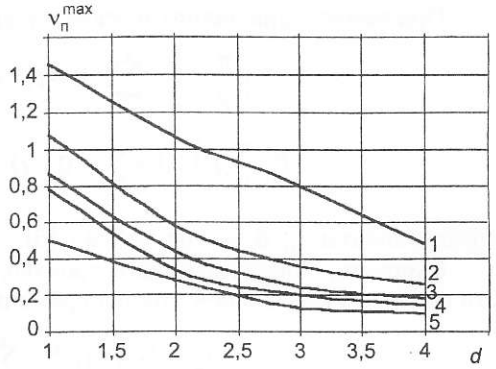


Рис. 3. Зависимость $v_п^{max}$ от длины раструба *d* при различных углах α: *1* — 30°; *2* — 45°; *3* — 60°; *4* — 75°; *5* — 90°

На рис. 3 представлена зависимость наибольшей величины безразмерной скорости приточной струи $v_п^{max} = v_п / v_0$, при которой она полностью улавливается отсосом, от длины и угла наклона раструба. Здесь не удалось найти геометрические и кинематические параметры, при которых скорость подтекания воздуха к отсосу увеличивается за счет экранирующего эффекта приточной струи. Сравнение в последнем случае производилось между аэродинамически экранированным отсосом и отсосом с "отключенной" приточной струей. Расходы перерабатываемого воздуха были одинаковы, т. е. расход отсасываемого воздуха во втором случае равнялся сумме расходов истекающего и отсасываемого воздуха для аэродинамически экранированного отсоса.

Наибольший интерес для практических задач имеет случай наличия механического экрана, так как местный отсос всегда располагается над элементами выделяющего загрязняющие вещества технологического оборудования. Характерные картины течения в случае расположения отсоса над неограниченной плоскостью изображены на рис. 4. При "отключенной" приточной струе (рис. 4, *а*) параметры вихревой области близки к исследовавшимся в работе [7] для отсосов-раструбов с бесконечно тонкими стенками. С включением приточной струи вихревая область расширяется (рис. 4, *b*), и при определенной скорости $v_п$ струя разделяется на две части: улавливаемая отсосом и растекающаяся по непроницаемой плоскости (рис. 4, *с*). Наибольший для практики интерес представляет случай (рис. 4, *d*) когда струя разделяется на две в месте натекания ее на плоскость. Осевая скорость течения в определенных точках возрастает в несколько десятков раз (рис. 5), что способствует эффек-

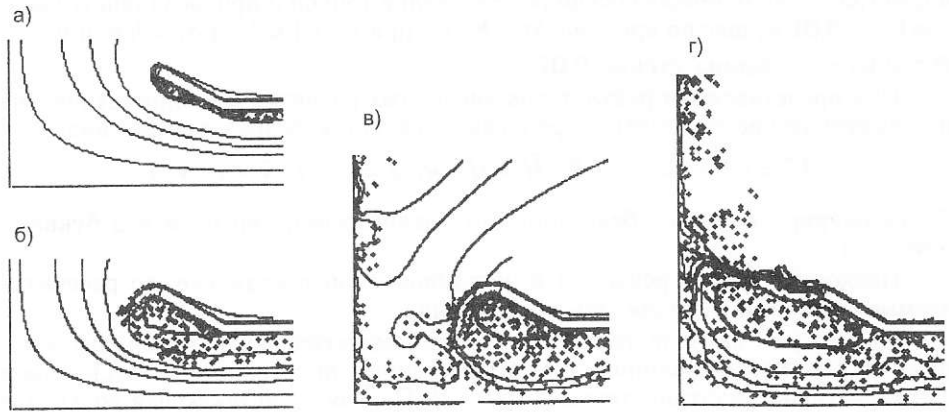


Рис. 4. Вихревая структура течения и линии тока у экранированного местного отсоса при α = 30°, *d* = 1, *H* = 2

а — $v_п$ = 0; *б* — $v_п$ = 1; *в* — $v_п$ = 2; *г* — $v_п$ = 4

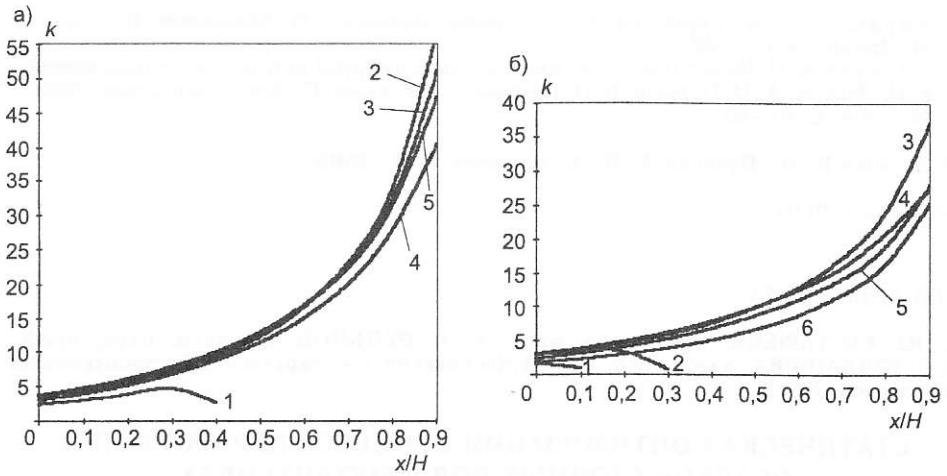


Рис. 5. Изменение величины $k = v_{пх}/v_{сх}$ при удалении от входа в раструб
1 — $\alpha = 0°$; *2* — $\alpha = 15°$; *3* — $\alpha = 30°$; *4* — $\alpha = 45°$; *5* — $\alpha = 60°$; *6* — $\alpha = 75°$

тивной локализации загрязняющих веществ, образующихся в данной области. Наибольший эффект достигается при наклоне раструба в 30° ($v_{пх}$ — осевая скорость воздуха при действии приточных струй и отсоса; $v_{сх}$ — осевая скорость без аэродинамического экранирования при расходе отсасываемого воздуха, равном сумме расходов приточной струи и отсоса при наличии экранирующей струи). Изменение осевой скорости для этого случая при разных длинах раструба и удалении от непроницаемой плоскости показана на рис. 6. При увеличении длины раструба и угла его раскрытия увеличивается ширина зоны подтекающего по стенке воздуха z (см. рис. 6). В последнем случае, однако, падает осевая скорость течения.

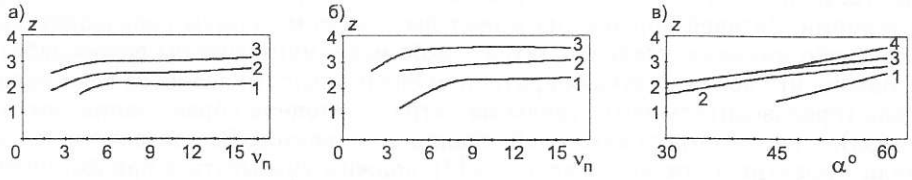


Рис. 6. Изменение величины z
а — $\alpha = 30°$, $H = 2{,}1$; $d = 1$; 2: $d = 2$; 3: $d = 3$; *б* — $\alpha = 30°$, $H = 3{,}1$; $d = 1$; 2: $d = 2$; 3: $d = 3$; *в* — $H = 2$, $d = 1{,}1$ – $v_п = 2{,}2$ – $v_п = 4{,}3$ – $v_п = 8{,}4$ – $v_п = 16$

Уравнение оси струи предлагается определять по формуле

$$y = \frac{z - 1 - d\sin\alpha - H\mathrm{tg}\alpha}{H^2}(x - H)^2 + \frac{2z - 2 - 2d\sin\alpha - H\mathrm{tg}\alpha}{H}(x - H) + z. \qquad (5)$$

Построенная по этой формуле ось струи с достаточной для практики точностью позволяет определить область локализации загрязняющих веществ.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании энергосберегающих эффективных систем местной вытяжной вентиляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивенский В. Г. Совершенствование систем аспирации на основе использования вихревого эффекта/В. Г. Ивенский: Автореф. дис.... канд. техн. наук.— Ростов-н/Д, 1991.— 18 с.
2. Зайцев О. М. Удосконалення вилучення шкідливостей закрученими потоками від нефіксованих теплових джерел/О. М. Зайцев: Автореф. ... канд. техн. наук.— Одеса, 1996.— 16 с.
3. Белоцерковский С. М. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей/С. М. Белоцерковский, А.С. Гиневский.— М.: Физматлит, 1995.— 368 с.
4. Гоман О. Г. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости/О. Г. Гоман, В. И. Карплюк, М. И. Ништ, А. Г. Судаков; Под ред. М. И. Ништа.— М.: Машиностроение, 1993.— 288 с.
5. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика/Н. Я. Фабрикант.— М.: Наука.— 816 с.

6. Абрамовица М. Справочник по специальным функциям/М. Абрамовица, И. Стиган.— М.: Наука, 1979.— 832 с.
7. Логачев К. И. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы методом дискретных вихрей/ К. И. Логачев, А. И. Пузанок, В. Н. Посохин//Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2004.— № 7, 8.— С. 61—69.

© Логачев К. И., Пузанок А. И., Селиванова Е. В., 2005

Получено 31.01.05

УДК 628.35.001.24

К. Ю. ЕВСТАФЬЕВ, канд. техн. наук, А. А. РУЛЬНОВ, д-р техн. наук, проф., Д. К. ЮЛДАШЕВА, канд. техн. наук (Московский государственный строительный университет)

СТАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СБРАЖИВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В МЕТАНТЕНКАХ

Сформулирована и решена задача оптимизации статических режимов процесса по критерию "максимальный доход". На основе упрощенной математической модели разработан алгоритм управления, реализация которого требует минимального объема памяти компьютера и поэтому может быть осуществлена на УВМ малой мощности, в том числе в микропроцессорных контроллерах.

Ранее, в работе [1], нами уже отмечалось, что определение целевой функции является одним из наиболее ответственных этапов технологических процессов обработки воды. Недооценка этого этапа и выбор критерия оптимальности, не соответствующего поставленной задаче, может привести к ошибкам, которые сведут «на нет» все последующие усилия по автоматизации процесса.

Известно [2], что управления технологическими процессами в системах водоотведения могут оцениваться разными по своему экономическому смыслу критериями. Задачей управления может быть либо максимум производительности, либо минимум удельных затрат, либо максимум качества водообработки. Важно, что во всех случаях критерием оптимальности является один показатель (производительность, удельные затраты, степень сбраживания, выход биогаза), а не система показателей; скаляр, а не вектор. Все остальные показатели эффективности, как следует из [3], должны учитываться при формулировании ограничений.

Нельзя, например, требовать одновременно и максимальной производительности метантенка, и минимального расхода пара на единицу сбраживаемых осадков, поскольку не совпадают значения параметров технологического режима, при которых достигается каждая из этих целей. Поэтому следует выделить главную цель, а оценку приближения к этой цели назначить критерием оптимальности. Другие показатели следует ограничить по допустимому значению.

Применительно к рассматриваемому нами процессу задачу статической (проектной) оптимизации можно сформулировать одним из следующих способов.

Если в конкретных условиях работы станции аэрации главной задачей является выполнение планового задания по обработке осадков (часто такая ситуация возникает в конце планового промежутка времени), то необходимо обеспечить максимум производительности F_1, не превысив при этом предельно допустимого значения $G_{\text{п.max}}$ расхода пара $G_{\text{п}}$ на единицу обрабатываемого потока, т.е. потребовать, чтобы

$$F_1^* = \max F_1 \text{ и } G_{\text{п}} \le G_{\text{п.max}}. \tag{1}$$

Если же по условиям работы очистных сооружений нет угрозы невыполнения планового задания, но существует опасность перерасхода теплоносителя, то задачу оптимизации следует сформулировать иначе:

$$G_{\text{п}}^* = \min G_{\text{п}} \text{ и } F_1 \ge F_{1.\text{пл}}, \tag{2}$$

где $F_{1пл}$ — планируемое количество обрабатываемых осадков; в соотношениях (1) и (2) индексом «*» отмечена величина, характеризующая цель оптимизации процесса.

В нашем случае в качестве критерия оптимальности может быть также принят сводный показатель эффективности — «переменная часть себестоимости» единицы обрабатываемого потока осадков (или получаемого биогаза), которая представляет собой сумму лишь тех удельных затрат, которые наиболее чувствительны к качеству уравнения:

$$C = (\Sigma З / F_1) \to \min. \quad (3)$$

Рассмотренные критерии являются традиционными и уже многие годы используются в практике решения оптимизационных задач водоснабжения и водоотведения [4]. В современных же условиях рыночной экономики, учитывая при этом, что при сбраживании осадков в метантенках образуется ценный побочный продукт — биогаз, представляется более правильным использовать другой обобщенный показатель экономической эффективности, удовлетворяющий всем изложенным выше требованиям — доход, который может быть представлен в следующем виде:

$$D = (Ц_1 F_2 - З) \to \max, \quad (4)$$

$$З = Ц_2 G_п, \quad (5)$$

где F_2 — количество получаемого биогаза;
З — затраты на производство биогаза;
$Ц_1$, $Ц_2$ — цены соответственно получаемого биогаза и израсходованного пара.

Критерий (4) с учетом (5) не только удовлетворяет специфическим требованиям, вытекающим из математической постановки задачи оптимизации, но и хорошо согласуется также с основными результатами исследования статических характеристик [1].

Все вышесказанное позволяет в окончательном виде задачу оптимизации статических режимов сформулировать следующим образом: необходимо найти управляющие воздействия F_1 и $G_п$, обеспечивающие максимум дохода

$$D = (Ц_1 F_2 - Ц_2 G_п) \to \max, \quad (6)$$

при соблюдении ограничений на степень сбраживания и качество биогаза

$$\Delta \geq \Delta_{зад}; \quad (7)$$

$$CH_4 \geq (CH_4)_{зад} \quad (8)$$

и выполнении условий физической реализуемости по расходу пара

$$G_п \leq G_{п.max}. \quad (9)$$

Поскольку определение максимального значения критерия D выполняется в плоскости двух переменных $F_1 - G_п$, оказалось возможным использование графико-аналитического метода оптимизации. Статическая поверхность для одного из значений содержания субстрата в осадках, поступающих на сбраживание в метантенк, приведена на рис. 1. Расчеты и построение этой поверхности выполнялись на примере метантенков, эксплуатирующихся на Люберецкой станции аэрации Москвы.

Наличие ярко выраженного экстремума на рис. 1 значительно облегчило решение поставленной оптимизационной задачи. Так, совместное рассмотрение допустимой рабочей области и линий равного значения дохода (рис. 2) при номинальном значении субстрата S = 167 моль/л показывает, что точка *e*, характеризующая максимальное значение критерия, лежит вне области *a–b–c*. Поскольку множество допустимых режимов сбраживания выпукло, то существует либо одно оптимальное решение, когда линия равного значения дохода касается границы области по линии *a–c* (точка *f*), либо множество оптимальных решений, когда линия равного дохода пересекается с "субоптимальной" (рациональной) точкой *d*, расположенной внутри допустимой рабочей области. Положение точки *f* на плоскости управляющих воздействий может быть различным при постоянных значениях субстрата и микроорганизмов. Оно обусловливается соот-

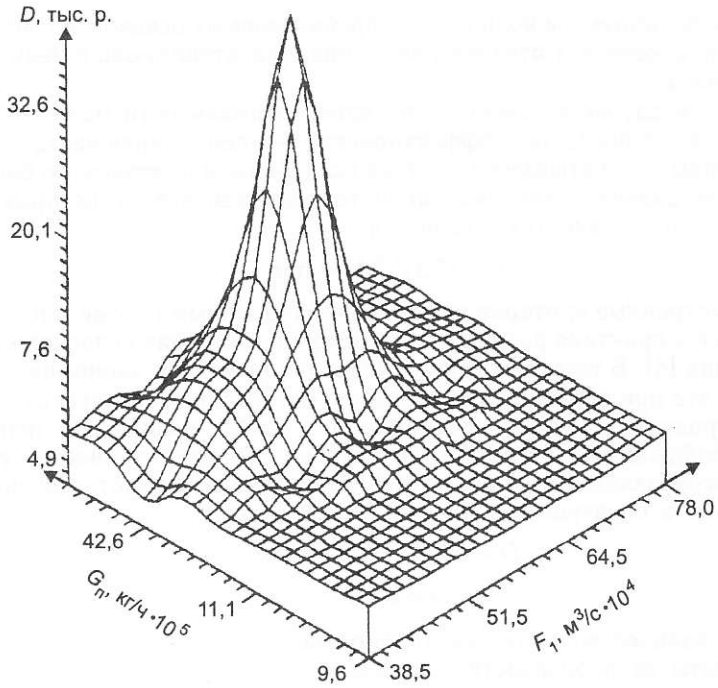


Рис. 1. Статическая поверхность по критерию оптимальности D при содержании субстрата в осадке S_0 = 167 моль/л

ношением цен $Ц_1$ и $Ц_2$, однако в любом случае она перемещается по линии $a'-c'$, т. е. по границе $CH_4 = (CH_4)_{зад}$. Предельным положениям оптимальной точки отвечают: справа — максимально возможная подача теплоносителя в метантенк; слева — допустимо низкое качество получаемого биогаза. Это подчеркивает в определенном смысле универсальность выбранного критерия. Абсцисса оптимальной точки сравнительно просто может быть определена из уравнения теплового баланса, а ордината — из уравнения материального баланса по субстрату [5]. Поэтому при конфигурации рабочей области по критерию "доход", показанной на рис. 1, затраты машинного времени сокращаются по сравнению с поиском оптимальной точки по известным методам оптимизации в десятки раз.

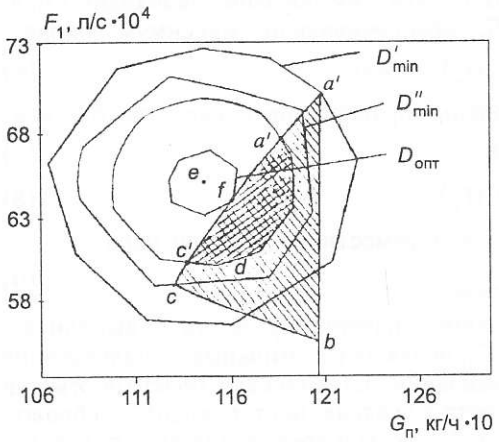


Рис. 2. Геометрическая интерпретация решения задачи оптимизации

Реализация алгоритма, построенного по упрощенной математической модели, требует минимального объема памяти компьютера и может быть осуществлена на УВМ малой мощности, в том числе в микропроцессорных контроллерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евстафьев К. Ю. Расчет и анализ статических характеристик процесса сбраживания осадков в метантенках/К. Ю. Евстафьев, А. А. Рульнов, Д. К. Юлдашева//Изв. вузов. Строительство.— 2005.— № 4.
2. Бертокс П. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений/П. Бертокс, Д. Радд.— М.: Мир, 1980.— 606 с.
3. Экологическая биотехнология/Под ред. К. Форстера и Д. Вейда.— Л.: Химия, 1990.— 384 с.
4. Найденко В. В. Оптимизация процессов очистки природных и сточных вод/В. В. Найденко, А. П. Куракова, П. А. Шеренков.— М.: Стройиздат, 1984.— 152 с.

5. Евстафьев К. Ю. Математическое описание процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод в метантенках/К. Ю. Евстафьев, А. А. Рульнов, Д. К. Юлдашева//Изв. вузов. Строительство.— 2005.— № 3.

© Евстафьев К. Ю., Рульнов А. А., Юлдашева Д. К., 2005

Получено 03.11.04

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 625.7.001

М. А. ЗАВЬЯЛОВ, канд. техн. наук; А. М. ЗАВЬЯЛОВ, д-р техн. наук, проф. (Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Предложен алгоритм, позволяющий оценивать энергетический баланс дорожного покрытия в рассматриваемый момент времени, исходя из начального уровня термодинамических потенциалов. В частности, учитывая кумуляцию внутренней энергии дорожным покрытием в результате его контакта с транспортным потоком, можно определять суммарное изменение энергетического баланса дорожного покрытия и назначать обоснованные сроки предстоящих ремонтов.

В классической термодинамике для исследования приращения энергии в различных системах наряду с другими методами применяется метод термодинамических потенциалов, предложенный Дж. В. Гиббсом [1]. Его сущность состоит в том, что для термодинамической системы подбираются такие функции состояния, изменение которых при вариации состояния системы адекватно линейной комбинации изменений отдельных ее параметров.

Под энергетическим балансом термодинамической системы будем понимать совокупность значений в рассматриваемый момент времени трех функций состояния, называемых характеристическими или термодинамическими потенциалами: E — энергия Гиббса; F — энергия Гельмгольца или свободная энергия; H — энтальпия.

Дорожное покрытие мы рассматриваем как термодинамическую, инженерно-геологическую систему, состояние которой характеризуется температурой T, давлением p, объемом V, внутренней энергией U и энтропией S.

Согласно первому началу термодинамики внутренняя энергия U определяется разностью между количеством теплоты Q, которую тело получает, и работой A, которую тело совершает (знак «−») или которая совершается над рассматриваемым телом (знак «+»):

$$U = Q \pm A. \tag{1}$$

Закон сохранения энергии, интерпретируемый формулой (1), имеет место при любых температурных и эксплуатационных режимах дорожного покрытия. Следовательно, часть кинетической энергии транспортного средства преобразуется при контакте с дорожным покрытием, в силу диссипативности системы «дорожное покрытие — транспортное средство», в тепловую энергию. Тепловая энергия, в свою очередь, реализуется во внутреннюю энергию дорожного покрытия и на совершение работы по деформации дорожной одежды.

С течением времени внутренняя энергия, растрачиваясь на упругопластичные восстановительные процессы, начинает убывать. И здесь, наряду с восстановительными процессами, интенсивностью и грузонапряженностью движения, значительное влияние на уменьшение запасов внутренней энергии оказывает перепад внешних температур.

Исходя из формулы [2]

$$H = U + pV \tag{2}$$

понижение внутренней энергии U ведет к уменьшению энтальпии H, допуская, что произведение pV — const.

Учитывая тот факт, что процессы старения асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог сопровождаются ростом его энтропии [2], можно заключить, что будут убывать как свободная энергия материала F, так и энергия Гиббса E, поскольку рассматриваемые величины связаны следующими зависимостями [2, 3]:

$$F = U - TS, \tag{3}$$

$$E = H - TS. \tag{4}$$

Из формул (2)–(4) следует, что

$$E = F + pV. \tag{5}$$

Формулу (1) с учетом диссипативности системы «дорожное покрытие — транспортное средство», запишем в виде

$$U = (1 + k)A, \tag{6}$$

где k — коэффициент диссипативности, равный

$$k = Q / A, \tag{7}$$

т. е. отношению количества теплоты Q к величине работы A, совершаемой над поверхностью покрытия в результате трения.

Коэффициент диссипативности k зависит от температуры окружающего воздуха и состояния асфальтобетонного покрытия, например, характеризующимся коэффициентом пластичности ξ, представляющим отношение полного прогиба конструкции ε при нагружении к упругому $\varepsilon_у$. Формально эту зависимость, которую необходимо установить экспериментально, запишем как

$$k = k(T, \xi). \tag{8}$$

Поэтому, в силу второго закона термодинамики $k < 1$, дополнительная внутренняя энергия, получаемая дорожным покрытием вследствие его контакта с транспортным средством всегда меньше той диссипативной работы, которую совершает над покрытием автомобильной дороги транспортное средство. По этой причине в процессе эксплуатации автомобильной дороги первоначальный уровень внутренней энергии покрытия постепенно иссякает, несмотря на регулярную «подпитку» со стороны транспортных средств и температурных колебаний, расходуясь на компенсационную работу по восстановлению упруго-вязкопластичных деформаций, возникающих опять же в результате контакта с транспортным средством и температурных колебаний.

Поскольку общую относительную деформацию можно представить в виде суммы

$$\varepsilon = \varepsilon_у + \varepsilon_{пл}, \tag{9}$$

где $\varepsilon_{пл}$ — пластическая (остаточная) деформация, выражение коэффициента пластичности приобретает вид

$$\xi = 1 + \varepsilon_{пл} / \varepsilon_у. \tag{10}$$

Учитывая тенденцию накопления остаточной пластической деформации, величину $\varepsilon_{пл}$ представим в виде частичной суммы числового ряда

$$\varepsilon_{пл} = 1 + \sum_{n=1}^{N} \frac{\alpha^n}{n!}, \tag{11}$$

где α определяется экспериментально;

n — число реализованных нагружений;

N — число выносливости или число нагружений материала до полного разрушения.

Затем, задаваясь согласно нормам ровности дорог тем или иным значением предела остаточной деформации на поверхности покрытия, например, 1,5 мм —

отличное, 3 и 5 мм соответственно хорошее и удовлетворительное состояние дорожной одежды [4], можно, используя ряд (11), определить соответствующее число нагружений. Ибо каждый член ряда представляет собой некоторую остаточную деформацию при m-м нагружении:

$$\varepsilon_m = \alpha^m / m!, \tag{12}$$

причем $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3 > \ldots > \varepsilon_n$, эти деформации, последовательно накладываясь, формируют полную остаточную деформацию $\varepsilon_{пл}$.

Также устанавливается и количество нагружений материала до полного разрушения, т. е. определяется число выносливости N, если известно значение $\varepsilon_{пл}^N$:

$$\Delta\varepsilon_{пл}^N = \varepsilon_{пл}^N - \varepsilon_{пл}^{n^*} = \sum_{n=n^*+1}^{N} \frac{\alpha^n}{n!}, \tag{13}$$

где n^* — известное число реализованных нагружений.

Величину N найдем, решив уравнение

$$\Delta\varepsilon_{пл}^N = \sum_{n=n^*+1}^{N} \frac{\alpha^n}{n!}. \tag{14}$$

Можно решить и обратную задачу: зная N, найти $\varepsilon_{пл}^N$.

