

Федеральное агентство по образованию

**ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Серия: Строительство и архитектура

**Выпуск
6(21)**

Научно-теоретический и производственно-практический
журнал

2006

Выходит 4 раза в год

Основан в 1999 г.

Волгоград

ВолгГАСУ

С о д е р ж а н и е

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ,
ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Богомолов А.Н., Вихарева О.А., Шиян С.И. О форме границы уплотненного грунтового ядра, образующегося в основании заглубленного фундамента	5
Перехоженцев А.Г. Расчет распределения влаги в многослойных ограждающих конструкциях зданий на основе потенциала влажности при неизотермическом квазистационарном режиме	10
Жарков А.Ф. Методика расчета пределов огнестойкости наружных трехслойных стеновых панелей с деревянным каркасом и с эффективным утеплителем	14
Галишникова В.В., Паль П.Я. Геометрически нелинейный расчет плоских рам	24
Карпов В.В., Кудрявцев В.К. Устойчивость ребристых полых оболочек при длительном нагружении	53
Наумова Г.А., Бубнов А.А., Кабанин В.В. Методика моделирования деформирования и разрушения толстостенного трубопровода в условиях высокотемпературной водородной коррозии ...	58
Лебедь Е.В., Куницын А.А. Начальные усилия в стержнях односеччатого купола вследствие погрешностей его сборки и монтажа	63
Журбина Е.И., Крингс В. Таблицы для расчета изгибаемых железобетонных элементов сложного сечения. Сравнение с расчетом согласно $\text{din } 1045-1$	71
Грязнов М.В., Рощина С.И. Исследования напряженно-деформированного состояния дисковых ферм	78
Христофорова Т.Н., Рощина С.И. Экспериментальные исследования армированных конструкций с ослабленным сечением, в зоне чистого изгиба	82
Кабанин В.В., Канаева О.В., Овчинников И.И. Экспериментальное исследование влияния напряженного состояния на кинетику коррозионного износа круглых пластинок при различных программах нагружения	87
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ	
Деятов М.М., Вилкова И.М. О критериях оценки потребительских качеств автомобильных дорог	91
Алексиков С.В. Оптимизация сводного графика поставки ресурсов в условиях многообъектного строительства	99
Ефанов А.В., Овчинников И.Г. Статический и динамический расчет деформационных швов автодорожных мостов	102

Овчинников И.Г., Межнякова А.В., Гришина И.Н. Случайный характер деформаций и напряжений железобетонных конструктивных элементов мостов	107
ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Филин Г.С. Об одном решении задачи календарного планирования строительства группы объектов	114
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ	
Акчури Т.К., Ушаков А.В. Определение характеристик трещиностойкости жаростойких бетонов на глиноземистом цементе	121
Котляревский А.А., Королев С.А., Вовко В.В., Акчури Т.К. Оценка эффективности ремонта и строительства, автомобильных дорог на примере технологии литого асфальтобетона	125
Калгин Ю.И. Исследование работоспособности холодного асфальтобетона на основе жидкого битумно-полимерного вяжущего в дорожном покрытии	128
Мантуров З.А., Тотурбиев А.Б. Безобжиговые жаростойкие теплоизоляционные материалы на безводных силикатах натрия	133
Шорстов А.М., Корнеев А.Д. Технология заводского производства теплопроводов в пенополимербетонной изоляции	137
Барабаш Д.Е., Зеленев Г.В. Эффективный герметизирующий материал на основе модифицированного каучука	141
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ. ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА. ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ. ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ	
Гвоздков А.Н. Общая характеристика процессов тепло- и влагообмена в контактных аппаратах и методов их расчета	148
Боглаев В.И., Россошанский В.В., Тетерев М.В. Совершенствование систем обеспыливающей вентиляции в производстве стройматериалов	154
Мариненко Е.Е., Ефремова Т.В., Черкасов А.В. Критерии комплексного анализа эффективности систем сбора биогаза на полигонах ТБО	157
Артюхин А.С., Баев А.В., Тюрин А.С. Сравнение аппаратов взп и циклонов при очистке выбросов в атмосферу предприятий стройиндустрии	161
Москвичева Е.В., Быков А.А., Геращенко А.А., Алексиков А.Е., Рушковский П.В. Оптимизация мероприятий по снижению антропогенной нагрузки системы водоотведения г. Волгограда на водный объект	165
ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ	
Сапрыкина Н.С. «Соцгород ЯрРАК» в Ярославле, этапы его формирования	169
ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА. УПРАВЛЕНИЕ ИНВЕСТИЦИОННО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ	
Юшкова Н.Г. Совершенствование градостроительной документации на современном этапе становления системы управления градостроительной деятельностью и территориальным развитием	175
Лаверушин Е.Е., Кабанов А.Н., Жданкин Н.Ю. Построение архитектурно-планировочной организации материальной среды соединений постоянной готовности (на примере 76-й воздушно-десантной дивизии)	182
Юшкова Н.Г. Формирование системы градостроительных регламентов с учетом требований рационального использования территории	188
Кофтин В.В. Основные направления развития системы управления эффективным рынком доступного жилья	194
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА. ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА	
Черешнева Н.В., Черешнев И.В. Значение зеленых насаждений и элементов внешнего благоустройства в улучшении микроклимата жилой застройки Волгограда	198
Стеценко С.Е. Градостроительно-планировочные приемы уменьшения запыленности городской среды	202
Мякин А.С., Косицына Э.С. Предварительные результаты оценки экологической опасности автомобильных заправочных станций	206
НАШИ АВТОРЫ	211