Определим теперь величину внутренней энергии, которую дорожное покрытие кумулирует в результате контакта с транспортным потоком.

При стационарном движении модуль силового момента M, подводимого к ведущему колесу транспортного средства, можно определить по формуле

$$M = (G + F_{дин})a + F_{тр}R, \tag{15}$$

где G — сила тяжести транспортного средства, приходящаяся на данное колесо;
$F_{дин}$ — величина динамической силы, зависящей от скорости движения [5];
a — коэффициент сопротивления перекатыванию (трение качения);
$F_{тр}$ — сила трения колеса о поверхность асфальтобетонного покрытия;
R — радиус колеса.

Вводя коэффициент трения скольжения f, формулу (15) можно записать в другом виде:

$$M = (G + F_{дин})(a + f\,R). \tag{16}$$

Последнее уравнение и является условием стационарности движения.

Момент сопротивления перекатыванию ведомого колеса $\overline{M}$ определим соответственно как

$$\overline{M} = (G + F_{дин})a. \tag{17}$$

Поделив обе части уравнений (2) и (3) на радиус R и сложив частные от деления, получим

$$M/R + \overline{M}/R = (G + F_{дин})(2a/R + f). \tag{18}$$

Выражение, стоящее в правой части формулы (18), представляет собой суммарное сопротивление перекатыванию ведущего и ведомого колес.

Запишем удельную величину работы A_τ^*, которую производит эта сила в расчете на 1 м^2 асфальтобетонного покрытия в форме

$$A_\tau^* = (G + F_{дин})(a/R + f)\cdot 1\left(кДж/м^2\right). \tag{19}$$

При движении по автомобильной дороге с суточной интенсивностью q различных транспортных средств, характеризующихся различной массой, габаритами и меняющимися в течение суток физико-механическими параметрами дорожного покрытия, выражение A_τ — работы, производимой силами со-

противления перекатыванию транспортного средства в течение суток на 1 поточный метр дорожного покрытия, приобретает вид

$$A_{\tau} = \sum_{i=1}^{q} (G_i + F^i_{\text{дин}}) \left({2a_i}/{R_i} + f_i \right) j, \tag{20}$$

здесь i — некоторое транспортное средство; j — число пар ведущих и ведомых колес.

Зная величины математических ожиданий, входящих в формулу (20) величин и суточную интенсивность движения транспорта по данной автомобильной дороге $\tilde{q}$, запишем величину A_{τ} как

$$A_{\tau} = (\tilde{G} + \tilde{F}_{\text{дин}}) \tilde{q}\, \tilde{j} \left({\tilde{2}a}/{\tilde{R}} + \tilde{f} \right), \tag{21}$$

где $\tilde{G}$, $\tilde{F}_{\text{дин}}$, $\tilde{q}$, $\tilde{j}$, $\tilde{a}$, $\tilde{R}$, $\tilde{f}$ — математические ожидания соответствующих величин.

Произведение $(\tilde{G} + \tilde{F}_{\text{дин}}) \tilde{q}\, \tilde{j}$ представляет собой грузонапряженность транспортного потока. Эта величина является зависимой от интенсивности движения.

Соответственно работу сил, нормальных к поверхности асфальтобетонного покрытия A_n, определим в виде

$$A_n = (\tilde{G} + \tilde{F}_{\text{дин}}) \tilde{q}\, \tilde{j}\, \Delta\tilde{\varepsilon}, \tag{22}$$

$\Delta\tilde{\varepsilon}$ — математическое ожидание абсолютной деформации покрытия автомобильной дороги.

Величину работы A, совершаемую над дорожным покрытием транспортным потоком, с учетом динамических свойств можно записать как следующую скалярную сумму:

$$A = A_{\tau} + A_n = (\tilde{G} + \tilde{F}_{\text{дин}}) \tilde{q}\, \tilde{j} \left({\tilde{2}a}/{\tilde{R}} + \tilde{f} + \Delta\tilde{\varepsilon} \right). \tag{23}$$

В результате, величину внутренней энергии, получаемой дорожным покрытием от контакта с транспортным потоком, представим, используя формулы (6) и (23), в следующей форме:

$$U = (1 + k)(\tilde{G} + \tilde{F}_{\text{дин}}) \tilde{q}\, \tilde{j} \left({\tilde{2}a}/{\tilde{R}} + \tilde{f} + \Delta\tilde{\varepsilon} \right). \tag{24}$$

Полученная формула может быть использована при определении энергетического баланса дорожного покрытия. Она учитывает влияние одной из важнейших систем «дорожное покрытие — транспортное средство» на изменение внутренней энергии дорожного покрытия. В общем случае, зная энергетический баланс дорожного покрытия после завершения строительства, можно, оценив изменение термодинамических потенциалов, в частности, учитывая формулу (24), определить суммарное изменение энергетического баланса дорожного покрытия, а, следовательно, назначить обоснованные сроки предстоящих ремонтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика/Дж. В. Гиббс.— М.: Наука, 1982.— 584 с.
2. Завьялов М. А. Процесс устройства асфальтобетонного дорожного покрытия и метод термодинамических потенциалов Гиббса/М. А. Завьялов, А. М. Завьялов//Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.— 2004.— № 9.— 67 с.
3. Королев В. А. Термодинамика грунтов/В. А. Королев.— М.: Изд-во МГУ, 1997.— 168 с.
4. Смирнов А. В. Механика устойчивости и разрушений дорожных конструкций/А. В. Смирнов, А. А. Малышев, Ю. А. Агалаков.— Омск: Изд-во СибАДИ, 1997.— 91 с.
5. Завьялов М. А. Принцип обеспечения удобообрабатываемости асфальтобетонной смеси/М. А. Завьялов//Изв. вузов. Строительство.— 2003.— № 6.— С. 79—82.

© Завьялов М. А., Завьялов А. М., 2005

Получено 15.02.05

УДК 621.878.23

Ю. Ф. УСТИНОВ, д-р техн. наук, проф., **И. М. ТЕПЛЯКОВ**, канд. техн. наук, проф., **Ю. В. АВДЕЕВ, А. А. КОНОНОВ**, кандидаты техн. наук, доценты (Воронежский государственный архитектурно-строительный университет)

ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫМИ МАШИНАМИ

Рассмотрены способы автоматизации управления технологическими машинами строительного комплекса на примере землеройно-транспортных машин как с точки зрения интенсификации тягового режима, так и с точки зрения дистанционного радиоуправления. Намечены пути решения задачи определения местоположения землеройно-транспортной машины радиотехническими методами на плоскости или в пространстве.

Автоматизация управления технологическими машинами строительного комплекса является весьма актуальной проблемой, так как позволяет значительно повысить эффективность их использования при одновременном улучшении условий труда оператора. Рассмотрим возможные способы автоматизации управления на примере землеройно-транспортных машин (ЗТМ).

Вопросам автоматизации управления ЗТМ посвящено много теоретических и экспериментальных работ, выполненных как в России, так и за рубежом. Анализ литературы показывает, что основным направлением является интенсификация тягового режима ЗТМ с помощью систем управления, которые могут быть условно разделены на три группы.

К первой группе относятся системы стабилизации различных параметров (например, устройства получения заданного профиля обрабатываемой поверхности за счет стабилизации угла поперечного наклона ножа автогрейдера или контроля высотного положения отвала ЗТМ по копирному устройству), а также системы поддержания одного из косвенных параметров (частоты вращения выходного вала двигателя; силы тяги; скорости движения машины; буксования; усилия, действующего на отвал) на заданном уровне, который при определенных условиях соответствует максимуму тяговой мощности. К этой же группе могут быть отнесены комплексные системы стабилизации выходных параметров, которые при заданном качестве обрабатываемой поверхности позволяют максимальным образом использовать тяговые качества ЗТМ.

Ко второй группе относятся системы непрерывного поиска максимума какого-либо информационного параметра (например, тяговой мощности, определяемой по силе тяги и действительной скорости движения машины). Этой группе систем управления, как и некоторым системам из первой группы, присущи непрерывные колебательные перемещения рабочего органа.

Более совершенными с точки зрения получения хороших планирующих качеств устройствами управления являются системы непрерывного поиска экстремума с последующей его стабилизацией, относящиеся к третьей группе. В качестве информационных параметров в данных системах используются как первичные — сила тяги, действительная скорость движения машины, объем грунта перед отвалом [1], так и производные — тяговая мощность, мгновенная производительность. Эти системы также могут быть построены по принципу поиска экстремума производного информационного сигнала с последующим его запоминанием (так называемый «метод обучающей ходовой характеристики»). Данные системы могут работать совместно с устройствами первой группы, которые обеспечивают заданное качество обрабатываемой поверхности.

Однако интенсификация тягового режима — не единственное направление автоматизации ЗТМ. Не менее важным является развитие систем дистанционного радиоуправления. Для решения этой проблемы необходимо определиться с несколькими задачами: первоначальная из них — задача нахождения местоположения объекта радиотехническими методами на плоскости или в пространст-

ве, которая сводится к измерению геометрических величин, однозначно характеризующих искомое местоположение относительно заданной точки [2].

Используя известные свойства радиоволн, можно определить радиотехническими методами следующие геометрические величины: пеленг α_M подвижной точки M из фиксированной точки A; пеленг α_A фиксированной точки A из подвижной точки M; разность пеленгов $\alpha_р$ двух фиксированных точек A и B из подвижной точки M; расстояние R от подвижной точки до фиксированной; разность расстояний $R_р = R_1 - R_2$ от подвижной точки до двух фиксированных; сумму расстояний $R_с = R_1 + R_2$ от подвижной точки до двух фиксированных.

Различным значениям каждой из перечисленных геометрических величин соответствует семейство линий возможных местоположений объекта. В первом и во втором случаях линии положения представляют собой семейство радиальных прямых, в третьем — семейство окружностей, проходящих через две фиксированные точки, в четвертом — семейство концентрических окружностей, в пятом случае — семейство софокусных гипербол и в шестом — семейство софокусных эллипсов.

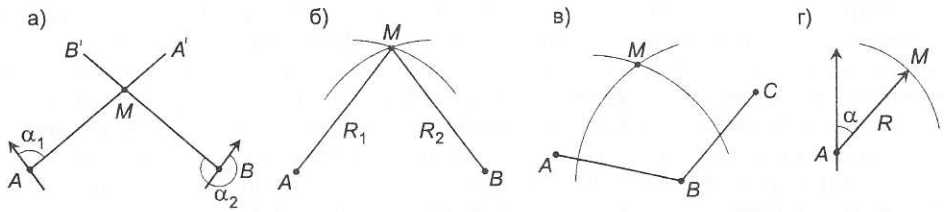
При определении местоположения на плоскости необходимо найти две пересекающиеся линии положения, для чего можно воспользоваться следующими методами [2]:

1) пеленгационный, при котором местоположение объекта определяется как точка пересечения двух прямых (рисунок, *а*);

2) дальномерный, при котором местоположение определяется как точка пересечения двух окружностей (рисунок, *б*);

3) разностно-дальномерный, при котором местоположение определяется как точка пересечения двух гипербол (рисунок, *в*);

4) дальномерно-пеленгационный, при котором местоположение определяется как точка пересечения прямой с окружностью (рисунок, *г*).



Определение местоположения объекта на плоскости

Таким образом, из рисунка следует, что однозначно определить местоположение объекта из одной точки можно, используя дальномерно-пеленгационный метод. Остальные методы требуют нескольких фиксированных точек, которые должны быть разнесены на расстояния, соизмеримые с расстоянием от каждой из них до объекта. В противном случае будут возникать недопустимо большие ошибки местоположения.

Для выполнения навигационных измерений радиотехническими методами подлежащая измерению навигационная величина (например, направление, расстояние, скорость) должна быть связана с одним из параметров электромагнитного поля. Такая связь может устанавливаться непосредственно с любым из четырех параметров распространяющейся радиоволны:

1) амплитудой колебаний E;

2) фазой колебаний φ;

3) частотой колебаний ω;

4) временем распространения t.

Обнаружение и извлечение навигационной информации из радиосигналов осуществляется путем измерений того параметра принятого сигнала, который содержит навигационное сообщение. На этом основании все имеющиеся в настоящее время радионавигационные средства можно разделить на четыре основных вида по признаку того параметра электромагнитного поля, который положен в основу навигационных измерений. Это — амплитудные, фазовые, частотные и временные радионавигационные устройства и системы.

Каждому виду радионавигационных средств свойственны общие научно-технические принципы построения, методы навигационных измерений и типы измерительных устройств, с помощью которых измеряются навигационные величины [3].

Выводы. Наиболее совершенными устройствами управления являются системы непрерывного поиска экстремума с последующей его стабилизацией, использующие как первичные, так и производные информационные параметры.

Единственным методом, позволяющим однозначно определить местоположение объекта из одной точки, является дальномерно-пеленгационный метод. Все остальные методы требуют нескольких фиксированных точек (две, три или четыре), которые должны быть разнесены на расстояния, соизмеримые с расстоянием от каждой из них до объекта. В противном случае будут возникать недопустимо большие ошибки местоположения.

Выбор варианта технической реализации радионавигационных устройств должен определяться в соответствии с областью и условиями использования ЗТМ (например, обычная ЗТМ или ЗТМ, работающая в условиях крайне низких температур, большой загазованности и так далее).

Проведенные исследования показывают, что проблема повышения эффективности использования ЗТМ является вполне разрешимой в случае одновременного использования систем автоматического управления рабочим органом и дистанционного радиоуправления машиной.

Такой подход также позволит не только значительно повысить техническую производительность ЗТМ, но и уберечь оператора от работы в опасных для жизни или вредных для здоровья условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононов А. А. Экспериментальное определение уровня опорных сигналов для системы автоматического управления рабочим органом автогрейдера/А. А. Кононов//Изв. вузов. Строительство.— 2000.— № 7–8.— С. 99–101.
2. Сайбаль А. Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения/А. Г. Сайбаль.— М.: Оборониздат, 1958.— 154 с.
3. Астафьев Г. П. Радиотехнические средства навигации летательных аппаратов/Г. П. Астафьев, В. С. Шебшевич, Ю. А. Юрков.— М.: Сов. радио, 1966.— 241 с.

© Устинов Ю. Ф., Тепляков И. М., Авдеев Ю. В., Кононов А. А., 2005

Получено после доработки 19.01.05

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 711.4.03 (571.1)

Л. Н. ВОЛЬСКАЯ, д-р архит., проф., М. В. СКУДНЕВА, асп. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет)

О КУЛЬТУРНОМ ЛАНДШАФТЕ ИСТОРИЧЕСКИХ ГОРОДОВ СИБИРИ

В статье дается определение термина — культурный ландшафт, выявляется значимость культурного ландшафта в градостроительной культуре сибирского города, рассматриваются основные этапы формирования и развития культурного ландшафта исторического сибирского города, сложившегося под воздействием социально-экономических, историко-культурных и архитектурно-градостроительных факторов.

Культурный ландшафт сибирского исторического города непосредственно связан с антропогенной деятельностью. Начиная с XVI в. и до настоящего времени, он прошел несколько этапов развития, зависящих от социально-экономических, общественно-политических, архитектурно-градостроительных и других факторов.

Термин — культурный ландшафт характеризует континуальную корреляцию антропогенного ландшафта с элементами природного как окружающего поселения, так и расположенного на их территории в исторические периоды развития природы и общества.

Анализ развития культурного ландшафта, являющегося неразрывной частью среды поселения, показывает его эволюцию в различные исторические периоды и связь как с элементами природного ландшафта, окружающих поселения, так и с находящимися на их территории.

Корреляция исторического поселения (зимовья, острожки, остроги) и природного ландшафта в XVI–XVII вв. (времени пионерного освоения Сибири) была синкретной, но далее уже в XVIII в. с образованием территориально более крупных поселений, а также ростом ранее существующих (крепости, города) взаимосвязь культурного ландшафта с природным нарушается, что приводит к дискретности этих составляющих, ранее представляющих единое гармоничное целое.

В определенную историческую эпоху существования древних городов Сибири были и есть важнейшие зоны (жилая, общественная, промышленная и т.д.), анализ эволюции которых позволяет представить тенденцию генезиса и развития.

Генезис сибирских городов XVII–XVIII вв. шел своим путем, опаздывая в своем историко-культурном развитии от городов Европейской части России. Несомненно, этот факт отразился на создании своеобразной и неповторимой архитектурно-градостроительной сибирской культуры, что уже в начале XIX века отмечалось зарубежными путешественниками, впервые посетившими этот край.

Исторические этапы развития сибирского города формировали свои культурные ландшафты (гг. Томск, Омск, Барнаул), отражающие особенности каждого из них, в организации которых принимали участие как элементы природного ландшафта, так и элементы антропогенной деятельности, создаваемые определёнными типами застройки, функционированием зданий, организующих пространство, неординарными приемами в градостроительной культуре.

В результате жизнедеятельности людей, направленной на создание комфортного пространства для жизни, на определенном историческом витке каждого исторического сибирского города складывались свои морфотипы застройки: жилой, общественной, промышленной и других зон, зависящих и от природных факторов (рельефа, реки, растительности), и от социально-экономического статуса, влияющих на их развитие.

Первый период формирования культурного ландшафта поселений Сибири связан с XVI–XVII вв., когда на небольших территориях создавались поселения — остроги, крепости. Ограниченность площади, занимаемой ими, создавала свое уютное жизненное пространство. Этот период характеризуется морфотипами застройки, в дальнейшем исчезающими на территории поселений (казнохранилища — хранилища «рухляди» — меха, денег; приказная палата; воеводский двор и пр.). Однако он отмечен органичной связью природного ландшафта с антропогенным и акцентированием элементов первого в пространстве.

Характерной особенностью архитектурно-градостроительной культуры этого периода является гармоничное соотношение элементов застройки по отношению к среде как внутреннего, так и внешнего пространства.

Сибирский город XVI–XVII вв. имел небольшие размеры, природа окружавшая его была доступна относительно любой точки городского пространства, культурный ландшафт представлял собой неурбанизированную среду. Все же сведения об этом периоде скудны, и представление можно составить лишь по рисункам С. Ремезова и литературно-архивным описаниям, в связи с исчезновением первых поселений, строящихся целиком из местного строительного материала — дерева и часто подвергавшихся пожарам.

Второй период развития культурного ландшафта — XVIII в., представляет собой большее разнообразие морфотипов застройки в связи с развитием экономики края и ростом городских поселений. Территориальный рост, социально-экономический статус поселений в XVIII в., так же как и культурный ланд-

шафт городов Сибири, этого периода различны. На смену бережному отношению к природе приходит превосходство человека над природой, в градостроительстве это связано с созданием регулярных генеральных планов, составление которых велось без учета морфологии местности, вытеснением лесных массивов за пределы города (гг. Томск, Барнаул, Змеиногорск). Города Сибири в этот период являются слабоурбанизированными поселениями, различаясь между собой планировочной структурой, наличием функциональных зон, иерархией застройки в зависимости от экономического развития (гг. Тюмень, Тобольск, Томск, Омск, Барнаул и др.).

Возникнув на эстетико-рациональных принципах градообразования, сибирские города XVIII в. вобрали и лучшие традиции русского деревянного зодчества и местного, этнического населения, создав лучшие образцы жилого, массового строительства в посадах и слободах. На протяжении XVIII в. изменения происходили как в планировке древних городов Сибири, так и в архитектурно-композиционном аспекте, так как во второй половине XVIII в. в гг. Тюмени, Тобольске, Томске, а затем в Омске, Барнауле появляются значимые вертикали храмов, монастырей, играющих роль доминант в образовании городского силуэта. Этот период был знаменательным в создании культурного ландшафта городов.

Наряду с массовой застройкой, возводились строения из камня, представляющие собой в большинстве неординарные образцы сибирской архитектуры (кремль г. Тобольске, Троицкий монастырь в г. Тюмени и др.).

Основными принципами создания градостроительной культуры являлись: упорядоченность квартальной планировки городов, строительство монастырей — очагов «духовной культуры», компактность среды и ее функциональность.

Третий период. Значительные изменения в формировании культурного городского ландшафта Сибири происходят в XIX в. — времени активного капиталистического развития региона, повлиявшего как на функциональную направленность деятельности поселений, так и на их градостроительную иерархию. Исторические города, такие как, например, г. Омск, формировавшиеся как укрепления-фортификации, с соответствующей застройкой, носящей строго регламентированный характер, или как города-заводы Барнаул, Змеиногорск и другие, где преобладающей функцией была промышленная, отличались своим культурным ландшафтом. Однако, в целом, эти города имели слабоурбанизированный ландшафт в начале XIX в., изменения произошли уже во второй половине XIX в. и его конце.

В этот период значительно меняется структура городов, застройка их ведется строго по генеральным планам, регламентировавших морфотипы застройки. Создание урбанизированной среды приводит к изменению и в городском ландшафте. Основными принципами в градостроительной культуре являлись: функциональное зонирование территории, создание четкого каркаса города, повышение этажности застройки, создание площадей с масштабными, значительными сооружениями и упорядочение застройки в историческом центре городов.

Четвертый период в формировании культурного ландшафта городов Западной Сибири относится к XX — началу XXI в.— периоду социализма и началу нового отношения к историко-культурному наследию.

В период социализма в развитии культурного ландшафта произошли коренные изменения в связи с новым подходом к реконструкции и созданию новых районов и городов. Период Великой Отечественной войны повлиял на значительный рост таких городов, как Новосибирск, Омск, Бийск благодаря созданию крупных промышленных зон предприятий, переведенных из европейской части России. Размещение промышленных зон не всегда соответствует общему направлению развития городской территории: протяженные транспортные коммуникации, появившиеся в связи с переводом промышленности на свободные от застройки территории, привели к возникновению расчлененной планировочной структуры.

В послевоенный период, а главное в 60–70-е годы XX в. активно развивается селитебная зона с микрорайонами, насыщенными разнообразными современными морфотипами застройки, малыми формами, озеленением. Возникает

культурный городской ландшафт, характерный для этого времени, с созданием относительной комфортности для населения путем образования зон обслуживания жителей микрорайонов, городских озелененных пространств, рекреационных зон.

Правительство СССР уделяло значительное внимание сохранению историко-архитектурного наследия, расположенного в исторических центрах городов. На отношение к историческому наследию сыграли большую роль Венецианская и Вашингтонская хартии 60–80-х годов XX в., когда к проблеме охраны и изучения историко-архитектурного наследия обратились ученые и архитекторы-практики из разных стран, выработавшие единую концепцию по консервации и реставрации памятников и достопримечательных мест (1964 г.), а затем по охране исторических городов (Вашингтон, 1987 г.).

Конец XX — начало XXI в. в городах Западной Сибири характерен негативным отношением к памятникам деревянного зодчества в исторических зонах. Внезапные пожары, рекомендации переноса деревянных зданий в определенные зоны города, как, например, в гг. Томске, Новосибирске, приводят к бесследному исчезновению шедевров деревянной архитектуры конца XIX — начала XX в. Так началась новая эпоха в формировании культурного ландшафта, но градостроительная культура всегда опирается на исторически накопленный опыт и, несмотря на временные трудности и поиски, всегда идет вперед, формируя новое на основе традиций и преемственности.

© Вольская Л. Н., Скуднева М. В., 2005

Получено после доработки 15.02.05

УДК 72.01(571.1)

Д. В. КАРЕЛИН, асп. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

ДЕРЕВЯННОЕ ЗОДЧЕСТВО ГОРОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ КОНЦА XVIII — ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XIX В.

Рассматривается историческая значимость жилого деревянного дома городской застройки, декоративность, модульность бревенчатых конструкций как основного строительного материала, их взаимосвязь с природно-климатическими условиями. Проанализированы типология застройки селитебной зоны городских территорий, выбор декора в оформлении деревянного жилища.

Жилая застройка, ее типы, деревянная резьба в городах Западной Сибири является самобытным явлением в деревянном зодчестве. Характерным для жилья сибирских городов XVIII — начала XIX в. является его связь с традициями возведения жилища из дерева в северо-западных областях России, откуда прибывали в Сибирь первые поселенцы. Эта преемственность восходит к более древним временам строительства жилища еще древними славянами.

Дом — мельчайшая частица, неделимый атом древнего общества, в соответствии с языческой религией, был весь пронизан магическо-заклинательной символикой, с помощью которой семья каждого славянина стремилась обеспечить себе сытость и тепло, безопасность и здоровье [1]. Семантико-семиотическое значение и смысл отдельных элементов жилого дома можно проследить при исследовании сохранившихся деревянных жилых домов в Западной и Восточной Сибири как уникальных памятников деревянного зодчества, так и в массовой застройке.

Этнографы зафиксировали множество обрядов и поверий, связанных с постройкой дома, для строительства которого выбирались особые деревья, не "стоеросовые".

В силу определенных историко-экономических и политических условий деревянное зодчество на территории исторических городов Западной Сибири (гг. Томск, Тобольск, Тюмень и др.) до конца XX в. сохранилось довольно хорошо, что позволяет судить об архитектурно-планировочной системе жилого

дома, связи его с космогоническими представлениями и о семантике деревянных узоров причелен, "полотенец", наличников, крыше дома (коньков).

Жилье русскому человеку представлялось крепостью, защищающей своего обитателя от различных мистических существ, поэтому на каждом этапе его возведения и каждом элементе присутствовала целая система обрядов, надолго сохранившаяся в традициях при строительстве.

Габариты жилого деревянного дома в Европейской части России в плане составляли 6×6,6×9 м и т.д., где в качестве модуля служило само бревно. Объем дома — это близкая к кубу геометрическая форма, в плане имеющая квадрат, поделенный в соответствии с магическими обрядом на четыре части. Каждая грань куба в зависимости от ориентации по сторонам света имеет свою интерпретацию, выполняя функцию оберега. Четыре вертикальные оберегали своих обитателей от направленных воздействий космических сил (ветра, повышенной инфильтрации, продуваемости). Верхняя и нижняя горизонтальные поверхности соответственно оберегали верх и низ жилища. Зоны поделенного квадрата наделялись определенной функцией, нарушение которой могло повлечь негативные воздействия "злых сил". При этом вся "защитная" функция ложилась на орнамент жилого дома и внутреннюю обстановку помещений (защита углов, стен и т.д.)

На протяжении XVIII–XIX вв. в городах Западной Сибири превалировала деревянная застройка жилых образований, более лаконично оформленная резьбой на периферии и представлявшая собой изощренные образцы декоративной резьбы, украшающих собой дома в центральных частях города (гг. Томск, Тобольск и др.). Сибирские градостроители умело размещали застройку в окружающей природной среде, сохраняя эстетическую взаимосвязь с природой (рекой, рельефом, растительностью) и создавая комфортные для той эпохи условия проживания.

К сожалению, первые жилые деревянные дома, возведенные на территории сибирских крепостей, острогов, посадов в XVII — начале XVIII в., не сохранились из-за частых, бесконечных пожаров, но остались жилые дома более поздних времен в древних слободах сибирских городов ("Татарская слобода" в Томске, "Ямская слобода" в Тюмени).

Жилое деревянное зодчество дошло до нашего времени в виде усадебной застройки, наиболее хорошо сохранившись в малых исторических городах, мало подвергнутых реконструкции.

Жилая зона представляла собой систему усадебной застройки, располагавшейся в небольших по площади кварталах — от 1,5 до 2 га. Кварталы были рассчитаны на одно-двухэтажную усадебную застройку полусельского типа с размещением в глубине участка хозяйственных построек и огорода. Усадебная площадь составляла от 1200 до 2000 м^2.

Еще и сейчас в старых городских кварталах можно найти примеры такой застройки, когда на улицу был обращен фасад жилого дома и глухой торец амбара, а между ними располагались ворота с калиткой. Жилой дом был деревянный, а сарай и ворота — каменные, скорее всего, первоначально они были деревянные, а со временем из-за ветхости были заменены каменными.

Площадь застройки в малых городах Сибири на участках равнялась всего 15–18%, т. е. на усадьбе возводились 1–2 строения с жилой площадью в среднем 35 м^2. Большие города отличались большей компактностью. Плотность населения в селитебной части городов была низкой — не превышала 50 человек на 1 га. Следует отметить, что на периферии городских поселений площадь участков была больше, так как была развита огородная часть. Однако со временем, в процессе развития городской жизни характер кварталов изменяется, особенно в центральной части города, где происходит концентрация коммерческой застройки, построек зрелищного характера, ресторанов, культовых сооружений, административных и учебных заведений, а также доходных жилых домов и городских особняков. Такой процесс был характерен для больших городов. Стирается уже четкое разделение кварталов на отдельные участки, они плотно застраиваются по периметру; для разделения примыкающих друг к другу деревянных домов сооружаются кирпичные или каменные брандмауэрные стены [2].

Центральные части селитебной зоны городов первоначально представляли единый фронт застройки — "сплошную фасаду". Тобольск — первый город Сибири, сломавший такой способ посадки зданий.

Периферийные части из-за большей площади имели широкие "прозоры" между домами, что нередко уберегало жилье от пожаров, которые были довольно частыми.

В городском деревянном доме конца XVIII — начала XIX в. уже устраиваются входы с улицы — «парадные». Дома нередко возводятся с первым каменным этажом и вторым деревянным. Резко повышается процент застройки в центральных районах городов — до 50–60%. Внутри таких кварталов сосредоточиваются хозяйственные постройки, конюшни, сооружения для хранения сырья и продуктов, кустарные мастерские и заведения. Создавая крайнюю затесненность внутриквартального пространства, эти строения подразделяли его на отдельные «городские» дворы, лишенные зеленых насаждений.

Жилые деревянные дома обращают на себя внимание определенными пропорциональными закономерностями как отдельных частей, так и целого, выработанного многовековым народным опытом. Так, например, угловые и рядовые простенки чаще всего делали одинаковыми с шириной, близкой ширине проема. Наряду с этим также встречалось отношение ширины простенка и проема как стороны квадрата к его диагонали. Пропорции окон 1:1, 1:1,5 и 1:2,2. Более вытянутые окна применяли в верхних этажах (за исключением мезонинов).

Во второй половине XVIII в. в городском жилье Западной Сибири, начиная с Тобольской губернии и заканчивая Алтайским краем, постепенно складываются местные планировочные и композиционные приемы. Хозяйственный "подклет" нередко превращается в кухню или нижнее жилье. Чердачное помещение все более выделяется в композиции фасада.

В начале XIX в. в городах Западной Сибири в связи с развивающейся экономикой края, торговой деятельностью купцов появляются каменные дома, но господствующей застройкой остается деревянная. В этот период строятся одно-двухэтажные дома из очень крупных бревен, без обшивки с удлиненными вверх окнами и квадратами нижних этажей. Появляются дома, построенные из камня и дерева: первый этаж выполнен из кирпича, второй этаж — деревянные конструкции.

Постепенно появляются новые приемы композиций, изменяющие облик жилого дома.

Дворовые фасады становятся живописнее: к основному объему здания примыкают сени, перекрытия на два ската, к сеням примыкает крыльцо. Наличники завершаются карнизом и уступчатым парапетом. Иногда завершения наличника имитируют формы каменных зданий, лучковые или треугольные фронтоны, сандрики с кронштейнами.

В последующие годы XIX столетия традиционный тип жилого деревянного дома изменился в своей основе, преобразовавшись в многоквартирный дом, однако приемы народного декора долго еще сохраняли свой строй и характер в композиции новых сооружений.

На периферии некоторых городских поселений деревянный дом сохранился как образец этнической постройки ("Татарская слобода" — в г. Томске, "Ямская слобода" — в Тюмени).

Роль жилого Сибирского дома, прежде всего,— защита от лютых морозов зимой, комфортное проживание в летний период. Постепенно акцент делается на декоративное решение главного фасада жилого дома.

Бревна для строительства жилищ заготавливали зимой, их искали в "хребте" (на возвышенностях рельефа), складывали бревна в "костры", а в марте, апреле их "окаривали", "шкурили", т. е. снимали с них кору. В строительстве использовали преимущественно сосну кедровую (Западная Сибирь, Алтай), пихту (Алтай), березу (Бараба), лиственницу (Нарш). Лиственница имеет плотную структуру (дранье) для покрытия, делали окладные венцы — "листвяги", "стулья" под срубы, верей для ворот, водотоки на крышах [6].

Сруб дома начинали делать (рубить) весной (в великий пост), в новолуние и готовили до "троицы".

До середины XIX в. (в старожильческий период) "в ходу" были бревна диаметром в 33–50 см, и сруб содержал 9–12 венцов. При диаметре до 30 см сруб имел 12–15 венцов. Отметим, что диаметр бревна в деревянном зодчестве являлся своеобразным модулем, это можно заметить в жилом строительстве как в культовом, так и в общественном.

Сруб начинали собирать из окладных венцов, соединяя бревна в углах в обло. На пяти-шести венцах сруба устраивали "переводы" для пола (балки), которые врубали в сруб в "полдерева" или насквозь. Пол "набирали" из половинок бревен (расколотых по длине) округлостью вниз. Следующее бревно сруба укладывалось на венец, на стес которого опирался накат пола, и такой пол уже нельзя было перебрать, не разобрав стены. Матицы-переводы под одинарные полы укладывались поперек от входа в избу. Оконные проемы начинали вырубать на 8–9 венце сруба. Ставни делались из одной (двух) тесовой доски в одно полотно. Рамы не открывались и были с мелкими переплетами [3].

Срубы деревянных зданий, возведенные из круглых бревен, чаще оставались открытыми. Они прекрасно сохранялись в течение нескольких веков, что можно отметить в древних сибирских городах: Тобольске, Томске и других. Обработанные бревна, плотно подогнанные в срубную конструкцию стены, имели свойственную древесине хорошо выраженную пластику и красивый бархатисто-коричневый или серебристо-серый цвет. Реже применялась «ошалевка» срубов, т. е. их обшивка тесом (доской) для утепления или из эстетических соображений в подражание каменным постройкам.

Сопряжение бревен в углах срубов было двух типов: «в обло» и «в лапу». Соединение «в обло» (с остатком) — наиболее древнее на Руси было широко распространено и в сибирском народном зодчестве. Соединение красивое по форме, четко фиксирующее угол сооружения светотенью, прочное в конструктивном отношении. Соединение «в лапу» также давно известно русским народным мастерам. Оно экономичнее по расходу материала, но менее выразительно по характеру бревенчатой конструкции. Это соединение плотники применяли, желая приблизить сруб здания по характеру формообразования к каменному городскому дому.

Двускатное покрытие жилого дома является наиболее традиционным, оно восходит еще к древней Руси. Наиболее устойчивой деталью декора фронтона при двускатном покрытии кровли на стропилах являются фронтонные доски, закрывающие контуры стен на свесе крыши. Они выполняли и декоративную роль, унаследованную от древних причелин. Фронтонные доски на домах преимущественно были составного сечения, т. е. состояли из двух досок, наложенных одна на другую, что, по-видимому, свидетельствовало об их связи с прежними причелинами [4].

На территории поселении Западной Сибири конца XVIII в. широко были распространены два типа жилища: 1) изба-клеть; 2) изба со связью.

Изба-клеть — это один из первых типов планировочной структуры жилого деревянного дома, получившего наибольшее распространение на первоначальном этапе формирования таких городов, как Тобольск, Томск, Барнаул.

Ряд венцов, образуя сруб с полом, потолком, дверьми и окнами, дает клеть. Планировочная структура избы-клети сводится к расположению в задней части дома "задца" входа, обычно ориентированного строго на север, и жилого помещения, ориентированного на юг, где лицевая часть является главным фасадом. Функциональная планировка такой избы проста и целесообразна. Одно помещение служило кухней и горницей. В плане представляла собой четырехугольник, близкий к квадрату. Печь обычно занимала большую часть объема избы. Расположенная у входа в избу она образовывала своей боковой стороной небольшой коридор — "переднею". Статичность объема, завершенного двухскатной крышей с бревенчатым фронтоном, идеально вписывается двумя окнами средних размеров по лицевому фасаду. Единственной выразительной деталью фасада и в то же время простыми по форме являлись выпуски верхних бревен — повалы.

Клети конца XVIII — начала XIX в. сохранили свой монументальный вид, рубились из бревен большого диаметра, самцовым фронтоном и большим выносом слег. Окна с одностворными ставнями имели небольшие разме-

ры 30×60, 60×70, тем самым подчеркивая суровость и замкнутость внешнего облика жилища.

Изба со связью — это конструктивное соединение двух клетей, происходившее за счет выпуска продольных бревен одного из срубов, примыкавшего впритык к торцам другого сруба. Щелевые отверстия, образованные при соединении, заделывались с внутренней стороны помещения тесом. При устройстве входа с улицы второй вход вел в крытый двор.

К середине XIX в. местные власти по указу кабинета, согласно "образцовым" проектам, запрещали смещать окна с оси симметрии фасадов. В тот период увеличивается число окон и их размеры. Количество окон составляло по главному фасаду 3–5, а их габариты (0,9–1,35)×(1,4–1,85) м. Появляются наличники по всему контуру оконного проема с развитым карнизом и подоконником, украшаемые первыми элементами деревянного зодчества — деревянной резьбой. Резьба представляла собой вид солнечной полурозетки и ромба.

Традиции деревянного зодчества поселения Западной Сибири в дальнейшем пролонгировались во второй половине XIX — начале XX в.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбаков Б. А. Язычество древней Руси/Б. А. Рыбаков.— М., 1988.— 798 с.
2. Ремезов С. У. Чертежная книга Сибири/С. У. Ремезов.— СПб, Тобольск, 1884.— 28 с.
3. Баландин С. Н. История архитектуры русских земледельческих поселений в Сибири (XVII–XIX вв.)/С. Н. Баландин.— Новосибирск: НИСИ, 1984.— 67 с.
4. Крячков А. Д. Материалы по истории русского зодчества в Сибири/А. Д. Крячков.— Томск, 1920.
5. Архитектурная энциклопедия.— СПб., 1906.
6. ЦГИАЛ; Фонд 1293; Оп 74-а; ед, хр. 1009.— Л. 3.

© Карелин Д. В., 2005

Получено 18.01.05

УДК 725.4 (09)

Е. Б. МОРОЗОВА, канд. арх., доц. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск)

СМЕНА ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ФАКТОРОВ КАК УСЛОВИЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ

В исторической ретроспективе рассматривается динамика развития формообразующих факторов, чье постоянное взаимодействие обеспечивает изменение объемно-планировочной организации объектов промышленной архитектуры, появление и трансформацию их типов.

Более чем трехсотлетний период существования промышленной архитектуры создает достаточную базу для исследования исторических закономерностей и устойчивых тенденций ее развития на обширном пространственном и временном поле. Проведение такого исследования, с одной стороны, даст возможность дополнить теорию архитектуры сведениями о процессах становления, месте и роли промышленной архитектуры. С другой стороны, это позволит научно обосновать пути ее будущего движения, определить типы объектов и принципы их пространственной организации на ближайшую и отдаленную перспективу.

В этой связи важным аспектом становится выявление динамики развития формообразующих факторов, чье постоянное взаимодействие обеспечивает изменение объемно-планировочной структуры объектов промышленной архитектуры, появление и трансформацию их типов. Какими были, как менялись сами факторы в разные временные периоды, было ли их влияние одинаковым и можно ли определить какую-либо закономерность в их развитии — ответы на эти вопросы формируют тот необходимый материал, который, возможно, позволит предположить, что же будет с промышленной архитектурой завтра.

Выделение факторов всегда является в некоторой степени условным и может основываться на различных подходах, учитывающих технические, социальные, экономические и др. характеристики временного периода и самого объекта исследования. Если исходить из того, что особенностью промышленной архитектуры является присутствие в ее объектах двух систем — машины и человека, соотношение которых варьируется в зависимости от функционального назначения объекта и уровня развития технических составляющих промышленного производства, то существующее многообразие факторов может быть разделено на два больших блока. Первый — это факторы, связанные с системой машины: технологические и технические факторы (технология производства и организация процесса, используемое оборудование и транспорт, источники используемой энергии и способ ее передачи, материалы, конструкции и технологии строительства); и второй — факторы, обусловливающие присутствие в промышленных объектах человека, факторы места и времени возведения (природно-климатические и градостроительные условия; скорость строительства и длительность эксплуатации; эстетические воззрения общества), факторы внутренней среды (условия труда для работающего и организация производственной среды).

В первый период развития промышленной архитектуры (1700–1840-е гг.) определяющим было влияние факторов, связанных с системой машины, что вполне объяснимо, поскольку именно эта система обусловила появление промышленной архитектуры.

Среди основных следует выделить источник энергии (последовательное введение энергии воды и пара) и способ ее передачи (шафтовая система). Использование энергии воды в промышленном производстве началось с 1700-х гг. Получаемая мощность (от 10 до 150 л. с.) зависела от силы водяного потока и от конструкции водяного колеса, которое развивалось от простого, использующего энергию бегущего либо падающего потока, до сложной водяной турбины. Внушительные размеры колес (например, колесо на железоделательном заводе Cyfarthfa в Южном Уэльсе Англии имело диаметр 50ft, ширину 6ft, весило 100 т, с каждой стороны его дополнительно были расположены два колеса диаметром 25ft) и установка непосредственно в нижнем этаже здания должны были учитываться в объемно-планировочной организации последнего [1]. Кроме того, требовалась локализация зданий на берегу реки или специально построенного канала, сами здания как бы перегораживали русло либо касались его.

Энергия пара в промышленном производстве стала применяться с 1770–80-х гг. Расположение паровой машины предусматривалось в центральной части нижнего этажа здания для наиболее эффективного распределения энергии, что в свою очередь учитывалось в организации пространственной структуры. Паровая энергия способствовала увеличению числа станков, их мощности, а значит, размеров и веса и потому инициировала разработки строительных конструкций большей несущей способности [2]. Была ликвидирована зависимость размещения фабрик у воды, однако в целом использование паровой энергии вместо гидравлической не изменило подходы к архитектурно-планировочному построению зданий. Оба источника энергии давали к концу первого периода развития промышленной архитектуры практически равную производительность, поскольку эффективность водяных колес достигла к этому времени своего пика, а эффективность паровых машин еще только начинала наращиваться [3].

Наибольшее воздействие на организацию внутреннего пространства промышленных зданий оказала шафтовая (shaft) система передачи энергии, запатентованная англичанином Arkwright и существовавшая как единственная до 1860-х гг. [1]. Эта система основывалась на обязательной связи источника энергии со всеми этажами здания и хорошо работала в вертикальном направлении, что определило появление в промышленной архитектуре сразу же многоэтажных (5–8 этажей) зданий с ярусным построением внутреннего пространства и формирование их как самостоятельного типа. Большие потери энергии (от одной трети в начале существования шафтовой системы до одной пятой — на завершающем этапе ее применения) и невозможность передавать энергию горизонтально далее, чем на 100ft, обусловили строительство относительно узких зданий небольшой длины. Шафтовая система требовала мощной

поддержки, которая обеспечивалась несущими конструкциями здания, находившимися в тесной связи с используемым оборудованием [4].

С 1770-х гг. чугун как новый строительный материал стал заменять деревянные конструкции во внутреннем каркасе. Основная причина его внедрения заключалась не в стремлении получить большие безопорные пространства, которые тогда при ограниченных размерах зданий не требовались, а в стремлении сделать здания менее уязвимыми для огня [5]. Новые материалы и система внутреннего каркаса были новыми не только для промышленной архитектуры, хотя именно здесь они находили наиболее широкое применение. В то же время их влияние не было революционным, поскольку при переходе к ним промышленные постройки не изменили свой внешний вид и внутреннее устройство.

Что же касалось факторов, связанных с присутствием человека, то их влияние практически не отмечалось, а там, где все-таки имело место, было опосредованным технологическими факторами. Так, строительство первых фабрик в сельской местности на берегах рек и каналов делало ненужным учет градостроительной ситуации, поскольку не здание встраивалось в планировочную структуру поселения, а поселение развивалось вокруг него. Первый ярус здания, где располагались водяные колеса, строился с учетом естественных характеристик реки, однако это было как бы вторичным, поскольку первичными были технические требования установки водяных колес, при которых русло реки или канала приспосабливалось под процесс.

Природно-климатические факторы и связанные с этим условия труда не принимались во внимание, здания не отапливались, не имели никаких помещений для рабочих, в том числе и санитарных узлов, хотя сами здания были многоэтажными и значительными по размерам. Некоторое влияние одного из факторов внутренней среды — освещения, в основном естественного в то время, отчасти имело место в определении ширины фабричного корпуса и высоты этажа. Однако все же главным здесь были возможности шафтовой системы передачи энергии и мощности водяного колеса.

Эстетические воззрения общества никак не отражались на промышленных постройках, которые были исключительно утилитарными и еще только завоевывали свое место среди объектов архитектуры. Следует отметить, что к концу рассматриваемого периода промышленные здания существенно изменили сельский ландшафт, в частности в Англии, выделяясь своей массовостью, значительными размерами, аскетичной, одинаковой трактовкой объема, такой похожестью не отличались объекты ни в одной другой области архитектуры (рис. 1).

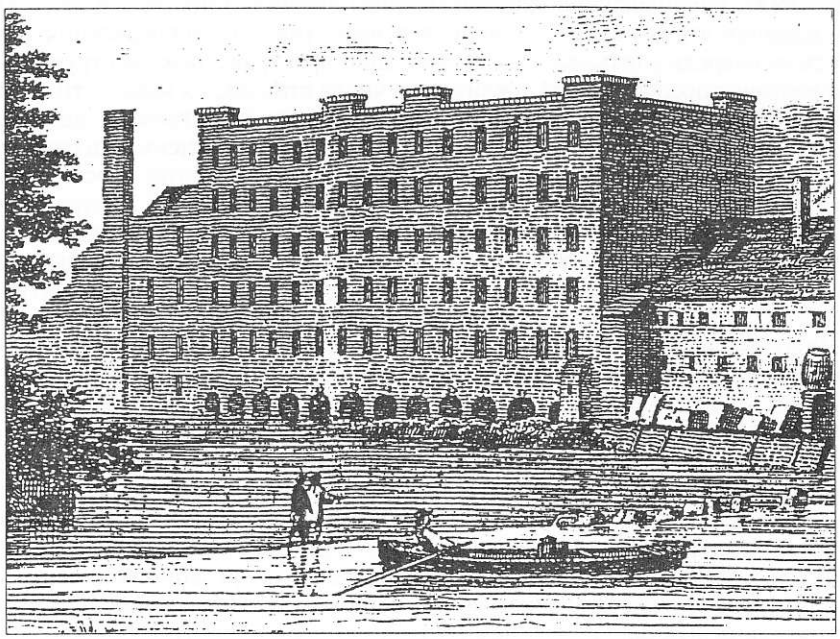


Рис. 1. Вододействующая фабрика в Дерби, Англия, 1718–1721 гг.

Второй период развития промышленной архитектуры (1840–1910-е гг.) характеризовался расширением перечня факторов, относящихся к первому блоку — системе машины. В то же время впервые заявляют о себе факторы, связанные с присутствием в промышленных объектах человека.

Источник энергии и способ ее подведения продолжали оказывать существенное влияние на формообразование. В этот период основным источником энергии стал пар, хотя гидравлическая энергия еще применялась вплоть до 1860-х гг., до этого времени строились вододействующие фабрики, особенно долгим по времени их строительство было в США [3]. Паровые машины совершенствовались, менялось их расположение в корпусе в связи с изменением практики их использования: одна централизованная машина, потом множество отдельных и, наконец, сочетание централизации с рассредоточенным размещением малых машин. Возросшая мощность двигателей обусловила значительное увеличение размеров промышленных зданий и сооружений.

Шафтовый способ передачи энергии сменился веревочной передачей (wire-rope), изобретенной в Европе в 1850-х гг., но получившей промышленное применение впервые в США в 1860-х гг. Отличие этой системы заключалось в возможности подведения энергии как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости на большие расстояния, до трех миль, и подведения более гибко и индивидуально [2]. Для многоэтажных зданий использовалась смешанная веревочно-шафтовая схема, при которой в торце здания для размещения механизмов подводки энергии возникала пристройка с наклонной плоскостью на всю высоту. Полностью веревочная схема, не требовавшая специальных объемов для размещения механизмов, обусловила развитие одноэтажного здания большой площади, используемого в основном в рассматриваемый период для ткацкого производства.

В это время проявляется влияние нового фактора — подъемного оборудования. С появлением мостового крана (конец 1840-х гг.— Англия и Франция, 1875 г.— США) в зданиях начинают оформляться пролеты, крановый пролет становится ведущим, организующим весь план. Использование мостового крана находит применение в зданиях разной этажности, особенно влияя на формирование одноэтажного здания, закладывая предпосылки для революционного изменения его в последующий период развития промышленной архитектуры. В то же время в многоэтажных зданиях совершенствование вертикальных подъемников способствует широкому распространению и предпочтению этого типа в разных отраслях промышленности.

Соединение новых материалов (чугуна, сварного железа, стали, железобетона) с новой конструктивной системой, полным каркасом, которое впервые произошло именно в промышленных объектах, также становится определяющим в развитии промышленной архитектуры рассматриваемого периода.

Полнокаркасные здания появляются в США и Европе (Англия, Франция) практически одновременно: 1849 г.— литейная мастерская в Нью-Йорке, инженер J. Bogardus; 1850–54 гг.— типографии Sun Iron Building в Балтиморе и Harper & Brothers в Нью-Йорке, инженер J. Bogardus, архитекторы R. G. Hatfield и J. B. Corlies; 1858–60 гг.— кузница Boathouse на территории морских доков в Ширнесс, инженер G. T. Greene; 1864–65 гг.— складские здания St Quen Dock в Париже; 1869–72 г.— шоколадная фабрика Menier в Нойзел-сур-Марне, архитектор J. Saulnier [1, 5, 6].

В использовании полнокаркасной конструкции можно отметить два направления. Так называемые «чугунные фасады» американских инженеров J. Bogardus и D. Badger представляли собой соединение идеи каркаса с идеей сборного строительства. Здание возводилось целиком из готовых несущих и ограждающих элементов, включая элементы декора [6].

Другим направлением в применении полного каркаса, распространившимся преимущественно в Европе, стало его использование совместно с кирпичным заполнением для наружных стен. Наиболее ярким примером является шоколадная фабрика Menier, которую S. Giedion назвал первым в мире действительно каркасным зданием [5, с. 288]. С этим, однако, можно согласиться, рассматривая только одно из направлений развития каркасной конструкции в архитектуре.

Конструктивные новшества не столько изменили планировочную и пространственную организацию фабричных зданий, сколько их внешний облик. Освобождение стены от необходимости нести нагрузку, обусловило вынесение элементов каркаса на фасад, особенно при использовании железобетона, и позволило увеличить количество окон и их размеры, а простенок сделать тоньше [1].

Следует отметить, что каркасные системы и связанные с ними новые строительные технологии в Европе (Англии и Франции) внедрялись в массовое строительство гораздо медленнее, чем в США. Так, только в 1909 г. Лондонский County Council признал возможным уменьшать толщину стены в случае использования каркасной системы. Причина медленного внедрения конструктивных новшеств крылась в недостатке технического образования архитекторов и в их непонимании необходимости совместной работы с инженерами. В США промышленное проектирование становилось делом многих специалистов, в архитектуре это был первый пример действительно синтетического труда, где «верх брало стремление к эксперименту, чем верность традиции» [2, с. 12].

В рассматриваемый период впервые проявляется влияние факторов, связанных с присутствием человека в промышленных объектах. Так, градостроительные факторы в связи с начавшимся в начале XIX в. перемещением предприятий в города в ряде случаев принимаются во внимание. Это касается достаточно пышной декоративной проработки фасадов зданий, размещаемых в центральных районах города. Некоторые из них, по замечанию исследователя H. Brockman, «выглядели как дворцы» [7] (рис. 2).

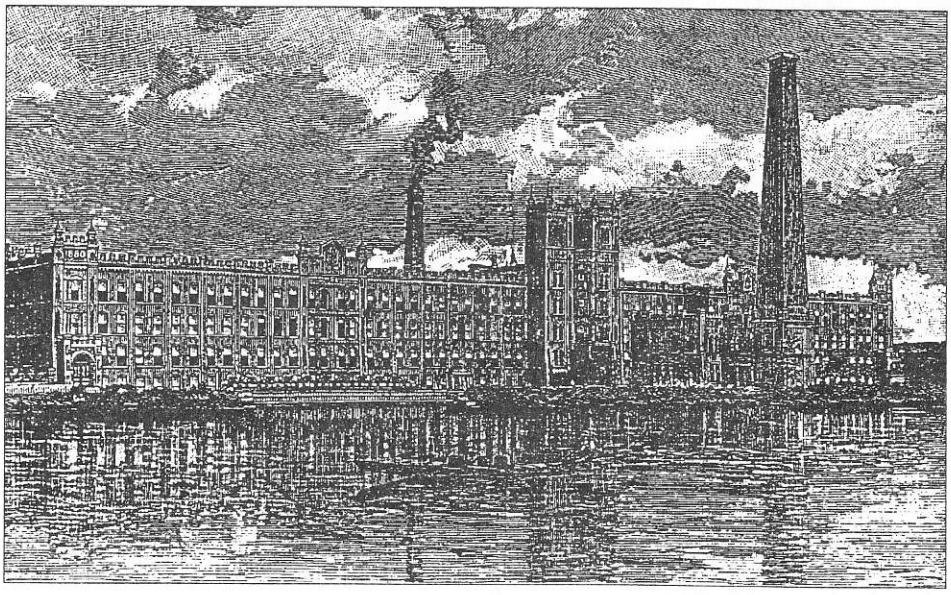


Рис. 2. Фабрика Sibley Manufacturing Company, США, 1860-е гг.

Движение патернализма в среде промышленников акцентирует внимание на организации среды для рабочего. В промышленных зданиях появляются специальные помещения для обслуживания рабочих (душевые, санитарные узлы, помещения для приема пищи), их совершенно другой масштаб и планировочные параметры меняют пространственную организацию зданий. Начинает формироваться группа специальных, отдельных зданий, предназначенных не для производственного процесса, а для обслуживания рабочих.

Существенное влияние на формирование типов промышленных зданий оказал такой фактор внутренней среды, как освещение. С развитием газового и впоследствии электрического освещения промышленные здания стали все менее рассчитываться на естественное освещение, которое не рассматривалось как главное, а только наравне с искусственным. Это способствовало увеличению ширины промышленного здания практически неограниченно. Чугу-

нолитейный завод в Stanton (Англия) в 1877 г. был первым примером полного перехода к электрическому освещению, что позволило предприятию работать круглосуточно [8].

Особенностью третьего периода развития промышленной архитектуры (1910–1920-е — конец 1970-х гг.) является резкое усиление роли факторов, связанных с присутствием человека в промышленных объектах. Их влияние в процессе формирования отдельных типов становится определяющим. В то же время система машины сохраняет свою значимость, однако здесь происходят существенные изменения.

Революционным в технологической группе факторов стал переход промышленного производства на электрическую энергию (одна из первых фабрик в Англии — Acme Mill, 1905 г.) [1]. Использование электрической энергии повысило производительность станков на 15% (каждый) и явилось важным стимулом для концентрации производства. Мощности и соответственно размеры фабричных зданий и промышленных площадок, рост которых отмечался и до этого, с приходом электродвигателя начинают увеличиваться стремительно, с небывалой раньше быстротой. Становится возможным собрать весь процесс под одну крышу в одном объеме.

Использование электромоторов знаменовало новый принцип передачи энергии — подведение ее непосредственно к необходимой точке. При этом исчезала необходимость устройства систем по передаче энергии. Здания могли строиться не как трансмиссионные, а свободно следовать за производственным процессом. Таким образом, с наступлением века электричества закончилась длившаяся более двухсот лет эпоха зависимости формообразования промышленных объектов от источника энергии и способа ее передачи.

Организация труда и организация производственного процесса, факторы, относящиеся сразу к двум блокам — системе человека и системе машины, в это время выступают как основные, достаточно тесно взаимодействуя друг с другом. Влияние этих факторов выдвигается на первый план с переходом к массовому производству, принципом которого является разбивка операций на секции и узкая специализация рабочего на одном или малом круге операций. В 1913 г. на заводе G. Ford запускается конвейер, самая эффективная в то время организационная система, которая требует формирования протяженных, свободных от опор пространств, длиной не менее 300 м.

Складывается новый подход — создание «рациональной фабрики»—суть которого заключается в понимании того, что хорошо запроектированное предприятие — это, прежде всего, инструмент и необходимое условие получения максимальной эффективности производственного процесса. Если ранее фабрика, завод, производственное здание рассматривались как объем для машин, людей и всего технологического процесса, то с 1920-х гг.— это "the master machine", т. е. здание — само по себе машина, где все элементы, в том числе и рабочие, должны функционировать точно и предсказуемо [9]. В соответствии с таким подходом рабочие рассматриваются как придаток машины или самостоятельная машина, а успешность предприятия зависит не от оборудования, а от расположения его и рабочих, и их совместной работы как одно целое.

Истоки идеи «рациональной фабрики» лежали в европейской теоретической мысли XVIII–XIX вв.: в дискуссиях французских инженеров 1750-х гг. о «культуре в науке» и работах английских ученых A. Smith 1770-х гг. и Andrew Ure 1830-х гг. Идея окончательно оформляется к 1920-м гг. в США, ее лучшей реализацией и иллюстрацией становятся заводы Ford Motor Company, в создании которых принимали равное участие архитектор A. Kahn и владелец предприятий G. Ford (рис. 3). Из США уже воплощенная идея рациональной фабрики возвращается в Европу.

Поскольку в рациональной фабрике рабочий рассматривается как машина, то начинают активно развиваться исследования по формированию производственной среды. Если в XIX в. патерналистские идеи промышленников были направлены на создание благоприятной для рабочего среды, то сейчас эта среда рассматривается не с точки зрения комфорта для человека, а с точки зрения продуктивности его труда. С 1910 по 1920 г. многие предприятия приглашают на работу врачей и прочих специалистов для организации условий

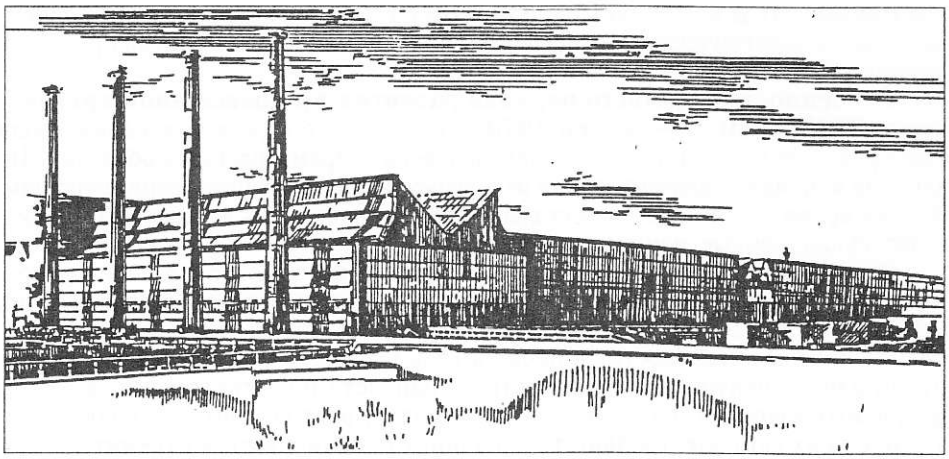


Рис. 3. Стекольный завод Ford Motor Company в Мичигане, США, 1930-е гг.

эффективной работы. В 1927 г. R. Dana публикует книгу «Человеческая машина в производстве», промышленных инженеров начинают готовить как специалистов не по «инженерии материала, а инженерии людей» [9].

Таким образом, если в предыдущие периоды развития промышленной архитектуры производственное здание строится для размещения машин и механизмов, то в рассматриваемый период — для организации процесса. В середине XX в. ассоциация архитекторов и инженеров промышленного проектирования им. A. Kahn зафиксирует это положение документально.

В технической группе факторов происходит переориентация лидирующего фактора. Влияние конструкций превосходит влияние новых материалов. Это наиболее существенно отражается на развитии отдельных типов, в частности здания с организацией пространства в одной плоскости.

Внедрение и дальнейшее развитие внутреннего транспорта — мостовых кранов, подвесных конвейеров — позволило размещать разные технологические процессы в одноэтажном варианте, что явилось более экономичным, поскольку все связи осуществлялись в одной плоскости. Это привело к переоценке многоэтажного и одноэтажного зданий в пользу одноэтажного. По образному выражению R. Banham, развитие горизонтального транспорта «могло бы убить» многоэтажный тип, если бы он не сохранялся и развивался как символ процветания [10, с. 29] (рис. 4).

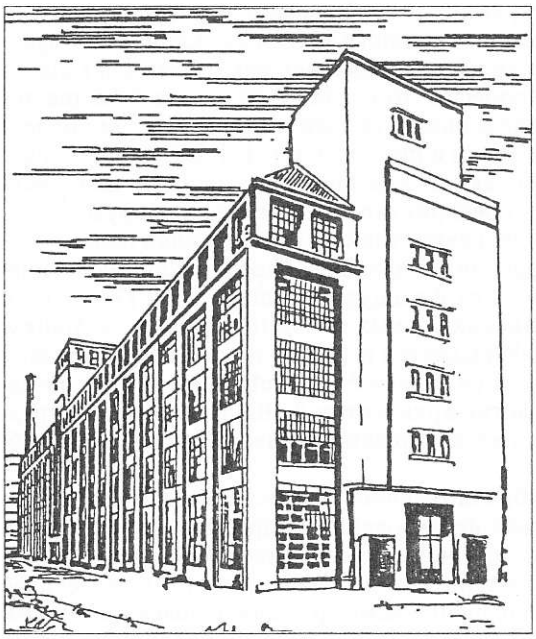


Рис. 4. Производственный корпус фирмы AEG в Берлине, Германия, 1920-е гг.

В рассматриваемый период впервые за всю историю существования промышленной архитектуры проявляется воздействие художественно-мировоззренческого фактора. Новое отношение к машине, поэтизация техники, вера в ее безграничные возможности обусловливают обращение внимания на промышленную архитектуру, признания за ней права на участие в художественном формировании среды. В социалистическом обществе добавляется обусловленная идеологическими установками идея создания гуманной, эстетически и экологически благоприятной и

высокохудожественной производственной среды как среды призванной обслуживать правящий класс — пролетариат.

Современный период развития промышленной архитектуры (с 1980-х гг.) был подготовлен технологическими изменениями, знаменовавшими поступательное движение к информационному обществу, в предметное поле которого включается информация так же, как ранее были последовательно включены вещество и энергия [11].

Это повлекло за собой закономерное отмирание ряда отраслей промышленности и сокращение количества рабочих, занятых в промышленном производстве, переоценку принципа концентрации производства, и как следствие, переоценку оптимального размера предприятия в условиях свободного рынка. Впервые за всю историю существования промышленной архитектуры прекращается наращивание размеров ее объектов — зданий, сооружений, предприятий, устанавливается преимущество малых и средних предприятий. Усложнение технической оснащенности производственных корпусов обусловливает рост стоимости внутренней начинки здания и его дальнейшей эксплуатации. Если в начале своего существования стоимость строительной части промышленного здания составляла три четверти от общей стоимости, то сегодня — только одну пятую часть.

В промышленной архитектуре все эти объективные процессы привели к стагнации в развитии типов промышленных зданий, использованию упрощенных архитектурно-художественных решений в массовом строительстве.

Факторы, влияющие на формообразование объектов промышленной архитектуры на современном этапе, требуют еще отдельного, серьезного исследования. Однако уже можно утверждать, что их воздействие разделилось: часть объектов практически полностью определяется технологической и технической группой факторов, другая часть, наиболее многочисленная, все больше зависит от группы факторов, обусловленных присутствием человека.

Причем, происходит поворот от подхода к человеку как придатку машины к человеку как таковому, с развитием личной индивидуальности и ответственности (рис. 5).

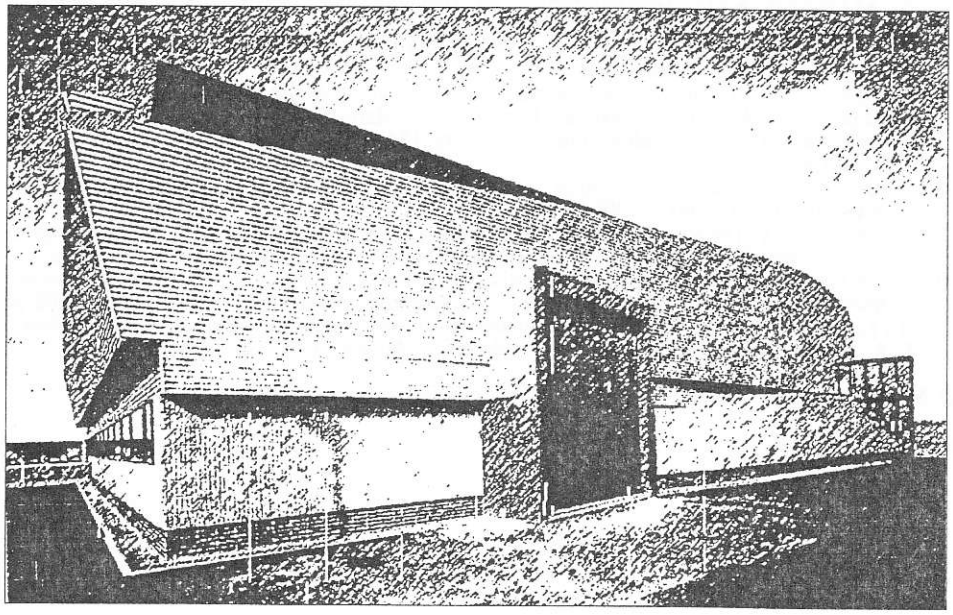


Рис. 5. Производственное здание в Амерсфорте, Голландия, 1980-е гг.

Подводя итог рассмотрению исторического развития формообразующих факторов в промышленной архитектуре, можно заключить, что их влияние в разные периоды было неодинаковым. В тот или иной временной отрезок можно выделить доминантные факторы, которые инициировали и стимулировали формирование отдельных типов объектов, влияние остальных стабилизирую-

щих факторов, носило корректирующий, ограничительный характер. Причем часть факторов могла переходить из доминантной в стабилизирующую группу, и наоборот, как, например, источник энергии или организация труда; часть факторов никогда в лидирующую группу не попадала, как, например, природно-климатические или градостроительные условия, поэтому их влияние на архитектуру промышленных объектов никогда не было существенным.

В первый период развития промышленной архитектуры (1700–1840-е гг.) доминантными были факторы системы машины — источник энергии, способ ее передачи и применяемое оборудование; влияние факторов, связанных с присутствием человека, практически не ощущалось. С 1840-х по 1910-е гг. группа доминантных факторов значительно расширилась, однако она по-прежнему состояла из факторов, относящихся к системе машины — источник энергии и способ ее передачи, новые строительные материалы и конструктивные системы, транспортное оборудование. В третий период развития промышленной архитектуры (1910–1970-е гг.) лидирующими становятся факторы, относящиеся не только к системе машины, но и человека, причем влияние факторов этих двух групп отмечается равным. Сегодняшние процессы развития промышленной архитектуры характеризуются резким усилением роли факторов, связанных с присутствием человека, их качественной переориентацией.

Таким образом, в развитии архитектуры промышленных объектов можно проследить тенденцию изменения приоритетов: от полного преобладания формообразующих факторов системы машины над факторами, обусловливающими присутствие в промышленных объектах человека, до их выравнивания, паритета и в дальнейшем к доминированию последних.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Winter John Anthony. Industrial architecture: a survey of factory building/John Anthony Winter.— London: Studio Vista, 1970.— 128 p.
2. Bradley Betsy Hunter. The Works: the industrial architecture of the United States/Bradley Betsy Hunter. — New York, Oxford: Oxford University Press, 1999.— 347 p.
3. Giles Colum. Yorkshire textile mills: the buildings of the Yorkshire textile industry, 1770–1930/Colum Giles.— London: HMSO, 1992.— 274 p.
4. Ackermann Kurf. Geschossbauten fkr Gewerbe und Industrie/Kurt Ackermann.— Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1993.— 245 p.
5. Pevsner Nikolaus Sir. A history of building types/Nikolaus Sir Pevsner.— London: Thames and Hudson, 1976.— 352 p.
6. Bergeron Louis. Industry, architecture, and engineering: American ingenuity, 1750–1950/Louis Bergeron, Maria Teresa Maiullari-Pontois.— NY: Harry N. Abrams, Inc., 2000.— 287 p.
7. Brockman H. A. N. British architect in industry, 1841–1940/H. A. N. Brockman.— London: Allan & Unwin, 1974.— 186 p.
8. Drury Jolian. Factories: Planning, Design and Modernization/Jolian Drury.— London: The Architectural Press, 1981.— 305 p.
9. Biggs Lindy. The Rational Factory: architecture, technology, and work in America's age of mass production/Lindy Biggs.— Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1996.— 202 p.
10. Banham Reyner. A concrete Atlantis: U.S. industrial building and European modern architecture, 1900–1925/Reyner Banham.— Cambridge, Mass.: MIT Press, 1986.— 266 p.
11. Литвиненко В. А. Философские проблемы оптимизации технологического прогресса/В. А. Литвиненко: Автореф. дис. ...д-ра филог.— Минск, 1994.— 132 л.

© Морозова Е. Б., 2005

Получено 11.01.05

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 628.588.75.003.1

В. М. КОЖУХАР, д-р техн. наук, проф. (Брянская государственная инженерно-технологическая академия)

ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВНЕШНЕГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ*

Известная модель сопоставления затрат на снижение гамма-облучения в помещениях с предотвращенными потерями от облучения не учитывает разновременности этих затрат и достигаемого эффекта. Предлагается модель типа «затраты — эффект», лишенная этого недостатка, и приведен пример ее использования.

При проектировании защитных мероприятий от влияния внешнего гамма-облучения на людей во вновь возводимых и обновляемых зданиях (помещениях) зачастую возникает задача оценки социально-эколого-экономического эффекта от замены существующих или первоначально намечавшихся к использованию материалов (конструкций, загрязненных естественными радионуклидами (ЕРН) в пределах, допускаемых действующими нормами радиационной безопасности (НРБ-99)) на менее загрязненные. Ее можно представить и как задачу выбора предпочтительного к применению материала из нескольких, допустимо загрязненных ЕРН, но в разной степени.

Для решения этой задачи может быть использовано выражение (1), предложенное в работе [1] и используемое другими авторами, например [2]:

$$(X_а - X_з) \leq [9{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot T \cdot k_п \cdot (A_{эффз} - A_{эффа})] : m_з, \qquad (1)$$

где $X_а$, $X_з$ — стоимость одной тонны заменяемого (з) и альтернативного (а) материала на месте применения, р/т;

α — денежный эквивалент общественно оправданных затрат на снижение дозы облучения населения на 1 чел.;

T — ожидаемая продолжительность эксплуатации здания (помещения), лет;

$k_п$ — коэффициент, учитывающий продолжительность пребывания людей в помещении (продолжительность облучения), отн. ед.; учитывается только в случае, если имеется в виду другой режим пребывания человека в помещениях (чем 6000 ч в году), предусмотренный коэффициентом $9{,}5 \cdot 10^{-6}$;

$A_{эффз}$, $A_{эффа}$ — эффективные удельные активности ЕРН заменяемого и альтернативного материала соответственно, Бк/кг;

$m_з$ — масса заменяемого материала, приходящегося на одного человека, находящегося в помещении, т/чел.

Практика прямого применения [3] приведенного выражения оказалась недостаточно корректной. Дело в том, что одна его составляющая, а именно $(X_а - X_з)$, представляет собой не что иное, как разовые инвестиции, направляемые на предотвращение радиационно-экологического ущерба, а другая — $[9{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (\alpha \cdot k_п) \cdot (A_{эффз} - A_{эффа})] : m_з$ — годовое значение предотвращенного ущерба, который мог бы иметь место в течение T лет.

Из изложенного следует, что недостаточная корректность прямого применения выражения (1) сводится к порядку учета фактора времени, к недостаточно правомерному сопоставлению разновременных и, следовательно, разноценных денежных потоков: разовых инвестиций и текущего эффекта с годовой размерностью. Вторую часть выражения (1) целесообразно рассматривать как рентный аннуитетный, а точнее, перпетуитетный поток, обусловленный соот-

* Печатается в порядке обсуждения

ветствующими инвестициями, подлежащий дисконтированию с использованием социальной нормы доходности [4].

С учетом изложенного рассматриваемая формула (в варианте «постнумерандо» должна быть представлена в виде

$$(X_а - X_з) \le \sum_{t=1}^{t=T} \left\{ \frac{[9{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (\alpha \cdot k_п) \cdot (A_{эффз} - A_{эффа})]}{m_з \cdot (1 + E_{дс})^t} \right\}, \qquad (2)$$

где $E_{дс}$ — ставка социальной доходности (социальная норма дисконтирования, выраженная в дол. ед.);

t — порядковый номер года в течение периода (T), в котором имеет место предотвращение социально-экологического ущерба; $t \in 1, T$.

При представлении (2) в формате срочного аннуитента [5] она приобретает вид

$$(X_а - X_з) \le \left\{ \frac{[9{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot k_п \cdot (A_{эффз} - A_{эффа})]}{m_з} \cdot \frac{1 - (1 + E_{дс})^{-T}}{E_{дс}} \right\}, \qquad (3)$$

а в виде бессрочного[1], т. е. в виде перпетуитета

$$(X_а - X_з) \le \left\{ \frac{[9{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot k_п \cdot (A_{эффз} - A_{эффа})]}{m_з \cdot E_{дс}} \right\}. \qquad (4)$$

В качестве примера использования формулы (4) для оценки социально-эколого-экономического эффекта рассмотрим задачу, приведенную в [3]: определить допустимое увеличение затрат на замену керамзитобетона класса В7,5 с повышенным содержанием ЕРН ($A_{эффз}$ = 350,0 Бк/кг) в стеновых панелях помещений пятиэтажного дома серии СБ90 на керамзитобетон с меньшим их содержанием (например, $A_{эффа}$ = 75,0 Бк/кг). Масса материала ($m_з$), приходящаяся на одного жителя в домах этой серии, составляет 24 т/чел. Продолжительность эксплуатации здания 100 лет; значение α принимаем равным 76 тыс. р./чел.— Зв[2]; значение $E_{дс}$, за отсутствием других официальных данных, принимаем равным 0,12.

Решение:

$$\Delta X \le \{[9{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 76000 \cdot (350{,}0 - 75{,}0)]:(24 \cdot 0{,}12)\}; \ \Delta X \le 68{,}95 (р./т).$$

Как видим, допустимое увеличение удельных (на одну тонну) затрат на альтернативный материал, по сравнению с заменяемым, равное 68,95р./т, значительно меньше (в 12 раз) определенного путем прямого применения формулы (1) и составившего 562,6 р./т (см. [3]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крисюк Э. М. Радиационный фон помещений/Э. М. Крисюк.— М.: Энергоатомиздат, 1998.— 120 с.
2. Сидельникова О. П. Радиационный контроль в строительной индустрии: Учеб. пособ./О. П. Сидельникова.— М.: АСВ, 2002.— 208 с.
3. Лукутцова Н. П. Методические рекомендации по ограничению внешнего гамма-облучения от ограждающих конструкций/Н. П. Лукутцова, В. М. Кожухар, Н. Ф. Пискунов.— Брянск: Изд-во БГИТА, 2004.— 30 с.
4. Колтынюк Б. А. Инвестиционные проекты: Учеб., 2-е изд./Б. А. Колтынюк.— СПб.: Изд-во Михайлова В. А., 2002.— 622 с.
5. Инвестиции: Учеб./Под ред. В. В. Волкова и др.— М.: Т. К. Велби.— Изд-во Проспект, 2004.— 440 с.
6. Кожухар В. М. Денежный эквивалент общественно оправданных затрат на снижение дозы радиационного облучения населения и проблемы его оценки/В. М. Кожухар, Н. П. Лукутцова//Вестник Брестского ГТУ. Строительство и архитектура.— 2004. Приложение: Матер.

[1] При $T \ge 50$ лет.

[2] Это значение, равное согласно НРБ-99 одному годовому душевому значению ВНП РФ в 2002 г., как показано нами в работе [6], является существенно заниженным. Более обоснованным является значение в 120–150 тыс. р., приведенное в [7].

XI Международного НММС «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь».— Ч. 2.— Брест, 2004.— С. 190, 191.
7. Маренный А. М. Модель для оценки коллективной дозы облучения населения России от радона/А. М. Маренный, М. И. Савкин, С. М. Шинкарев. — АНРИ, 1999.— № 4.— С. 4–10.

© Кожухар В. М., 2005

Получено 02.02.05

УДК 624.075.2.014.2

А. А. КОЛЬЗЕЕВ, канд. техн. наук, доц. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОЛОК НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВНЕЦЕНТРЕННО-СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ

Исследуется влияние толщины полок на величину коэффициента влияния формы сечения для внецентренно-сжатых стальных стержней из прямоугольных труб. Задача решается на ЭВМ с учетом геометрической и физической нелинейности стержня. Установлено, что при увеличении толщины полок (при изменении отношения площади полки к площади стенки от 0,26 до 1,25) коэффициент формы сечения возрастает на 10–15% в зависимости от гибкости. Предложены инженерные зависимости для вычисления этого коэффициента, использование которых позволит экономить до 5–8% металла.

Исследования, проведенные на кафедре металлических и деревянных конструкций НГАСУ (Сибстрин), показали, что внецентренно-сжатые стержни с поперечными сечениями в виде прямоугольных труб обладают запасами несущей способности по устойчивости [1]. Установлено, что эти запасы скрыты в величине коэффициента влияния формы сечения η, который учитывает степень ослабления стержня пластическими деформациями при потере устойчивости. Наличие таких запасов совместно с другими достоинствами трубчатых стержней — значительная жесткость на кручение, высокая коррозионная стойкость и долговечность и многие другие — делают их весьма привлекательными в качестве элементов колонн, ферм, арок.

В действующих нормах [2] есть понятие базового сечения (сплошное прямоугольное сечение), для которого $\eta = 1$. Для большинства типов сечений $\eta > 1$. Установлено, что для сжатых стержней из прямоугольных труб коэффициенты η меньше нормативных на 20–40 % [1, 3], т. е. сечение из прямоугольной трубы менее восприимчиво к ослаблению пластическими деформациями в сравнении с открытыми сечениями типа двутавра, тавра или швеллера.

Одним из параметров, влияющих на величину η, является соотношение площади полки прямоугольной трубы — A_f к площади стенок — A_w. Влияние A_f/A_w за счет соотношения габаритных размеров сечения: высоты h и ширины b, исследовано в [3].

Однако отношение A_f/A_w можно варьировать за счет изменения толщины полок трубчатого сечения. Кроме того, при усилении колонн зачастую трудно или невозможно развить габаритные размеры сечения. Увеличение площади и изгибной жесткости стержня в этом случае возможно только путем увеличения толщины полок.

В связи с этим возникает вопрос, как влияет изменение толщины полок на устойчивость сжатого стержня и насколько эффективно это влияние?

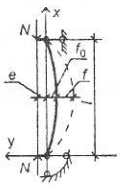
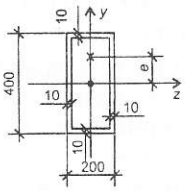
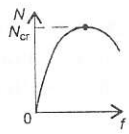
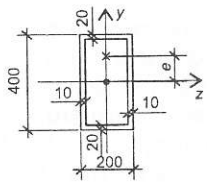
Для решения поставленной задачи была разработана модель колонны, а в качестве инструмента для исследований использовалась программа "PSK", алгоритм которой был разработан в ЦНИИПроектстальконструкции. В НГАСУ (Сибстрин) алгоритм "PSK" был реализован на языке "C" для ПЭВМ "Pentium". В основе алгоритма программы "PSK" — метод перемещений с использованием суперэлементов. Система уравнений равновесия сжатого стержня выводится с помощью вариационного принципа Лагранжа путем нахождения экстремума полной внутренней энергии и решается методом пошагового нагружения.

Программа "PSK" позволяет вычислять критическую нагрузку при потере устойчивости сжатого стержня с учетом геометрической и физической нелинейности и развития зон пластических деформаций по длине стержня. "PSK" позволяет варьировать концевые эксцентриситеты сжимающей силы, величину и форму начальной погиби стержня, условия закрепления стержня. Диаграмма работы стали при сжатии задается координатами точек. Результаты расчетов по "PSK" хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований [3].

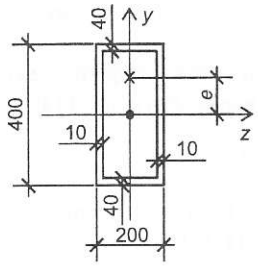
Модель колонны (таблица) имеет длину от 8 до 16 м (гибкость $\lambda = 55...100$) и поперечное сечение с габаритными размерами 400×200 мм. Толщина стенок прямоугольной трубы — 10 мм, а толщина полок варьируется от 10 до 40 мм ($A_f / A_w = 0{,}26...1{,}25$). Расчетная схема модели — в таблице.

По длине модель колонны разбивается на 8 одинаковых конечных элементов, а в поперечном сечении — на 32 элемента. Первоначально изогнутая ось колонны (вследствие сварки, газовой резки либо вследствие операций при монтаже конструкции) задавалась по полуволне синусоиды. В настоящее время величина начальной погиби (кривизны) колонн и стержней нормируется в [5]. Значение максимальной стрелы прогиба (кривизны) колонны f_0 не должно превышать 0,0013 от расстояния между точками закрепления — l, т. е. $f_0 = 1/750 \cdot l$, где l — длина модели. Физическая нелинейность работы стали учитывалась с помощью реальной диаграммы $\sigma \sim \varepsilon$, предложенной ЦНИИСК

Результаты расчетов на ПЭВМ

Расчетная схема и поперечное сечение стержня	l, м	λ	e, м	m	N_{cr}, кН	η	η по [2]
  $A = 116$ см^2; $i_z = 14{,}5$ см; $A_f / A_w = 0{,}26$	8	55	1	0,1	2290	1,003	1,354
			4	0,38	2186	1,022	1,345
			8	0,76	1970	1,055	1,333
			16	1,52	1625	1,097	1,309
			32	3,03	1100	1,147	1,262
	12	83	1	0,1	1853	1	1,307
			4	0,38	1814	1	1,301
			8	0,76	1708	1,026	1,293
			16	1,52	1444	1,077	1,276
			32	3,03	1049	1,125	1,243
	14,5	100	1	0,1	1558	1	1,279
			4	0,38	1538	1	1,275
			8	0,76	1481	1,01	1,269
			16	1,52	1312	1,034	1,266
  $A = 152$ см^2 $i_z = 15{,}54$ см $A_f / A_w = 0{,}56$	8,56	55	1	0,1	2993	1,006	1,558
			4	0,33	2869	1,029	1,543
			8	0,66	2583	1,077	1,523
			16	1,33	2136	1,140	1,480
			32	2,65	1513	1,188	1,398
	12,83	83	1	0,1	2433	1	1,465
			4	0,33	2385	1	1,455
			8	0,66	2259	1,030	1,440
			16	1,33	1914	1,100	1,411
			32	2,65	1426	1,164	1,353
	15,54	100	1	0,1	2049	1	1,409
			4	0,33	2021	1	1,401
			8	0,66	1957	1,010	1,391

Окончание таблицы

	8,79	55	1	0,1	4401	1,009	1,671
			4	0,31	4222	1,033	1,657
			8	0,63	3779	1,092	1,637
			16	1,25	3099	1,175	1,598
			32	2,51	2216	1,238	1,589
	13,19	83	1	0,1	3585	1	1,558
			4	0,31	3523	1,005	1,549
			8	0,63	3344	1,03	1,535
			16	1,25	2819	1,115	1,508
			32	2,51	2088	1,204	1,453
$A = 224$ см^2 $i_z = 15{,}97$ см $A_f/A_w = 1{,}25$	15,97	100	1	0,1	3032	1	1,491
			4	0,31	2995	1	1,484
			8	0,63	2899	1,010	1,474

им. Кучеренко [4], предел текучести $\sigma_т = 240$ МПа. Коэффициенты влияния формы сечения вычислялись по методике, изложенной в [1]. Результаты вычислений представлены в таблице и на рис. 1 и 2.

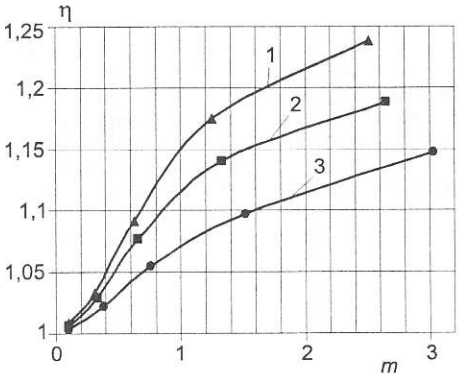


Рис. 1. Зависимость коэффициента η от A_f/A_w и эксцентриситета m при гибкости $\lambda = 55$

1 — $A_f/A_w = 1{,}25$; *2* — $A_f/A_w = 0{,}56$; *3* — $A_f/A_w = 0{,}26$

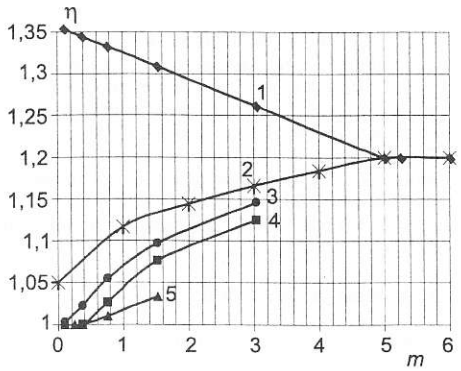


Рис. 2. Влияние гибкости на величину коэффициента η

1 — СНиП [2], гибкость 55, $A_f/A_w = 0{,}26$; *2* — по (1); *3* — гибкость 55, $A_f/A_w = 0{,}26$; *4* — гибкость 83, $A_f/A_w = 0{,}26$; *5* — гибкость 100, $A_f/A_w = 0{,}26$

Выводы. 1. В области «малых» относительных эксцентриситетов ($m < 0{,}1$) величина коэффициента η близка к единице и практически не зависит от отношения A_f/A_w. Такие стержни можно назвать центрально-сжатыми. Потеря устойчивости в этом случае происходит при достижении нормальными напряжениями в наиболее сжатых волокнах предела текучести.

2. С увеличением относительного эксцентриситета сжимающей силы "m" величина η нелинейно возрастает. Это объяснимо увеличением ослабления поперечного сечения в процессе развития пластических деформаций при потере устойчивости стержня.

3. Изменение соотношения A_f/A_w также влияет на величину коэффициента формы сечения (рис. 1). При увеличении толщины полки с 10 до 40 мм (A_f/A_w возрастает с 0,26 до 1,25) коэффициент η увеличивается до 10–12% при гибкости стержня $\lambda = 55$.

4. С увеличением гибкости с $\lambda = 55$ до $\lambda = 100$ влияние отношения A_f/A_w на коэффициент η снижается до 2–3%. Фактически при $\lambda > 100$ — область упругой работы сжатого стержня.

5. Влияние гибкости на величину коэффициента η при фиксированном значении A_f/A_w незначительно (в пределах 1–2%) (см. рис. 2).

6. Значения коэффициентов η, вычисленных по программе «PSK», на 30–35% ниже нормативных значений [2]. В области больших эксцентриситетов $m > 5$ вычисленные коэффициенты η приближаются к нормативным (см. рис. 2).

7. С учетом проведенных исследований предлагается коэффициенты влияния формы сечения η для прямоугольных труб вычислять по (1):

$$\text{при } m \le 5 \quad \eta = \alpha + 0{,}067 \cdot \sqrt{m}, \qquad (1)$$

где $\alpha = 1{,}05$ при $A_f/A_w = 0{,}25$; $\alpha = 1{,}1$ при $A_f/A_w = 0{,}5$; $\alpha = 1{,}15$ при $A_f/A_w = 1$ и более; при $m > 5$ коэффициенты η — по СНиП [2].

Зависимости коэффициентов η, вычисленные по (1) при различном соотношении A_f/A_w, являются огибающими к семейству кривых, полученных по программе «PSK» для различных гибкостей λ (см. рис. 2). Результаты по формуле (1) превышают значения η в таблице (запас 3–5%) для учета влияния гибкости колонны (см. вывод № 5 и рис. 2).

Использование коэффициентов η по (1) позволит дополнительно экономить до 5–8% металла в колоннах и сжатых стержнях из прямоугольных труб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кользеев А. А. Оценка влияния формы сечения на устойчивость внецентренно-сжатых стержней/А. А. Кользеев//Изв. вузов. Строительство.— 1992.— № 1.— С. 3–6.
2. СНиП II-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции.— М., 1990.— 96 с.
3. Кользеев А. А. Устойчивость внецентренно-сжатых стальных прямоугольных труб/А. А. Кользеев//Изв. вузов. Строительство.— 1997.— № 1–2.— С. 8–12.
4. Бельский Г. Е. Устойчивость сжато-изогнутых элементов/Г. Е. Бельский, Л. А. Гильденгорн//Совершенствование и развитие норм проектирования строительных конструкций.— М., 1981.— С. 128–138.
5. СНиП 3.03.01–87. Строительные нормы и правила. Несущие и ограждающие конструкции.— М., 1988.— 184 с.

© Кользеев А. А., 2005

Получено после доработки 02.02.05

УДК 531.78 : 624.07

А. П. ЛОКТИОНОВ, канд. техн. наук, доц. (Курский государственный технический университет)

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ЯЧЕЙКАМИ

Изложена концепция построения математической модели исследования внутренних силовых факторов при поперечном изгибе элементов конструкций на основе соотношений, устанавливающих связь линейных и угловых перемещений измерительных ячеек с результатами решения в перемещениях задачи изгиба элемента конструкции, параметров измерительных ячеек, полученных разделением внутренних силовых факторов на измеряемую и влияющую величины. Представлены результаты экспериментов на натурных моделях.

Класс задач экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов конструкций непрерывно расширяется. Результатом проводившихся в течение ряда лет исследований автоматических систем испытания на прочность, управления нагружением явилось повышение требований к средствам измерения внутренних силовых факторов, механических нагрузок на элементы конструкций. В строительной механике находят применение численные методы в основном при решении задач аппроксимации сложных для математических преобразований функций более простыми [1].

Появилась необходимость применения численных методов при синтезе автоматических систем испытания строительных конструкций.

Для исследования внутренних силовых факторов разработаны модель исследования внутренних силовых факторов и методика расчета, основанные на интерполировании двукратными узлами. Модель позволяет применить к экспериментальным исследованиям элементов конструкций развитые численные методы, в частности численное дифференцирование. Предложены методы экспериментального определения внутренних силовых факторов одной-двумя измерительными ячейками.

В расчетной схеме элемента конструкции его геометрическую форму приводим к канонизированной форме упругого изотропного бруса, стержня, балки. При поперечном изгибе на продольном регистрационном участке прямоосного элемента конструкции с постоянной жесткостью на изгиб EI в отсутствии распределенной нагрузки дифференциальное уравнение упругой линии имеет вид

$$y^{\mathrm{IV}}(x) = 0; \tag{1}$$

внутренние силовые факторы: изгибающий момент $M(x)$ и перерезывающая сила Q — вычисляются через вторую и третью производные прогиба

$$M(x) = EI\, y''(x), \quad Q = Q(x) = EI\, y'''(x). \tag{2}$$

В задаче вычисления производных прогиба и определения внутренних силовых факторов используем интерполирование с заданием функции прогиба $y(x)$ и наклона упругой линии $y'(x)$ конечными значениями (отсчетами) $y(x_i)$ и $y'(x_i)$ в точках x_i — узлах интерполирования с шагом $L > 0$ при $x_{i+1} = x_i + L$, $i = 0, 1,\ldots,n$. Значение r-производной $y^{(r)}(x)$ представляем линейной функцией от значений $y(x_i)$ и $y'(x_i)$ [2]. Тогда r-производная в узле x_s для $r \in (1, 2,\ldots,2n+1)$, $s \in (0, 1,\ldots,n)$ представима интерполяционным многочленом с двукратными узлами

$$y^{(r)}(x_s) = \frac{1}{L^r}\sum_{i=0}^{n}[H_{nrsi}\, y(x_i) + LC_{nrsi}\, y'(x_i)], \tag{3}$$

где H_{nrsi} и C_{nrsi} — действительные четырехиндексные коэффициенты Эрмита, значения которых вычисляются по алгоритму, изложенному в [3].

Учитывая (2) и (3), получаем выражения для вычисления внутренних силовых факторов:

$$M(x_s) = \frac{EI}{L^2}\sum_{i=0}^{n}[H_{n2si}\, y(x_i) + LC_{n2si}\, y'(x_i)],$$

$$Q(x_s) = \frac{EI}{L^3}\sum_{i=0}^{n}[H_{n3si}\, y(x_i) + LC_{n3si}\, y'(x_i)].$$

В информационно-технической системе с оптической, лазерной системой технического зрения сканируем измерительные ячейки в виде линейных рисок, нанесенных на боковую поверхность элемента конструкции в его нейтральном слое, измеряем линейные $y(x_i)$ и угловые $y'(x_i)$ перемещения измерительных ячеек. Количество измерительных ячеек равно $n + 1$. Основной составляющей погрешности метода является погрешность математической модели (1). Погрешность создает неопределенность граничных условий: обмятия элемента конструкции у опор, податливость опор, неоднородность полей деформаций и перемещений в элементе конструкции вблизи опор. Для ослабления влияния граничных условий с учетом принципа Сен-Венана регистрационный участок элемента конструкции следует выбирать на расстоянии от опор, большем меньшего размера поперечного сечения элемента конструкции. Минимальное число измерительных ячеек равно двум.

С учетом значительной стоимости систем технического зрения в исследованиях строительных конструкций еще широко используются механические и электромеханические прогибомеры и клинометры, вносящие в методику ис-

следований существенную инструментальную погрешность. Вариантом фактического использования рассматриваемого интерполирования является применение для определения опорных моментов балки преобразователя с клинометрами у опор и одним, тремя прогибомерами [4]. Точность преобразователя невелика из-за невыполнения принципа Сен-Венана и значительного влияния инструментальной погрешности трех датчиков.

В авиационной аппаратуре эффективно применяются преобразователи поперечной нагрузки с датчиками в виде навесных измерительных ячеек. Главное достоинство преобразователей — снижение количества датчиков до одного — двух и соответственное снижение инструментальной погрешности, т. е. достигнут уровень основной погрешности аппаратуры 1% [5]. Необходимо отметить, что при широком распространении таких преобразователей за рубежом они еще недостаточно изучены и мало распространены в нашей стране, результаты некоторых исследований и научно-технических работ изложены в [2, 3, 5–8].

Схема преобразователя поперечной нагрузки с навесной двухопорной измерительной ячейкой представлена на рис. 1. Элемент конструкции *1* преобразует поперечную нагрузку: силу P и изгибающий момент M — в перемещения измерительных опор *2* и *3* на регистрационном участке длиной L, расположенном на расстоянии $L_п$ от приложенной поперечной нагрузки и на расстоянии $L_с$ от опорного сечения, а также в действующие (например, в поперечном сечении с координатой $x_и$) внутренние силовые факторы: перерезывающую силу Q и изгибающий момент $M_и$. Линейные и угловые перемещения опор передаются навесной измерительной ячейке, включающей механический координатный преобразователь из опорного кронштейна *4* высотой h_0 и измерительного кронштейна *5* длиной a. Кронштейны через упор (или шарнир) *6* воздействуют на передающий преобразователь *7*. Передающий преобразователь может отсутствовать, тогда относительное перемещение кронштейнов *4* и *5* измеряется системой технического зрения.

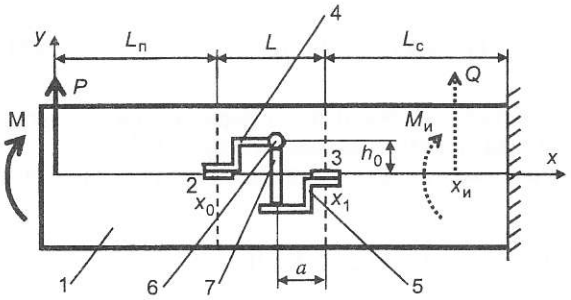


Рис. 1. Схема преобразователя поперечной нагрузки

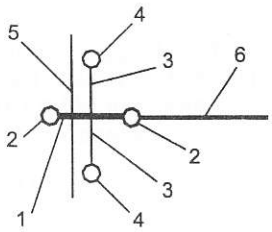


Рис. 2. Линейная вильчатая опора

Сравнение опор измерительной ячейки. В преобразователях поперечной нагрузки с навесными двухопорными измерительными ячейками используются измерительные опоры в виде приливов, бобышек на элементе конструкции, а также совмещенные с элементами координатного преобразователя образующие скоб и хомутов. Выделим измерительную опору, имеющую в сочленении с элементом конструкции узкое поперечное сечение. В частности, у опоры с ножевой кромкой ширина сечения намного меньше высоты. Если больший размер сечения опоры значительно меньше наименьшего размера поперечного сечения регистрационного участка силового элемента, то линейное перемещение такой опоры представляем перемещением центральной точки сечения следа опоры на элементе конструкции — прогибом, а угловое перемещение углом поворота малого линейного элемента, совмещенного с большой осью следа опоры — углом наклона упругой линии. Такую измерительную опору называем линейной.

Аппроксимируем линейной опорой, показанную на рис. 2 вильчатую опору [1]. Основным элементом опоры является жесткая двухзубцовая вилка *1* с зубцами-шипами *2*. Линия, проходящая через вершины зубцов, определяет

ориентацию опоры. Вилка для придания ей устойчивости гибкими перемычками — пластинчатыми пружинами *3* соединена с точечными упорами *4* со скругленными тупыми вершинами. Вилка прикреплена к поверхности элемента конструкции гибкой связью *5*. К опоре в направлении другой опоры измерительной ячейки прикреплен кронштейн (или стрелка) *6* — аналог кронштейнов *4* или *5* на рис. 1. Наиболее точной является вильчатая опора, в ней отсутствует эффект проскальзывания, вызывающий гистерезис поворота опоры при деформировании элемента конструкции, что может быть у опоры с жесткой ножевой кромкой. Прилив обладает в сравнении с вильчатой опорой большей механической прочностью, однако, являясь концентратором напряжений, он создает местное искажение поля деформаций, тем самым вносит погрешность в принятые функции $y(x_i)$ и $y'(x_i)$.

Разделение внутренних силовых факторов на измеряемую и влияющие величины. Выходной сигнал измерительной ячейки U имеет вид

$$U = K\Delta_a, \tag{4}$$

где K — коэффициент преобразования передающего преобразователя; Δ_a — входной измерительный сигнал передающего преобразователя, который по рис. 1 можно определить как

$$\Delta_a = y(x_0) - y(x_1) + a[y'(x_1) - y'(x_0)] + Ly'(x_0), \tag{5}$$

где x_0, x_1 — координаты соответственно опор *2* и *3* на рис. 1.

Расчетной моделью (5) характеризуем измерительную ячейку с линейными опорами. В модели (5) отсутствует параметр h_0, так как для дальнейшего разделения переменных Q и $M(x)$ принято условие $h_0 = 0$ [5]. Модель преобразователя (5) является преобразованием многочлена (3) при $n = 1$ с четырьмя входными величинами $y(x_0)$, $y(x_1)$, $y'(x_0)$ и $y'(x_1)$ в линейную функцию (4) с одной входной величиной Δ_a.

Учитывая (3), для r-производной прогиба в точке x_s преобразуем выражение (5) к виду

$$\Delta_a = L^r y^{(r)}(x_s) / H_{1rs0}, \quad r = 2, 3 \tag{6}$$

при длине измерительного кронштейна $a = a_{rs} = LC_{1rs1} / H_{1rs0}$, где по [3] $H_{1200} = -6$, $H_{1210} = 6$, $H_{1300} = H_{1310} = 12$, $C_{1201} = -2$, $C_{1211} = 4$, $C_{1301} = C_{1311} = 6$.

Таким образом, преобразования (2), (4) и (6) позволяют изменением длины измерительного кронштейна в измерительной ячейке разделить перерезывающую силу и изгибающие моменты в поперечных сечениях элемента конструкции с координатами x_0 и x_1 на измеряемую и влияющие величины из совокупности величин:

$$Q_0 = Q_1 = Q(x) = Q = EI\, H_{1300} U / (KL^3) \text{ при } a = a_{30} = LC_{1301} / H_{1300},$$

$$M_0 = M(x_0) = EI\, H_{1200} U / (KL^2) \text{ при } a = a_{20} = LC_{1201} / H_{1200},$$

$$M_1 = M(x_1) = EI\, H_{1210} U / (KL^2) \text{ при } a = a_{21} = LC_{1211} / H_{1210}.$$

Для уравнения (1) имеет место соотношение

$$y''(x_и) = y''(x_0) + (x_и - x_0)\, y'''(x_0). \tag{7}$$

Тогда из уравнений (3), (5), (7) выражение связи входного измерительного сигнала передающего преобразователя измерительной ячейки с производной $y''(x_и)$ может быть представлено в виде

$$\Delta_a = L^2 y''(x_и) / H_и,$$

где $H_и$ — приведенный коэффициент преобразования:

$$H_и = H_{1200} + H_{1300} x_{иL}, \tag{8}$$

$x_{иL} = (x_и - x_0)/L$ — безразмерная относительная координата поперечного сечения $x_и$ элемента конструкции. Здесь измерительный кронштейн должен

быть длиной $a = a_{2и} = a_{иL}L$, где $a_{иL}$ — безразмерная относительная длина измерительного кронштейна:

$$a_{иL} = (C_{1201} + C_{1301}x_{иL}) / H_и. \quad (9)$$

Таким образом, преобразователем поперечной нагрузки определяется изгибающий момент не только в поперечных сечениях с дискретными координатами x_s, но, например, в поперечном сечении элемента конструкции (рис. 1) с координатой $x_и (x_и \neq x_0 + L/2)$:

$$M_и = M(x_и) = M(x_0) + Q(x_и - x_0)$$

по формуле

$$M(x_и) = EI\, H_и U / (KL^2).$$

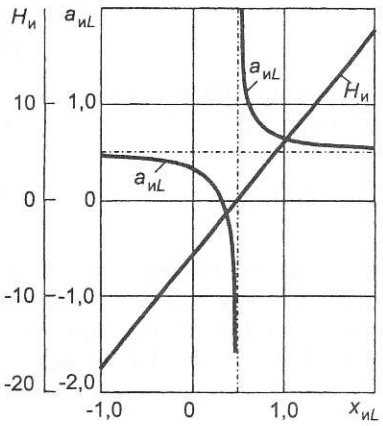


Рис. 3. Приведенный коэффициент преобразования изгибающего момента и относительная длина измерительного кронштейна

На рис. 3 показаны графики коэффициента $H_и$ по выражению (8) и характеристики $a_{иL}$ по выражению (9). Прямые $x_{иL} = 0{,}5$ и $a_{иL} = 0{,}5$ — асимптоты линии (9). Графики характеризуют неопределенность преобразования изгибающего момента в среднем поперечном сечении регистрационного участка при $x_{иL} = 0{,}5$ и трудность физической реализации преобразователя при $a_{иL} < -1$ и $a_{иL} > 2$, $x_{иL} < -1$ и $x_{иL} > 2$. Изгибающий момент в среднем сечении регистрационного участка определяем преобразователем поперечной нагрузки с двумя однотипными измерительными ячейками на общем регистрационном участке:

$$M(x_0 + L/2) = EI\,(U_1 - U_0) / (KL^2),$$

где U_1 — выходной сигнал первой измерительной ячейки с измерительным кронштейном длиной $a = 0$;

U_0 — выходной сигнал второй измерительной ячейки с измерительным кронштейном длиной $a = L$ [7].

Дополняем полученную математическую модель преобразователя поперечной нагрузки неравенствами, определяющими область допустимых значений переменных, условиями математической определенности задачи и физической реализуемости преобразователя, в том числе условиями принципа Сен-Венана $L_п > h$, $L_с > h$, $x_и > h$, $L_п + L_с + L - x_и > h$, где h — высота поперечного сечения регистрационного участка.

На элемент конструкции, кроме поперечной нагрузки, может воздействовать крутящий момент, влияние которого устраняется применением двух измерительных ячеек, размещенных симметрично по бокам элемента конструкции с включением передающих преобразователей в общую схему обработки сигнала [8].

Физическое моделирование. Для проверки модели исследования силовых факторов проводилось моделирование элементов конструкции. Использовались физические модели: модель *1* — консоль по рис. 1 (высота поперечного сечения h = 160 мм, ширина сечения b = 25 мм, модуль упругости E = 89 кПа, опоры 0,2×10 мм); модель *2* — консоль по рис. 1 (h = 82 мм, b = 25 мм, E = 93 кПа, опоры 0,2×10 мм); модель *3* — двухопорная балка — полый цилиндр (h = 99,5 мм, толщина стенки 9,0 мм, E = 210 ГПа, опоры 6,0×6,0 мм); модель *4* — двухопорная балка — полый цилиндр (h = 109,5 мм, толщина стенки 8,0 мм, E = 210 ГПа, опоры 20×20 мм). Диапазон испытаний ограничивался пределом пропорциональности, тремя циклами, в каждом из которых нагрузка возрастала от нуля до максимума, затем убывала до нуля. Варьировались также параметры L (от 80 до 285 мм), $L_п$ (от 65 до 240 мм), a_L (от 0 до 1). Индикаторами И402, ИОПР-12, 02-ИПМ, 1-ИПМ измерялась величина Δ_a. На модели *1* так-

же испытывался способ [7] определения изгибающего момента в среднем сечении регистрационного участка.

У преобразователей момента $M_и$ и силы Q относительная погрешность величины Δ_a на моделях *1* и *2* не превысила погрешности нагрузочных и отсчетных устройств, на моделях *3* и *4* достигла 6%. У преобразователя силы Q по расчетной относительной длине $a_{30L} = a_{30}/L = 0{,}500$ измерительного кронштейна *5* на рис. 1 с вероятностью 0,95 получены среднее арифметическое результатов 0,490 и доверительные границы погрешности ± 0,020.

Обсуждение результатов и выводы. Проведенные исследования позволили выявить общие закономерности экспериментального определения второй и третьей производной прогиба, разделения внутренних силовых факторов при поперечном изгибе элемента конструкции на измеряемый и влияющие. При использовании измерительных ячеек в виде линейных рисок на элементе конструкции и системы технического зрения количество ячеек сведено к двум, а число измеряемых величин к четырем. При использовании навесных двухопорных измерительных ячеек уменьшается их количество и число измеряемых величин (относительных смещений кронштейнов) до двух–одного, соответственно уменьшается инструментальная погрешность, причем при использовании двух измерительных ячеек они однотипны. Размещать измерительные ячейки следует с учетом принципа Сен-Венана. Результаты физического моделирования свидетельствуют о достоверности и эффективности математической модели преобразования силовых факторов с учетом обоснованного выбора измерительных опор линейными. Использование квадратных опор дало ожидаемое увеличение погрешности. Предложенная модель исследования внутренних силовых факторов при поперечном изгибе элемента конструкции позволяет наиболее полно исключить влияние условий закрепления элемента конструкции на величины определяемых силовых факторов, использовать измерительные средства и методику расчета, основанные на численном дифференцировании с интерполированием двукратными узлами на единой методической основе. Таким образом, использование результатов выполненных исследований позволяет повысить на стадии проектирования системы управления испытаниями конструкций качество исследования силовых факторов, действующих в элементах конструкций.

Предложенные математические и физические модели преобразователей прошли успешное апробирование в Курском ГТУ и в Курском ОАО "Прибор".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин В. П. Численные методы решения задач строительной механики: Справ. пособие/ В. П. Ильин, В. В. Карпов, А. М. Масленников.— Минск: Выш. шк., 1990.— 349 с.
2. Захаров И. С. Эрмитова интерполяция двукратными узлами/И. С. Захаров, А. П. Локтионов//Вестник Тамбов. ун-та.— Тамбов, 2000.— Т. 5.— Вып. 4.— С. 454–456.
3. Захаров И. С. О численном дифференцировании при эрмитовой интерполяции двукратными узлами/И. С. Захаров, А. П. Локтионов//Изв. Курского ГТУ.— Курск.— 2003.— № 1(10) — С. 75–79.
4. Землянский А. А. Обследование и испытание зданий и сооружений/А. А. Землянский.— М.: Изд-во АСВ, 2000.— 240 с.
5. Локтионов А. П. Об измерении изгибающих нагрузок навесными электротензометрическими преобразователями/А. П. Локтионов//Изв. вузов. Авиационная техника.— 1982.— № 2.— С. 73–75.
6. Тарасов В. В. ОКБ «Авиаавтоматика». 45 лет созидания. Годы и люди/В. В. Тарасов.— М.: ООО «Издательская группа Бетретдинов и Ко», 2003.— 144 с.
7. А. с. (СССР) № 1059452. Способ измерения изгибающего момента/А. П. Локтионов.— Опубл. 1982.
8. А. с. (СССР) № 556355. Устройство измерения поперечной нагрузки на брус/А. П. Локтионов.— Опубл. 1977.

© Локтионов А. П., 2005

Получено после доработки 17.02.05

УДК 624.073

Р. П. МОИСЕЕНКО, канд. техн. наук, доц. (Томский государственный архитектурно-строительный университет)

МАТРИЧНАЯ ФОРМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА В РАСЧЕТАХ РЕБРИСТЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН НА СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Представлена матричная форма энергетического метода для расчета пластин на собственные колебания, которая реализуется с помощью блока символьной математики компьютерных систем Maple, Matlab, Mathcad, Mathematica.

Введение. Энергетический метод расчета тонких прямоугольных пластин получил матричное оформление сравнительно недавно. В работах Н. А. Алфутова, И. М. Бабакова, В. В. Болотина, А. С. Вольмира, Ю. Н. Работнова, А. Р. Ржаницина, А. П. Филиппова и многих других ученых энергетический метод в матричной форме вообще не представлен. В работах семидесятых годов и по настоящее время алгоритм расчета тонких пластин энергетическим методом записывается в матричной форме на последнем этапе, когда составляются выражение полной энергии, система линейных уравнений, вековое уравнение или уравнение устойчивости, например [1]. Однако подготовительный этап по вычислению элементов соответствующих матриц проводится с помощью громоздких интегральных выражений. При этом алгоритм теряет наглядность матричной формы, способной в сжатом виде представить зависимость между исходными данными и конечным результатом. Целостным алгоритм энергетического метода в матричной форме будет в том случае, если исходную функцию прогибов представить также в матричной форме, а не в виде ряда, как это делается по общепринятой процедуре.

Описание алгоритма. Возможны несколько вариантов матричной формы ряда, аппроксимирующего прогибы прямоугольной пластины. Для ряда [2]

$$w = \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} a_{ij} X_i Y_j \tag{1}$$

предлагаются следующие два варианта:

$$w = x_0^* Y_0 a \tag{2}$$

или

$$w = y_0^* X_0 a, \tag{3}$$

где $a^* = (a_1 \ldots a_k \ldots a_N)$, $N = mn$, $k = i + m(j-1)$;

$$x_0^* = (\underbrace{x_1 \ldots x_m}_{1} \ldots \underbrace{x_1 \ldots x_m}_{n}), \quad y_0^* = (\underbrace{y_1 \ldots y_1}_{m} \ldots \underbrace{y_n \ldots y_n}_{m});$$

$$X_0^* = \mathrm{diag}\,(\underbrace{x_1 \ldots x_m}_{1} \ldots \underbrace{x_1 \ldots x_m}_{n}), \quad Y_0^* = \mathrm{diag}\,(\underbrace{y_1 \ldots y_1}_{m} \ldots \underbrace{y_n \ldots y_n}_{m});$$

x_i, y_j — балочные функции:

$$x_i = \sin(\lambda_i \xi) + A_i \cos(\lambda_i \xi) + B_i \mathrm{sh}(\lambda_i \xi) + C_i \mathrm{ch}(\lambda_i \xi); \tag{4}$$

$$y_j = \sin(\mu_j \eta) + A_j \cos(\mu_j \eta) + B_j \mathrm{sh}(\mu_j \eta) + C_j \mathrm{ch}(\mu_j \eta). \tag{5}$$

Здесь $\xi = x / l_x$ — относительная координата в направлении оси x;
$\eta = y / l_y$ — относительная координата в направлении оси y;
l_x, l_y — размеры пластины в плане.

Структура вектора x_0 и матрицы Y_0 (или y_0, X_0) такова, что суммирование по индексам i, j в выражении (1) заменяется произведением векторов и матриц в выражениях (2), (3). Дальнейшие выкладки основаны на выражении (3).

Потенциальная энергия деформации пластины [2]

$$U_0 = 0{,}5D\iint\left[w_{xx}^2 + 2w_{xx}w_{yy} + w_{yy}^2 - 2(1-\mu)(w_{xx}w_{yy} - w_{xy}^2)\right]dxdy \qquad (6)$$

записывается в матричной форме в результате следующих преобразований.

Первая производная w_x равна

$$w_x = (1/l_x)\,y_0^*\Lambda_x X_1 a, \qquad (7)$$

где

$$\Lambda_x = \mathrm{diag}\,(\underbrace{\lambda_1\ldots\lambda_m}_{1}\ldots\underbrace{\lambda_1\ldots\lambda_m}_{n}),\quad X_1 = \mathrm{diag}\,(\underbrace{x_1'\ldots x_m'}_{1}\ldots\underbrace{x_1'\ldots x_m'}_{n});$$

$$x_i' = \cos(\lambda_i\xi) - A_i\sin(\lambda_i\xi) + B_i\mathrm{ch}(\lambda_i\xi) + C_i\mathrm{sh}(\lambda_i\xi);$$

λ_i — параметр аргумента балочных функций, имеющий смысл собственного значения в задаче о собственных колебаниях балок.

Вторая производная w_{xx} равна

$$w_{xx} = (1/l_x^2)\,y_0^*\Lambda_x^2 X_2 a, \qquad (8)$$

где

$$X_2 = \mathrm{diag}\,(\underbrace{x_1''\ldots x_m''}_{1}\ldots\underbrace{x_1''\ldots x_m''}_{n});$$

$$x_i'' = -\sin(\lambda_i\xi) - A_i\cos(\lambda_i\xi) + B_i\mathrm{sh}(\lambda_i\xi) + C_i\mathrm{ch}(\lambda_i\xi).$$

Первая производная w_y равна

$$w_y = (1/l_y)\,y_1^*\Lambda_y X_0 a, \qquad (9)$$

где

$$\Lambda_y = \mathrm{diag}\,(\underbrace{\mu_1\ldots\mu_1}_{m}\ldots\underbrace{\mu_n\ldots\mu_n}_{m}),\quad y_1^* = (\underbrace{y_1'\ldots y_1'}_{m}\ldots\underbrace{y_n'\ldots y_n'}_{m});$$

y_j' — функция, аналогичная x_i';

μ_j — параметр, аналогичный λ_i.

Вторая производная w_{yy} равна

$$w_{yy} = (1/l_y^2)\,y_2^*\Lambda_y^2 X_0 a, \qquad (10)$$

где

$$y_2^* = (\underbrace{y_1''\ldots y_1''}_{m}\ldots\underbrace{y_n''\ldots y_n''}_{m});$$

y_j'' — функция, аналогичная x_i''.

Вторая смешанная производная w_{xy} равна

$$w_{xy} = (1/l_x l_y)\,y_1^*\Lambda_y X_1\Lambda_x a. \qquad (11)$$

Квадраты и произведения производных в выражении (6) записываются с учетом транспонирования векторов и матриц:

$$w_{xx}^2 = (1/l_x^4)\,a^* X_2\Lambda_x^2 y_0 y_0^*\Lambda_x^2 X_2 a; \qquad (12)$$

$$w_{yy}^2 = (1/l_y^4)\,a^* X_0\Lambda_y^2 y_2 y_2^*\Lambda_y^2 X_0 a; \qquad (13)$$

$$w_{xx}w_{yy} = (1/l_x^2)(1/l_y^2)\,a^* X_2\Lambda_x^2 y_0 y_2^*\Lambda_y^2 X_0 a; \qquad (14)$$

$$w_{xy}^2 = (1/l_x^2)(1/l_y^2)\,a^*\Lambda_x\Lambda_y X_1 y_1 y_1^* X_1\Lambda_y\Lambda_x a. \qquad (15)$$

Интегралы выражений (12)–(15) имеют следующий вид:

$$\iint w_{xx}^2\,dxdy = (\alpha/l_x^2)\,a^*\Lambda_x^2\Lambda_1\Lambda_x^2 a, \qquad (16)$$

где

$$\Lambda_1 = \int_0^1\int_0^1 (X_2 y_0 y_0^* X_2)\, d\xi d\eta; \tag{17}$$

$$\iint w_{yy}^2 dxdy = (1/(\alpha^3 l_x^2))a^* \Lambda_y^2 \Lambda_2 \Lambda_y^2 a, \tag{18}$$

где

$$\Lambda_2 = \int_0^1\int_0^1 (X_0 y_2 y_2^* X_0)\, d\xi d\eta; \tag{19}$$

$$\iint w_{xx} w_{yy} dxdy = (1/(\alpha l_x^2))a^* \Lambda_x^2 A_3 \Lambda_y^2 a, \tag{20}$$

где

$$A_3 = \int_0^1\int_0^1 (X_2 y_0 y_2^* X_0)\, d\xi d\eta; \tag{21}$$

$$\iint w_{xy}^2 dxdy = (1/(\alpha l_x^2))a^* \Lambda_x \Lambda_y A_4 \Lambda_y \Lambda_x a, \tag{22}$$

где

$$A_4 = \int_0^1\int_0^1 (X_1 y_1 y_1^* X_1)\, d\xi d\eta. \tag{23}$$

Здесь $\alpha = l_y / l_x$, Λ — обозначение диагональной матрицы.

В выражениях (17), (19), (21), (23) подынтегральными выражениями являются матрицы, т.е. имеется в виду поэлементное интегрирование матрицы. Такое представление интегралов от матриц не является новым, в [3] использованы аналогичные выражения в алгоритме метода конечных элементов.

Выражение (6) принимает следующий вид:

$$U_0 = (D\alpha / (2l_x^2))a^* \left\{ \begin{array}{l} \Lambda_x^2 \Lambda_1 \Lambda_x^2 + (2/\alpha^2)\Lambda_x^2 A_3 \Lambda_y^2 + (1/\alpha^4)\Lambda_y^2 \Lambda_2 \Lambda_y^2 - \\ -(2(1-\mu)/\alpha^2)(\Lambda_x^2 A_3 \Lambda_y^2 - \Lambda_x \Lambda_y A_4 \Lambda_y \Lambda_x) \end{array} \right\} a. \tag{24}$$

Кинетическая энергия пластины [2]

$$T_0 = (\rho h_0 \omega^2 / 2)\iint w^2 dxdy \tag{25}$$

выражается через w^2 в матричной форме:

$$T_0 = (\rho h_0 \omega^2 \alpha l_x^2 / 2)a^* \Lambda_5 a, \tag{26}$$

где

$$\Lambda_5 = \int_0^1\int_0^1 (X_0 y_0 y_0^* X_0)\, d\xi d\eta; \tag{27}$$

ρ — плотность материала;
h_0 — толщина пластины;
ω — частота собственных колебаний.

Кинетическая энергия сосредоточенной массы M равна [2]

$$T_m = (M\omega^2 / 2)w_m^2. \tag{28}$$

Пусть M выражается через массу пластины с помощью коэффициента k: $M = k\rho h_0 \alpha l_x^2$. Тогда

$$T_m = (k\rho h_0 \alpha l_x^2 \omega^2 / 2)a^* (X_0 y_0 y_0^* X_0)_{xm\,ym} a, \tag{29}$$

где индексы xm, ym означают координаты сосредоточенной массы, которые подставляются в компоненты — функции матрицы X_0 вектора y_0. Общая кинетическая энергия пластины, несущей M масс, записывается в виде

$$T = (\rho h_0 \alpha l_x^2 \omega^2 / 2) a^* \left[\Lambda_5 + \sum_{i=1}^{M} k_i (X_0 y_0 y_0^* X_0)_1 \right] a. \tag{30}$$

Потенциальная энергия ребра, параллельного оси y, [2]

$$U_r = (EI / 2) \int w_{yy}^2 (x_r) dy \tag{31}$$

в матричной форме имеет вид

$$U_r = (EB_r h_r^3 / (6\alpha^3 l_x^2)) a^* \Lambda_y^2 X_0 (x_r) A_6 X_0 (x_r) \Lambda_y^2 a, \tag{32}$$

где

$$A_6 = \int_0^1 y_2 y_2^* d\eta; \tag{33}$$

$B_r = b_r / l_x$ — относительная ширина ребра;
b_r — ширина прямоугольного сечения ребра:
h_r — высота прямоугольного сечения ребра.

При переходе от (31) к выражению (32) использована рекомендация С. П. Тимошенко [4], согласно которой для одностороннего ребра момент инерции равен $I = b_r h_r^3 / 3$.

Кинетическая энергия ребра [2]

$$T_r = (\rho h_r b_r \omega^2 / 2) \int w^2 (x_r) dy \tag{34}$$

в матричной форме имеет вид

$$T_r = (\rho h_r B_r \alpha l_x^2 \omega^2 / 2) a^* X_0 (x_r) A_7 X_0 (x_r) a, \tag{35}$$

где

$$A_7 = \int_0^1 y_0 y_0^* d\eta. \tag{36}$$

Закон сохранения энергии [2] после вынесения общего множителя $D\alpha / (2l_x^2)$ записывается в виде

$$a^* \left[U_0 + \sum_{r=1}^{R} U_r - \lambda \left(T + \sum_{r=1}^{R} T_r \right) \right] a = 0, \tag{37}$$

где

$$\begin{aligned} U_0 = {} & \Lambda_x^4 \Lambda_1 + (2/\alpha^2) \Lambda_x^2 A_3 \Lambda_y^2 + (1/\alpha^4) \Lambda_y^4 \Lambda_2 - \\ & - (2(1-\mu)/\alpha^2)(\Lambda_x^2 A_3 \Lambda_y^2 - \Lambda_x \Lambda_y A_4 \Lambda_y \Lambda_x); \end{aligned} \tag{38}$$

$$U_r = (B_r H_r^3 4 (1-\mu^2) / \alpha^4) \Lambda_y^2 X_0 (x_r) A_6 X_0 (x_r) \Lambda_y^2; \tag{39}$$

$$T = \Lambda_5 + \sum_{i=1}^{M} k_i (X_0 y_0 y_0^* X_0)_i; \tag{40}$$

$$T_r = (B_r H_r) X_0 (x_r) A_7 X_0 (x_r), \tag{41}$$

$H_r = h_r / h_0$ — относительная высота ребра,
$\lambda = \rho h_0 l_x^4 \omega^2 / D$ — собственное значение обобщенной задачи на собственные колебания ребристой пластины.

Уравнение частот получается из уравнения (37) в соответствии с теоретическим обоснованием энергетического метода.

$$\left| U_s - \lambda T_s \right| = 0, \tag{42}$$

где

$$U_s = U_0 + U_r; \tag{43}$$

$$T_s = T + T_r. \tag{44}$$

Таким образом, для составления уравнения частот необходимо на основе балочных функций сформировать векторы y_0, y_1, y_2 и матрицы X_0, X_1, X_2, Λ_x, Λ_y. Численная реализация уравнения (42) возможна на основе использования символьной математики таких компьютерных систем, как Maple, Matlab, Mathcad, Mathematica. Отсутствие индексов в приведенном алгоритме значительно упрощает программирование.

Разработанная матричная форма энергетического метода является универсальной. Расчет на прочность и устойчивость проводится в аналогичной форме после замены кинетической энергии потенциалом внешней нагрузки. В этом случае используются соответствующие аппроксимирующие функции x_i, y_j в выражении (2) или (3) и составляется матричная форма потенциала внешней нагрузки.

Пример анализа с помощью матричной формы. В статье [5] показано, что при оптимальном распределении материала ребер одинаковой высоты удельные функционалы — действия ребер равны между собой. Тогда, учитывая (39) и (41), можно записать

$$\begin{aligned} &a^* X_0(x_i)[(H^3 4(1-\mu^2)/\alpha^4)\Lambda_y^2 A_6 \Lambda_y^2 - \lambda H A_7] X_0(x_i) a = \\ &= a^* X_0(x_j)[(H^3 4(1-\mu^2)/\alpha^4)\Lambda_y^2 A_6 \Lambda_y^2 - \lambda H A_7] X_0(x_j) a. \end{aligned} \tag{45}$$

Известно, что если две противоположные кромки пластины опираются шарнирно, то пластина по существу рассчитывается как стержень. В этом случае уравнение (45) упрощается, так как при определении первой частоты достаточно учесть только одну синусоиду в направлении оси y (в ряде (1) $n = 1$, и тогда $A_6 = A_7 = C$).

$$a^* X_0(x_i) C X_0(x_i) a = a^* X_0(x_j) C X_0(x_j) a, \tag{46}$$

где

$$C = \underbrace{\begin{pmatrix} 11..1 \\ 11..1 \\ \ldots\ldots \\ 11..1 \end{pmatrix}}_{m} \Bigg\} m. \tag{47}$$

Матрицу C можно представить в виде $C = ee^*$, где $e^* = \underbrace{(1,..1)}_{m}$. Тогда уравнение (46) принимает вид

$$a^* X_0(x_i) e e^* X_0(x_i) a = a^* X_0(x_j) e e^* X_0(x_j) a. \tag{48}$$

Если билинейную форму $e^* X_0 a$ умножить на $\sin(\pi y / l_y)$, то получится функция прогибов (1). Тогда уравнение (48) записывается в виде

$$w_i^2 = w_j^2. \tag{49}$$

Следовательно, при шарнирном закреплении двух противоположных кромок оптимальная пластина с ребрами одинаковой высоты изгибается в режиме собственных колебаний так, что квадраты прогибов всех ребер одинаковы. Этот вывод совпадает с результатом, полученным в статье [6] для оптимальных стержней с упругими опорами.

Пример показывает, что представление прогибов и всего алгоритма энергетического метода в матричной форме позволяет не только производить вычисления, но и проводить аналитические выкладки для выявления существенных физических свойств тонких пластин.

Выводы. Энергетический метод, применяемый для расчета пластин более ста лет, не имеет полного матричного оформления. Матрицы уравнений метода Ритца, векового уравнения или уравнения устойчивости формируются на основе громоздких выражений, которые порождаются знаками сумм, используемых при записи ряда прогибов.

Предлагается отказаться от знаков суммы двойного ряда функции прогибов и представить прогибы в компактной матричной форме. Вектор и матрица, через которые выражаются прогибы, составлены из элементов-функций. В расчетах на собственные колебания элементы-функции являются балочными функциями.

Составлен алгоритм расчета тонких пластин на собственные колебания энергетическим методом в полной матричной форме. Исходными для расчета являются: вектор балочных функций в направлении оси y (или x); диагональная матрица балочных функций в направлении оси x (или y); соответствующие векторы и диагональные матрицы первых и вторых производных от балочных функций; диагональные матрицы параметров, входящих в аргумент балочных функций. Исходные векторы и матрицы позволяют представить процедуру энергетического метода в виде операций над матрицами.

В общем случае матричная форма энергетического метода может быть реализована только с использованием пакета символьной математики компьютерных систем Maple, Matlab, Mathcad, Mathematica. Для пластин с шарнирными опорами матричная форма энергетического метода реализуется без символьной математики компьютерных систем, потому что в этом случае интегрирование матричных элементов-функций является простейшим действием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. В. Основы теории упругости и пластичности/А. В. Александров, В. Д. Потапов.— М.: Высшая школа, 2002.— 399 с.
2. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем/А. П. Филиппов.— М.: Машиностроение, 1970.— 734 с.
3. Безухов Н. И. Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач/Н. И. Безухов, О. В. Лужин.— М.: Высшая школа, 1974.— 200 с.
4. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек/С. П. Тимошенко.— М.: Наука, 1971.— 807 с.
5. Моисеенко Р. П. Свойства ребристых пластин минимального веса при заданной первой частоте собственных колебаний/Р. П. Моисеенко//Изв. вузов. Строительство.— 2003.— № 2.— С. 16–19.
6. Ляхович Л. С. Оптимизация жесткостей упругих связей при ограничениях на величину первой частоты собственных колебаний/Л. С. Ляхович, А. Н. Плахотин//Изв. вузов. Строительство.— 1986.— № 7.

© Моисеенко Р. П., 2005

Получено после доработки 09.02.05

УДК 711 : 352.075.2

Н. А. ПУЗИНА, канд. архит., доц., В. В. ДЕЙНЕКА, асп. (Воронежский государственный архитектурно-строительный университет)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГОРОДСКОМ УПРАВЛЕНИИ*

Рассмотрены в контексте отечественной политики информатизации перспективы и основные направления использования информационных и коммуникационных технологий в практике градостроительства и в сферах городского управления.

В контексте глобальной экономики информация и знания рассматриваются общественным и частным секторами как ключевые организационные ресурсы. Использование информационных технологий во всех областях человеческой деятельности вызвано резким расширением возможностей концентрации, обработки, хранения и использования информации и стимулируется в рамках международных и национальных программ. Так, с начала 1990-х годов в связи со стремительным внедрением новых технологий в развивающихся странах Европейской комиссией была разработана концепция создания информационных потоков и коммуникационных сетей для обеспечения эффек-

* По конкурсу грантов, 2004 г.

тивных путей развития новых технологий. Концепция определила основные задачи для правительств развивающихся стран: гарантировать необходимый уровень развития человеческих ресурсов; гарантировать, что создаваемые сети и оборудование, способы их модернизации и связи между ними соответствуют местным нуждам; гарантировать исполнение общественной властью ее функций, в особенности в разработке регулирующих инструментов, поддерживающих развитие малых и средних предприятий.

Формируя свою национальную политику развития информационных и коммуникационных технологий на десять лет позднее, Россия вынуждена отвечать тем же целям и вызовам, так как вопреки множеству различий между странами проблемы информатизации повсеместно имеют сходный характер. Поэтому целевая федеральная программа «Электронная Россия» также направлена на развитие правовой и институциональной структуры, обеспечение финансовой поддержки в развитии информационной инфраструктуры. Одной из приоритетных целей программы является облегчение проблем доступа к информационным и коммуникационным системам, в особенности к сети Интернет, и создание условий для оказания услуг в электронной форме для обеспечения новых способов коммуникации властей с гражданами и компаниями. Текущие проблемы, решаемые в рамках программы, разнообразны и многоплановы — от правовых аспектов описания программных продуктов, относящихся к вопросам налогообложения и экспорта до организации различного рода фондов, например в рамках ГИС-Ассоциации, для поддержки малых проектов и компаний, начинающих бизнес в данной сфере.

На стадиях разработки и реализации программы международное сотрудничество осуществляется в различных направлениях. Прежде всего, обмен опытом обеспечивается в рамках международных выставок и семинаров в рамках «Инфоком». Кроме того, крупные транснациональные компании, такие как Микрософт и Боинг, принимают участие в ее осуществлении. Сотрудничество с Германией осуществляется в рамках инициативы D-21, ведутся переговоры об аналогичном сотрудничестве с Канадой, Норвегией, Швецией и Японией.

Перспективы использования информационных и коммуникационных технологий в решении широкого ряда задач градостроительного планирования и управления городским развитием также были высоко оценены специалистами многих стран, так как эти технологии имеют высокий потенциал повышения эффективности работы общественного сектора, продолжающего оставаться наиболее крупным пользователем, держателем и распространителем информации. Проведение эффективной политики информатизации в данной сфере требует понимания стратегической ценности информации, умения сбора необходимой, а не всей доступной информации, а также выделения значительных средств на сбор, обработку, хранение и обновление данных о городском развитии. В то же время, решение этой задачи в градостроительстве и городском управлении сталкивается с рядом проблем. В имеющихся теоретических исследованиях в качестве ключевых направлений отмечается необходимость разработки теории градостроительной информации и соответствующей системы сбора, обработки и осмысления информации о протекающих городских процессах и явлениях. Не менее важной задачей является формирование современной научной методологии градостроительного прогнозирования, предусматривающей разработку долгосрочных прогнозов развития градостроительных систем на всех уровнях [1].

Развитые и доступные всем участникам градостроительного процесса информационные системы исключительно важны для городского управления с точки зрения эффективного осуществления решений по развитию городских систем. Городские информационные системы представляют собой пакеты цифровых данных, касающихся всех аспектов городского развития и доступных для компьютерной обработки и анализа. Использование информационных и коммуникационных технологий в городском планировании и управлении может помочь в интеграции различных пакетов данных, увеличить прозрачность с целью снижения коррупции и позволяет совершить значительный скачок в развитии данной сферы деятельности, когда страны могут избежать этапа использования традиционных технологий.

В современной теории известно много примеров использования городских информационных систем в специфическом контексте развития городов в условиях переходной экономики. Например, методика управления процессами пространственного развития города, основанная на пространственных индикаторах (А. Берту) и разработанная с целью анализа, мониторинга и повышения обоснованности принимаемых тактических решений. Сравнивая цели городского развития и регулятивы, установленные планами зонирования в случаях городов Будапешта и Кракова, автором было показано, что формулировка целей сама по себе не имеет самостоятельного воздействия на практику управления. Количественные индикаторы дают управленческую надежность целям развития, обеспечивают последовательность в реализации секторальных политик и гарантируют эффективность работы регулирующих и инвестиционных инструментов, которые должны быть использованы для реализации концепции городского развития.

Российское городское планирование и управление, оперирующее значительными объемами многообразной информации о социальных, экологических, пространственных и иных процессах развития городов, также включено в этот процесс, состояние которого можно оценить пока лишь как стартовое. Современные проблемы информатизации в городском управлении могут быть объединены в две группы. Во-первых, это организационно-технические проблемы, связанные с поиском источников финансирования, выбором программного обеспечения, развитием технологий сбора информации, обменом между многочисленными кадастровыми и информационными системами и т.п. Как правило, участие профессионала-градостроителя в их решении довольно ограниченно. Ко второй группе могут быть отнесены проблемы содержательного характера. В этом случае роль профессионала в определении видов и объемов информации, необходимой для решения проектных, аналитических и управленческих задач, бесспорно, является ведущей.

Ключевым направлением использования информационных технологий в градостроительном проектировании и городском управлении является и внедрение географических информационных систем (ГИС), позволяющих в процессе проектирования гибко оперировать всем объемом необходимой информации, а также использовать ГИС при принятии тактических и стратегических решений [2]. Однако перспективы их широкого внедрения в практику градостроительного проектирования и городского управления пока ограничены как отсутствием системы сбора и обновления информации даже на бумажных носителях, так и разобщенностью имеющихся ведомственных информационных систем и баз данных.

Высокий потенциал повышения эффективности городского управления имеют и коммуникационные технологии. Среди признанных достоинств Интернет-сетей особо отмечается их способность поддержать демократизацию общества и расширить участие общественности, упрочив отношения местных властей и граждан. За последние годы было разработано множество различных инструментов, в первую очередь, Сети гражданского общества, которые внесли в практику городского планирования и управления новые перспективы. Поэтому сегодня в сети «всемирной паутины» можно найти сотни тысяч сайтов, информация и услуги которых открыты как глобальному, так и местному сообществу и направлены на повышение эффективности городского управления, развитие секторов экономики и повышение конкурентоспособности городов и регионов. Некоторые страны, например Италия и Сингапур, даже проводят политику постепенного замещения традиционных способов общения с клиентами в офисе на новые электронные виды общения и предоставления услуг [3].

Поэтому федеральная программа «Электронная Россия» делает особый акцент на развитии коммуникационных технологий, стимулируя на различных уровнях (национальном, региональном и местном) развитие инфраструктуры, повышение доступа к сети Интернет и расширение содержания представляемой в сети информации.

В вопросах развития инфраструктуры информационных и коммуникационных технологий программа содействует развитию каркасной сети на всех

уровнях, привлекая ресурсы ведущих телекоммуникационных компаний. При этом частный сектор инвестирует в развитие инфраструктуры и обеспечивает доступ к сети Интернет школ и создание Интернет-станций на почтовых отделениях с желанием получить свою выгоду от повышения конкурентоспособности городов и регионов.

В целях расширения доступа к сети, были реализованы такие проекты, как RUNNET (Сети Российских Университетов), целью которого является поддержка интеграции вузов в глобальное информационное общество, и программа создания университетских Интернет-Центров, выполненная при совместном финансировании Институтом Открытого Общества (Фонд Сороса) и Правительством РФ. В ее рамках последней были созданы 33 Интернет-Центра в ряде российских университетов. В целях расширения доступа к сети проводится и политика включения стратегий информатизации во все «пилотные» проекты в сферах городского управления на стадии их реализации.

Важной частью программы «Электронная Россия» является и ее региональный раздел, призванный обеспечить координацию с региональными программами развития информационных и коммуникационных технологий, обеспечивая представительство регионов в административных структурах программы, право участия в тендерах и т.д. В то же время основной фактор реализации программы на региональном уровне — это опыт, инициативы и творческие связи, наработанные в регионах в течение последних лет.

Оценивая отечественный опыт использования коммуникационных технологий в сферах городского управления, следует отметить, что первые презентации российских городов появились только в середине 1990-х годов. Эти обычно простые и краткие презентации были выполнены для целей саморекламы и зачастую создавались местными бизнесменами. В последующие несколько лет картина существенно изменилась. Прежде всего, в наиболее динамичных регионах, демонстрирующих экономический рост, возросло количество сайтов городов, представляющих себя в сети Интернет. Так как большинство презентаций все еще представляют электронную коммерцию, различия в числе Интернет-ресурсов косвенно отражают неравномерность в экономическом развитии городов и регионов.

Как показало проведенное нами исследование, за прошедшие годы не только возросло число презентаций городов в сети, но и изменилось их назначение. Происходит трансформация простых презентаций в настоящие инструменты коммуникации, поддерживающие местную демократию и городское управление. Электронные инструменты городского управления, такие как городской маркетинг, финансы и стратегическое планирование, в наибольшей степени разработаны в Москве и Санкт-Петербурге, хотя порой это трудно обнаружить, так как многочисленные сайты различных организаций не связаны между собой. Сайты остальных городов обычно представляют один или два электронных инструмента городского управления, иногда весьма детально разработанные. Наиболее интересными примерами могут служить Интернет-сайты, содержащие информацию о городских бюджетах (гг. Москва, Петрозаводск, Протвино); об инвестиционных политиках и стратегиях (гг. Санкт-Петербург, Обнинск, Волгоград); о стратегических планах развития (гг. Владимир, Санкт-Петербург); об инвестиционных проектах (гг. Астрахань, Калининград, Ярославль); о региональных жилищных фондах (Башкортостан); о жилищных программах (г. Ростов) и жилищных индикаторах (г. Астрахань); электронных услугах в системе «одного окна» (г. Пермь); о Генеральных планах и концепциях городского развития (гг. Пермь, Сургут).

Однако общий уровень развития и использования Интернет-ресурсов в сферах городского планирования и управления в сравнении с развитыми странами пока остается низким. Количество услуг, предоставляемых в электронной форме, пока мало и ограничено базовыми функциями городского управления. Уровень прозрачности в работе городских властей пока низок, хотя в ряде случаев имеются примеры открытого управления. Возможности для соучастия жителей также малы. Системы коммуникации граждан и властей в интерактивном режиме единичны.

В то же время созданные лишь несколько лет назад системы коммуникации с использованием Интернет-ресурсов имеют большой потенциал развития и стремительно набирают опыт включения все более широкого спектра новых инструментов городского планирования и управления. Достоинства этих систем очевидны, так же как и некоторые серьезные ограничения их широкого использования, требующие разработки соответствующих мер по обеспечению широкого доступа клиентов к сети и повышению уровня компьютерной грамотности как профессионалов, так и всех слоев населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоляр И. М. Информатизация как основа градостроительного проектирования в XXI веке/И. М. Смоляр//БСТ.— 2002.— № 7.— С. 14–15.
2. Лежава И. Г. Градостроительное проектирование и ГИСы/И. Г. Лежава//АиСМ.— 2002.— № 2–3.— С. 15.
3. Bajic Brkovic. "E-communication and E-services in Urban Management: Current Trends and Development Perspectives in Yugoslav Cities". Euroconference "European Cities in Transition", Weimar, Germany.— M., 2002.

© Пузина Н. А., Дейнека В. В., 2005

Получено 11.01.05

УДК 666.974 : 539.412 : 004.9

Е. П. МАТУС, канд. техн. наук, доц. (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин))

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ФИБРОБЕТОНА

Рассматривается компьютерная модель расчета предела прочности сталефибробетона при продольном растяжении. Приводится зависимость прочности от параметров армирования. Сравниваются результаты моделирования и экспериментов. Результаты исследований могут быть использованы для оптимизации параметров армирования при изготовлении изделий и дальнейшего усовершенствования моделирующих программ.

Трудности при расчете прочности фибробетона связаны, в первую очередь, с построением модели, учитывающей совместную работу фибр и бетона. Большое количество фибр не позволяет определять влияние каждой из них подобно учету работы арматуры в железобетоне, с другой стороны, размеры волокон не настолько малы, чтобы считать фибробетон однородным веществом и применять к нему общепринятые методы теории разрушения материалов. В настоящее время наиболее известна «полуэмпирическая» модель, применяемая при расчете прочности фибробетона, сущность которой изложена в [1]. В данной работе автор представляет результаты расчета предела прочности фибробетона при продольном растяжении, полученные с помощью компьютерного моделирования распределения фибр в образцах, а также данные экспериментов.

Рассмотрим, следуя [1], работу стального волокна в бетоне при растяжении (рис. 1). На первой стадии растяжения наблюдается совместная работа фибр и бетона. После достижения деформации разрушения бетона происходит образование локальных микротрещин, и напряжение в области этих трещин концентрируется на фибрах. Этот процесс происходит постепенно, поэтому на этой стадии работу фибр и бетона можно считать совместной. Наконец при достижении напряжения разрушения фибробетона происходит образование основной трещины, и прочность материала будет определяться прочностью сцепления фибр с бетоном и прочностью самих волокон. Будем считать, что предел прочности сталефибробетона при продольном растяжении определяется значением усредненного напряжения в самом «слабом» сечении образца непосредственно перед образованием основной трещины.

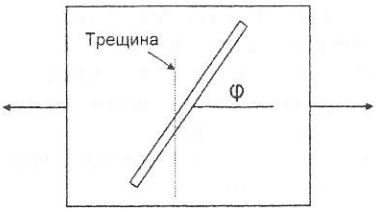


Рис. 1. Фибра в бетоне (стрелки – направление растяжения)

Рис. 2. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных значений прочности

(сплошная кривая — данные моделирования; точки — результаты эксперимента; «усы» у точек показывают разброс значений)

При растяжении образца относительная линейная деформация фибр, направленных как вдоль направления растяжения, так и под углом φ к нему, одинакова, поэтому будем считать, что напряжение в фибре не зависит от угла φ. Таким образом, максимальная выдергивающая фибру сила в проекции на направление растяжения равна

$$F = 3{,}14 \cdot d \cdot \sigma_{сц} \cdot L_а \cdot \cos\varphi, \qquad (1)$$

а при разрыве фибры

$$F = 0{,}785 \cdot d^2 \cdot \sigma_ф \cdot \cos\varphi, \qquad (2)$$

где d и $L_а$ — диаметр и длина заанкерированного участка фибр; $\sigma_{сц}$ и $\sigma_ф$ — прочность сцепления и напряжение разрыва фибры.

Опыт показывает [1], что и после достижения напряжения «выдергивания» фибра продолжает препятствовать разрушению за счет сил трения. Поэтому теоретическое значение предела прочности при растяжении фибробетона будет равно

$$R_{фб} = \Sigma F / S + R_б, \qquad (3)$$

где $R_б$ — предел прочности неармированного бетона при продольном растяжении; Σ — означает суммирование по всем фибрам, пересекающим заданное сечение; S — площадь сечения.

В настоящей работе автор использовал компьютерную программу, выполненную на языке FORTRAN, которая применялась им ранее для выявления закономерностей распределения фибр в образцах бетона [2]. В программу были добавлены алгоритмы расчета прочности. Принцип ее работы состоит в следующем. Вначале в образцах случайно распределяются фибры таким образом, чтобы они не пересекали друг друга. При этом задаются размеры образца, прочность бетона, коэффициент армирования, длина и диаметр фибр, их напряжение разрыва и прочность сцепления с бетоном. Преимущество компьютерного моделирования перед обычным расчетом в данном случае неоспоримо, так как вносится не только близкая к реальности случайность распределения волокон, но и разброс основных характеристик материала (например, прочности сцепления), что дает возможность теоретического исследования их влияния на конечную прочность фибробетона и ее коэффициент вариации.

Далее в каждом сечении образца рассчитывается прочность бетона в соответствии с формулой (3), находится самое слабое сечение и его предел прочности при растяжении, а также коэффициент ориентации волокон [1], количество волокон в сечении, местоположение этого сечения, количество разорвавшихся волокон. Циклическая работа программы позволяет определить и коэффициенты вариации вышеперечисленных величин.

Программа позволяет моделировать случайное распределение волокон в изделиях любой формы, но для сопоставления с экспериментальными данными и выявления аналитической зависимости прочности от коэффициента армирования моделировались образцы в форме параллелепипеда квадратного сечения с соотношением сторон 1×1×4. Базовый диаметр волокон 0,5 мм, отно-

шение длины к диаметру от 40:1 до 80:1, отношение высоты образца к длине волокна от 0,5 до 3.

Кроме того, программа позволяет визуализировать распределение волокон как по всему образцу, так и по сечениям. Это имеет большое значение при изучении заполнения волокнами приповерхностных областей, так как до сих пор не существует надежных способов наблюдения распределения фибр в реальных образцах.

Экспериментальная часть. Были изготовлены сталефибробетонные образцы размером 4×4×16 см состава Ц:П = 1:1,5 с В/Ц = 0,45, которые армировались фибрами длиной 27 мм, диаметром 0,6 мм с коэффициентами армирования 0,01; 0,02 и 0,03 по объему (по три образца каждой серии). Через 28 суток твердения в воде образцы испытывались на растяжение раскалыванием.

На рис. 2 представлено сопоставление экспериментальных данных и моделирования. Коэффициенты вариации значений предела прочности при моделировании колеблются в диапазоне от 5 до 10 %, а в эксперименте — 10–15 % за счет большей неравномерности распределения волокон по сечениям, связанной с общими трудностями получения однородной смеси при замешивании. Моделирование позволило предложить аналитический вид зависимости предела прочности при растяжении от параметров армирования:

$$R_{фб} = (0{,}49 \cdot k + 0{,}28 \cdot k^2) \cdot (\mu + 5{,}5 \cdot \mu^2) \cdot \sigma_{сц} L / d + R_б, \qquad (4)$$

где k — коэффициент ориентации; μ — коэффициент армирования; L — длина фибр.

Данная зависимость в целом согласуется с литературными данными [1], но имеет три значимых отличия. Во-первых, предложена новая зависимость прочности от коэффициента ориентации. Методика приведения фибр от хаотичного к однонаправленному армированию, изложенная в [1], приближенна ($R_{фб}$ пропорциональна k^2), так как сам автор [1] отмечает, что в экспериментах зависимость $R_{фб}$ от k ближе к линейной. Во-вторых, предложена новая зависимость от коэффициента армирования (в [1] $R_{фб}$ пропорциональна μ). Поправка становится заметной при большом μ (более 0,02), автор объясняет это уменьшением статистического разброса распределения волокон по сечениям при увеличении количества фибр. Естественно, что в реальных образцах при густом армировании большую роль играет взаимодействие волокон, которое не учитывается при моделировании. В-третьих, отсутствует коэффициент, зависящий от μ, перед $R_б$, так как при моделировании не учитывалось влияние волокон на прочность бетона. Однако известен факт [3], что прочность бетона в контактной зоне значительно повышается, соответственно усредненное по сечению значение $R_б$ должно возрастать с увеличением μ. По мнению автора, это явление ответственно за отличие расчетной и экспериментальной прочности образцов при $\mu > 0{,}02$ (см. рис. 2).

Таким образом, формула (4), полученная с помощью моделирования, достаточно точно определяет прочность бетона при небольших коэффициентах армирования (менее 0,02). При увеличении армирования в программу должны быть внесены экспериментально определяемые поправки, учитывающие возрастание прочности бетона в контактной зоне фибра — бетон. Результаты работы могут быть использованы при расчете предела прочности сталефибробетона при растяжении, для оптимизации параметров армирования, дальнейшего усовершенствования программ компьютерного моделирования дисперсно-армированных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатов Л. Г. Проектирование и изготовление сталефибробетонных конструкций/ Л. Г. Курбатов.— М.: ЦНТИ по граждан. строительству, 1985.— 53 с.
2. Матус Е. П. Моделирование распределения волокон в дисперсно-армированных изделиях/Е. П. Матус//Известия ВУЗов. Строительство.— 2004.— № 4.— С. 37–42.
3. Лобанов И. А. Структура дисперсно-армированных бетонов и способы ее технологического регулирования: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук/И. А. Лобанов.— Л.: ЛИСИ, 1980.— 63 с.

© Матус Е. П., 2005

Получено после доработки 24.02.05

УДК 621.876.46

А. А. АСАНОВ, канд. техн. наук, доц. (Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры, г. Бишкек, Кыргызстан)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВОЧНЫХ МАШИН

Рассмотрен рабочий процесс формовочной машины. Составлена математическая модель и получены аналитические зависимости для расчета кинематических и силовых параметров формовочных машины статического и статодинамического действия.

Независимо от конструктивных особенностей рабочий орган (РО) гидравлической формовочной машины (ГФМ) совершает два хода: прямой и обратный, где прямой ход включает фазы приближения, уплотнения и деформации прессуемой смеси на заданную величину. При обратном ходе РО возвращается в исходное положение, снимая нагрузку с отпрессованного изделия.

При составлении математической модели машины в качестве исходных использованы уравнения движения прессующего элемента, неразрывности потока жидкости, изменения давления в гидросистеме и технологической силы. Исследования проведены поэтапно, с последовательным анализом движения РО с постоянным сопротивлением (этап приближения) и сопротивлением, пропорциональным перемещению (этап сжатия смеси). Рассмотрены два режима: статический и статодинамический. Дифференциальное уравнение, описывающее движение прессующего элемента ГФМ на этапе рабочего хода, представлено в виде

$$m\ddot{x} = P(t) - \operatorname{sign}(\dot{x})\sum_{i=1}^{n} F_i - \mu\dot{x} - R(x), \tag{1}$$

где $P(t)$ — сила давления жидкости со стороны гидроцилиндра прессования;

$\sum_{i=1}^{n} F_i$ — суммарная сила, в нее входят силы тяжести, трения и потерь давления в гидролиниях;

m — суммарная масса подвижных частей;

μ — коэффициент.

К основным процессам в гидроприводе относятся изменения давления P и подачи (расхода) Q жидкости, которые описываются зависимостями

$$\dot{P} = (Q - \dot{x}S_n)E / W, \tag{2}$$

$$Q_{\text{н}} = q_{\max}\omega f(\alpha) - (K_{\text{с}} + K_{\text{уп}})\dot{p} - K_{\text{ут}}p, \tag{3}$$

$$Q_{\text{р}} = \mu_{\text{р}} bh\sqrt{2(p_{\max} - p)/\rho}, \tag{4}$$

$$a_1\ddot{x} + a_2\dot{x} + a_3\dot{x}^2\operatorname{sign}(\dot{x}) + p_{\text{ц}} = p, \tag{5}$$

$$P_0 = (x_1 - x)C_{\text{п}}, \tag{6}$$

где $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{р}}$ — соответственно подача насоса и расход жидкости через распределитель;

$q_{\max}$ — рабочий объем насоса; $f(\alpha) = Z / Z_{\max}$ — параметр регулирования;

Z, $Z_{\max}$ — текущее и максимальное значения перемещения поршня регулятора мощности насоса;

$K_{\text{с}}$, $K_{\text{уп}}$, $K_{\text{ут}}$ — коэффициенты, характеризующие сжимаемость жидкости; податливость трубопровода и внутренние утечки;

$\dot{P}$ — изменение давления во времени;

W — объем сжимаемой жидкости;

E — модуль упругости жидкости;

$a_1 = \rho lS / f$; $a_2 = 27{,}5\nu\rho lS / f^2$; $a_3 = (0{,}443\kappa\rho l / \sqrt{f} + 0{,}5\xi\rho)(S / f)^2$;

ρ — плотность жидкости;

l, f — длина и площадь сечения трубопровода;
$S_п$ — площадь поршня;
ξ — коэффициент местного сопротивления;
κ — опытный коэффициент; ν — кинематическая вязкость жидкости;
p, $p_ц$ — соответственно давление жидкости за распределителем и перед входом в гидроцилиндр;
$\mu_р$ — коэффициент расхода;
b, h — ширина окна и перемещение золотника;
p_{max} — давление на входе в распределитель;
P_0 — приведенная к поршню сумма сил;
x, x_1 — соответственно текущая координата положения поршня и сечения жидкости вблизи торцевых стен цилиндра;
$C_п = ES_п^2 / W$ — жесткость привода.

В основе исследования и анализа динамических процессов в формовочной машине лежат уравнения (1)–(6), которые в совокупности представляют собой математическую модель объекта исследования. Рассмотрены общий и частные случаи движения РО ГФМ.

Решая дифференциальное уравнение движения РО ГФМ в статическом режиме с учетом только упругости гидропривода (1) и выражения (2), получим зависимости для определения кинематических и силовых параметров во времени и параметров привода: для хода приближения

$$x(t) = V_0 t - \frac{V_0}{k}\sin(kt); \tag{7}$$

$$\dot{x}(t) = V_0(1-\cos(kt)); \tag{8}$$

$$P(t) = Qkm\sin(kt) / S_п^2, \tag{9}$$

где $k = \sqrt{C_п / m}$; $S_п$ — площадь поршня гидроцилиндра.

Для рабочего хода, когда $R(x)$ выражена кусочно-линейной или нелинейной функцией, отсутствует однозначное решение уравнения движения, что потребовало применение метода Рунге-Кутта.

Аналогичным образом получены зависимости для ГФМ с вибропрессующим РО: на этапе приближения

$$x_1(t) = V_0(1+\gamma_1)\left[A_1(\tau)\left(t - \frac{1}{k_1}\sin(k_1 t)\right)\right], \tag{10}$$

$$\dot{x}_1(t) = V_0(1+\gamma_1)[A_1(\tau)(1-\cos(k_1 t))], \tag{11}$$

где

$$A_1 = \left(1-\cos(k_1\tau)+\sin(k_1\tau)\operatorname{ctg}\left(\frac{k\tau}{2}\right)\right),\ \gamma_1 = \frac{J}{m},\ k_1^2 = \frac{C_п}{m_1} \text{ при } t = t_п,\ V_1 = \dot{x}_1(t_п),$$

на этапе рабочего хода

$$x_2(t) = A_2(\tau)\left[V_0 b_1 t + \frac{1}{k_2}(V_1 - b_2 V_0)\sin(k_2 t)\right], \tag{12}$$

$$\dot{x}_2(t) = A_2(\tau)[V_0(b_1 - b_2\cos(k_2 t)) + V_1\cos(k_2 t)], \tag{13}$$

где

$$A_2(\tau) = 1 + \cos(k_2\tau) + \sin(k_2\tau)\cdot\operatorname{ctg}\left(\frac{k_2\tau}{2}\right),$$

$$k_2^2 = \frac{C_п}{m_2};\ b_1 = \left(\frac{C_п}{C_п + B} + \frac{\gamma_2}{V_0}\right),\ b_2 = \left(\frac{C_п}{C_п + B} - \frac{\gamma_2}{V_0}\right);\ \gamma_2 = \frac{J}{m_2},$$

где τ, J — период и величина импульса силы; m_1, m_2 — масса подвижных частей РО на этапах приближения и рабочего хода; $C_п$, B — жесткость привода и прессуемой смеси.

Полученные зависимости отличаются от ранее известных. Суть отличия заключается в совместном рассмотрении упругих свойств привода и сопротивления прессуемой смеси для определения закономерностей движения РО ГФМ статического и вибропрессующего действия.

© Асанов А. А., 2005

Получено 10.06.05

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 624.131.52.001.5

СКИБИН Г. М., канд. техн. наук, доц. (Южно-Российский государственный технический университет; Новочеркасский политехнический институт, г. Новочеркасск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПОД ПОДОШВОЙ ЖЕСТКОГО ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА

Приводятся результаты экспериментальных исследований, проведенных с целью изучения напряженно-деформированного состояния песчаного основания, нагруженного моделью жесткого шероховатого ленточного фундамента.

Экспериментальные исследования выполнялись в лаборатории оснований и фундаментов кафедры САПР ОСФ НГТУ на испытательной машине МФ-1 конструкции Ю. Н. Мурзенко [1], которая является центральным звеном автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) оснований и фундаментов на моделях.

Полосовая нагрузка от ленточного фундамента моделировалась тремя жесткими шероховатыми (шероховатость подошвы обеспечивалась наклеенной на нее наждачной бумагой) штампами размером в плане 180×700 мм, расположенными по длине с зазором 5 мм. Таким образом, была получена полоса 180×2110 мм, в которой соотношение $l/b = 11{,}7 > 5$ соответствует условию постановки плоской задачи. Схема приложения полосовой нагрузки на основание показана на рис. 1, *а*.

Программа исследований включала две серии опытов (схемы установки приборов приведены на рис. 1, 2): первая серия была проведена с целью изучения напряженно-деформированного состояния основания по оси модели ленточного фундамента; вторая серия — с целью изучения траекторий движения частиц песчаного основания в условиях предельного нагружения.

При исследовании совместной работы песчаного основания под моделью жесткого ленточного фундамента в первой серии одновременно измерялись деформации, напряжения в массиве основания и осадки штампа. Для измерения послойных деформаций в основании до глубины $3{,}75b$ были установлены деформометры Д-2 с шагом $0{,}5b$, а для измерений нормальных вертикальных и горизонтальных напряжений в двух плоскостях по оси модели до глубины $4b$ с тем же шагом установлены соответственно сориентированные месдозы.

На основании обработки экспериментальных данных построены эпюры вертикальных деформаций ε_z, вертикальных и горизонтальных нормальных напряжений σ_z, σ_y (рис. 3).

Эпюры ε_z (рис. 3, *а*) на начальных ступенях нагружения имеют форму волны. Значения вертикальных деформаций, зарегистрированных на глубине $z = 0{,}75b$ и $z = 1{,}75b$, превышают значения деформаций на глубине $z = 1{,}25b$.

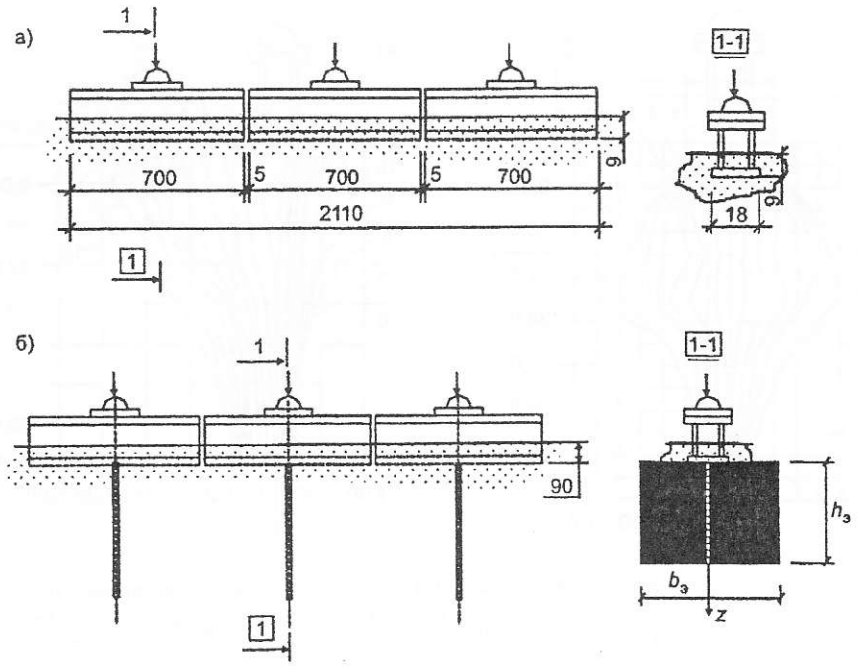


Рис. 1. Схема нагружения основания полосовой нагрузкой

а — геометрическая схема; *б* — схема установки тонированных экранов

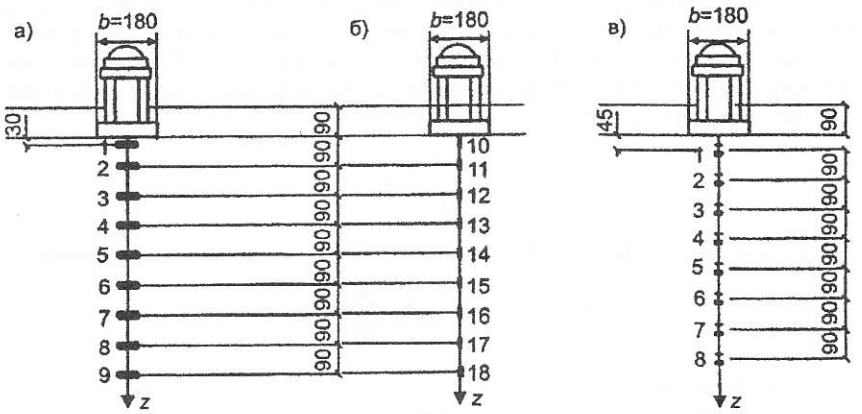


Рис. 2. Схема расположения приборов в I серии экспериментов

а — схема расположения месдоз для измерения напряжений σ_z; *б* — схема расположения месдоз для измерения напряжений σ_y; *в* — схема расположения деформометров Д-2

Следует отметить, что в процессе нагружения интенсивность роста деформаций по глубине различна. Наибольшие изменения происходят в слое $0{,}75 < z < 1{,}75$. При достижении нагрузки значения $0{,}6P_{пр}$ форма эпюры "выравнивается", значения деформаций по глубине все время возрастают до глубины $z = 1{,}75b$, на которой фиксируется максимальное значение, и далее убывают. Форма экспериментальных эпюр в интервале нагружения $0{,}6P_{пр}$ — $0{,}98P_{пр}$ (рис. 3, *а*, правая часть) предполагает наличие в слое $1{,}25 < z < 1{,}75$ точки, в которой ε_z достигает максимального значения. Сглаживание экспериментальных эпюр кубическим сплайном (рис. 3, *а*, левая часть) позволяет ориентировочно определить глубину с наибольшими вертикальными деформациями. Анализ полученных таким образом эпюр показывает, что при нагрузках, больших $0{,}6P_{пр}$, глубина, на которой ε_z достигает максимального значения, увеличивается с ростом нагрузки, но не превышает $z = 1{,}75b$.

Волнообразная форма эпюры ε_z по оси штампа (фундамента) на начальных ступенях нагружения и ее "выравнивание" при нагрузках, близких к $0{,}6P_{пр}$, от-

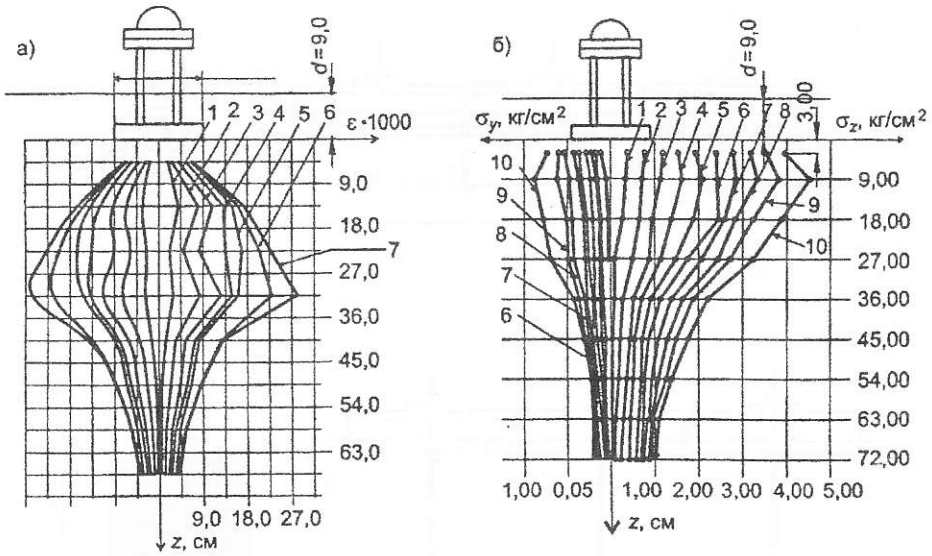


Рис. 3. Эпюры вертикальных деформаций ε_z (*а*) и эпюры нормальных напряжений σ_z, σ_y, (*б*)
Ступень нагружения: *а*) *1* — $1{,}22P_{пр}$; *2* — $0{,}37P_{пр}$; *3* — $0{,}53P_{пр}$; *4* — $0{,}67P_{пр}$; *5* — $0{,}82P_{пр}$; *6* — $0{,}90P_{пр}$; *7* — $0{,}99P_{пр}$; *б*) *1* — $0{,}095P_{пр}$; *2* — $0{,}190P_{пр}$; *3* — $0{,}285P_{пр}$; *4* — $0{,}380P_{пр}$; *5* — $0{,}475P_{пр}$; *6* — $0{,}570P_{пр}$; *7* — $0{,}665P_{пр}$; *8* — $0{,}760P_{пр}$; *9* — $0{,}862P_{пр}$; *10* — $0{,}950P_{пр}$

мечается и в других экспериментах и для других условий нагружения (например для круглого жесткого штампа — в опытах Галашева Ю. В. [2], это же отмечается и для железобетонного прямоугольного фундамента в работе [3]).

Осадка слоя грунта высотой h_i численно равна площади участка эпюры вертикальных деформаций, приходящейся на данный слой. Если эпюру на участке между точками, в которых измерялись деформации, считать прямолинейной, то ее площадь s_i определяется как

$$s_i = \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2} h_i. \qquad (1)$$

Тогда для определения общей осадки S справедливо выражение

$$S = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_n}{2} h_i + h_i \sum_{i=2}^{i=n-1} \varepsilon_i, \qquad (2)$$

где n — число точек.

Следует отметить, что разница между фактической осадкой, измеренной по прогибомеру и вычисленной по (2), невелика, что является контролем результатов измерений. На начальных ступенях нагружения до $0{,}67P_{пр}$ эта разница составляет 1–6%, затем увеличивается до 14–16%, поскольку с ростом нагрузки увеличивается и глубина сжимаемой толщи.

Эпюры распределения напряжений σ_z и σ_y по оси штампа (рис. 3, *б*) сходны по форме с экспериментальными эпюрами в опытах других авторов. Значения вертикальных напряжений σ_z в контактном слое являются максимальными по глубине лишь на начальных ступенях нагружения. Начиная со ступени $0{,}38P_{пр}$, максимум напряжений фиксируется на глубине $0{,}5b$, причем значение σ_z превышает среднее давление по подошве фундамента. Напряжения σ_y невелики, в 5–7 раз меньше σ_z, измеренных в том же уровне, и быстро уменьшаются по глубине. На всех ступенях нагружения, исключая две последние, на которых эпюры σ_y и σ_z имеют сходные очертания, значения σ_y достигают максимума в контактном слое.

Исходя из полученных результатов, логично предположить, что волнообразная форма эпюры вертикальных деформаций по оси жесткого штампа, трансформация ее формы, а также увеличение значений сжимающих напряжений на некоторой глубине по отношению к контактным, являются следствием наличия в массиве основания под подошвой некого изменяющегося концен-

транта напряжений, которым, вероятнее всего, служит зарождающееся и развивающееся в процессе нагружения грунтовое ядро.

Экспериментальные исследования разрушения оснований под моделями жестких фундаментов показали, что во всех случаях предельного состояния непосредственно под жестким (шероховатым) фундаментом образуется уплотненное клиновидное ядро грунта, являющееся естественным продолжением фундамента. По определению В. Г. Березанцева "...Уплотненное клиновидное ядро представляет собой переходный объем грунта, который формируется таким образом, что по его поверхности возникает давление, способное вызвать непрерывное состояние предельного равновесия в остальной сдвигаемой части основания" [4].

Впервые подобное явление было отмечено еще в 1929 г. М. Х. Пигулевским при вдавливании штампа в песок. Экспериментальному изучению формы ядра различными методами посвящены работы многих авторов. В частности, М. В. Малышев применил метод фотосъемки частиц песка аппаратом, перемещающимся вместе со штампом. Этим же методом М. Ш. Минцковским [5] зафиксирована форма ядра, приведенная на фотографии (рис. 4, *а*). По методике В. И. Курдюмова (метод фотофиксации) В. Г. Березанцевым исследовались траектории движения частиц грунтов в прозрачном лотке при различных заглублениях штампа. П. Н. Кашкаров [6] для изучения формы и размеров ядра использовал парафинированные и бумажные экраны (рис. 4, *б*).

При расчете несущей способности основания форма и размер ядра играют значительную роль, первое предложение о форме ядра в случае вертикальной центрально приложенной нагрузки было сделано К. Терцаги [7]. Он принял сечение ядра в виде равнобедренного треугольника, стороны которого наклонены под углом φ к подошве фундамента. Эта же форма была рассмотрена М. И. Горбуновым-Посадовым и В. С. Христофоровым. М. И. Горбунов-Посадов при определении предельной нагрузки на основание для жесткого ленточного фундамента, по

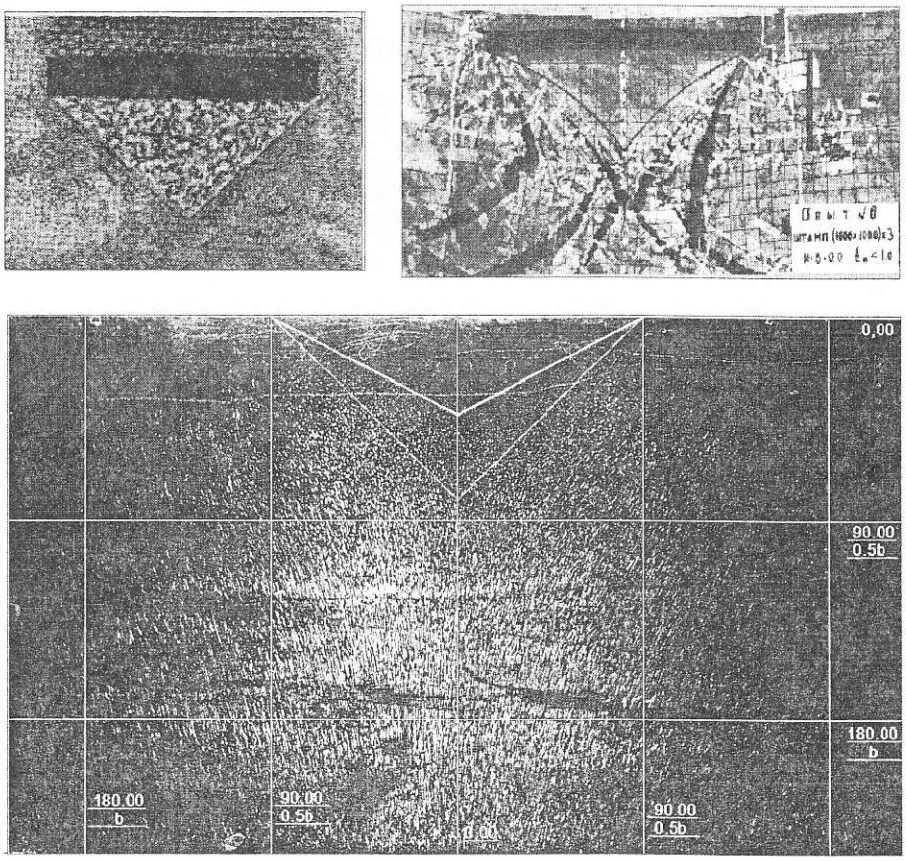


Рис. 4. Форма грунтового ядра под подошвой штампов, полученная в опытах: М. Ш. Минцковского (*а*), П. Н. Кашкарова (*б*), автора (*в*)

результатам экспериментальных исследований принял исходное положение о существовании двух частей уплотненного грунтового ядра: «упругой», примыкающей к подошве, и «пластической», являющейся продолжением первой.

Автором данной работы также проведены эксперименты по исследованию формы и размеров упругого ядра. С этой целью осуществлена серия из трех опытов на песчаном основании, нагруженном шероховатым ленточным штампом. Траектории движения частиц фиксировались на тонированных экранах, которые двигались вместе со штампом. Частицы песка при своем перемещении относительно экрана оставляли на его поверхности царапины — светлые следы движения частиц. После проведения опытов экраны аккуратно извлекались из основания и фотографировались. Для наглядности при определении размеров характерных зон движения частиц песчаного основания на фотографии нанесена масштабная сетка.

Выводы. Наиболее интенсивное движение частиц происходит непосредственно под штампом на глубине от $0{,}5b$ до $1{,}5b$ (светлые пятна на фотографиях экранов); непосредственно под подошвой расположена темная зона, по форме близкая к треугольной — область ядра, в которой можно выделить более темную зону — "упругую" часть ядра и прилегающую к ней менее темную — "пластическую". В предельном состоянии расстояние от подошвы фундамента до вершины "упругой" части ядра находится в пределах $0{,}2b$–$0{,}25b$, и соответственно его грани наклонены к горизонтали под углом 12–15°; при предельных нагрузках внешние грани "пластической" части ядра наклонены к горизонтали под углом 41–43°, близким по значению к углу внутреннего трения. Сравнивая траектории движения частиц в допредельном состоянии (экраны извлечены до наступления предельного состояния основания) с предельным состоянием, можно предположить, что упругая часть ядра сформирована полностью еще до наступления предельного состояния, а пластическая формируется во всем интервале нагружения вплоть до предельного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурзенко Ю. Н. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния несвязанного основания под жесткими фундаментами/Ю. Н. Мурзенко//Науч. тр. "Основания, фундаменты и механика грунтов".— Высшая школа, 1967.— Вып. 2.
2. Мурзенко Ю. Н. Экспериментальные исследования тензора деформаций и тензора напряжений по оси круглого штампа на песчаном основании/Ю. Н. Мурзенко, Ю. В. Галашев, В. П. Дыба//Исследование напряженно-деформированного состояния оснований и фундаментов.— Новочеркасск: НПИ, 1977.— С. 23–27.
3. Мурзенко А. Ю. Особенности деформирования основания гибкого одноступенчатого фундамента/А. Ю. Мурзенко, А. И. Субботин, Г. М. Скибин, С. И. Евтушенко//Исследование и расчет оснований и фундаментов при действии статических и динамических нагрузок.— Новочеркасск: НПИ, 1988.— С. 85–90.
4. Березанцев В. Г. Расчет оснований сооружений/В. Г. Березанцев.— Л.: Стройиздат, 1970.— 195 с.
5. Минцковский М. Ш. О некоторых вопросах плоской задачи устойчивости оснований сооружений/М. Ш. Минцковский.— Киев: Изд. АСиА УССР, 1962.
6. Кашкаров П. Н. Усовершенствование метода парафинированного экрана для исследования деформаций песчаного основания/П. Н. Кашкаров//Изв. ВНИИГ.— Л.: Энергия, 1960.— Т. 87.
7. Terzagi K. Theoretical Soil Mechanics/K. Terzagi.— Wileg, New York, 1947.

© Скибин Г. М., 2005

Получено после доработки 26.11.04

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ
(исправленные и дополненные)

1. К рукописи, представляемой в редакцию, необходимо приложить:
— *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи из расчета 550 рублей за 1 журнальную страницу объема статьи (включая иллюстрации, таблицы и список литературы) за подписью автора или руководителя представляющей статью организации. 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;
— *аннотацию*, кратко излагающую основное содержание рукописи, объемом до 0,3 страницы текста;
— *название статьи* и фамилии авторов *на английском языке*.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере и представляться в редакцию распечатанной *в двух экземплярах*, с приложением ее записи на дискете 3,5" или CD (3", 5"). Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14пт, с межстрочным интервалом 1,5. Число знаков в строке – до 70, строк на странице – до 38. Объем рукописи – до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

• Порядок оформления титульной части статьи (см. в нашем журнале):
— индекс УДК;
— инициалы, фамилии, ученые степени и звания авторов (звания в негосударственных академиях наук не указывать); наименование учреждения, в котором работают авторы;
— название статьи;
— аннотация.

• На полях рукописи простым карандашом указываются места рисунков и таблиц.

• Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи). Приводятся точные почтовые адреса, телефоны и e-mail авторов.

3. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах Corel Draw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографии – TIFF или JPEG. Надписи и цифры набрать шрифтом Arial. Линии чертежа – не тоньше чем 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). Для этого важно, чтобы рисунок был построен в данных программах. В исключительных случаях автор может использовать сканированное изображение, которое должно быть четким, черно-белым. Для того чтобы с этим рисунком можно было работать (редактировать), автору необходимо сканированный рисунок поместить в одну из предложенных выше программ и затем наносить нужный текст.

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, а фото присылать в оригинале. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4. На обратной стороне каждой из них простым карандашом проставляются порядковый номер и фамилии авторов. Подписи к иллюстрациям печатаются на отдельном листе.

4. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

5. 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) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв: *V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и 1 (цифра), *n* и п, *I* и *J* и т.п. пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

6. Следует применять физические величины, соответствующие стандарту СТ. СЭВ 1052-78 (СН 528-80).

7. Библиографический указатель под названием «Список литературы» помещается в конце статьи. Источники располагаются в нем в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу (номера источников в списке) в тексте заключаются в квадратные скобки. Список литературы составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-03 и ГОСТ 7.80-2000. В список литературы вносятся только те работы, которые *опубликованы в печати*.

Примеры оформления можно найти на INTERNET-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу http://www.sibstrin.ru/izv.html

8. 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.

9. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указывается ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка "рукопись после доработки". К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается момент получения редакцией ее окончательного текста.

10. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не предоставляется.*

11. *Гонорар* за опубликованные статьи *не выплачивается*.

12. **Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.**

Индекс 70377

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 2-е полугодие 2005 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ АССОЦИАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ СНГ НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА (Сибстрин)

Издается с марта 1958 года

Журнал рассчитан на профессорско-преподавательский состав, аспирантов, а также студентов старших курсов строительных вузов и факультетов, работников соответствующих научно-исследовательских и проектных институтов, инженерно-технический персонал строительных организаций и предприятий.

Объем журнала до 10 печатных листов

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

В ЖУРНАЛЕ ПУБЛИКУЮТСЯ:

статьи о результатах научных исследований, сообщения о передовом отечественном и зарубежном опыте в строительстве, работы по автоматике и автоматизации производственных процессов, материалы межвузовских научных конференций и совещаний, отдельные разделы диссертаций, материалы о внедрении в производство законченных научных работ, а также обзорные статьи, статьи научно-методического характера, предложения по расчету и проектированию строительных конструкций и инженерных сооружений.

Каталожная цена за 6 месяцев — 360 р.

Цена отдельного номера — 60 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами Союзпечати и отделениями связи. Индекс 70377.

Журнал издается Новосибирским государственным архитектурно-строительным университетом (Сибстрин).

Адрес редакции: 630008, Новосибирск, 8, Ленинградская, 113.

Телефон 266-28-59; телефакс (8-383) 266-28-59; e-mail: izvuz_str@sibstrin. ru

ISSN 0536—1052. Изв. вузов. Строительство. 2005. № 6 (558). 1—112