C o n t e n t s

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. BASEMENTS, FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES. STRUCTURAL MECHANICS

Bogomolov A.N., Vikhareva O.A., Shiyani S.I. On the form of the border of a compact soil plug which forms in the base of a buried foundation	5
Perekhozhentsev A.G. Analysis of the humidity distribution in multi-layer building envelope, based on the humidity potential in the conditions of nonisothermic quasistationary mode	10
Zharkov A.F. Method of evaluating the limit points of fire-resistance of external three-layer wall panels with a wooden frame and efficient insulation	14
Galishnikova V., Pahl P.J. Geometrically Nonlinear Analysis of Plane Frames	24
Karpov V.V., Kudryavtsev V.K. Stability of the ribbed shallow shells under long-term loading	53
Naumova G.A., Bubnov A.A., Kabanin V.V. Methods for the modeling of deformation and destruction of thick-walled pipeline in the conditions of high-temperature hydrogen corrosion	58
Lebed Ye.V., Kunitsyn A.A. Initial internal forces in the rods of a single-layer grid dome emerging from inaccuracy of assembling and erection	63
Zhurbina E., Krings W. Tables for analysis of the flexural reinforced concrete members with composite section. comparison with the analysis according to DIN 1045-1	71
Gryaznov M.V., Roshchina S.I. Investigation into the mode of deformation of disk trusses	78
Khristorova T.N., Roshchina S.I. Experimental analysis of reinforced structures with a plane of weakness in the pure bending zone	82
Kabanin V.V., Kanaeva O.V., Ovchinnikov I.I. Experimental research of stressed state influence on the corrosion deterioration of round plates at various programs of loading	87

DESIGN, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF HIGHWAYS, SUBWAYS, AERODROMES, BRIDGES AND TRAFFIC TUNNELS

Devyatov M.M., Vilkoval I.M. On the criteria of the evaluation of highways consumer qualities	91
Alexikov S.V. Optimizing the process of the free-schedule supply of resources in the conditions of multi-object construction	99
Yefanov A.V., Ovchinnikov I.G. Static and dynamic analysis of the control joints of highway bridges	102
Ovchinnikov I.G., Mezhyayakova A.V., Grishina I.N. Randomicity of deformations and stresses of reinforced structural elements of bridges	107

TECHNOLOGY AND CONTROL IN CONSTRUCTION

Filin G.S. On one of the solutions of the problem of scheduling the construction of a group of objects	114
---	-----

BUILDING MATERIALS AND ARTICLES

Akchurin T.K., Ushakov A.V. Determining the characteristics of cracking resistance of heat-resistant concretes made on the base of alumina cement	121
Kotlyarevsky A.A., Korolev S.A., Vovko V.V., Akchurin T.K. Evaluating the efficiency of repair and construction of highways by the example of poured asphalt concrete technology	125
Kalgin Yu.I. Investigating the working efficiency of cold asphalt concrete on the base of liquid bituminous-polymer bonding agent in the pavement	128
Manturov V.A., Toturbiev A.B. Nonfired heat-resistant thermal insulators based on the water-free sodium silicates	133
Shorstov A.M., Korneev A.D. Technology of factory production of heat pipelines insulated with aerated polymer concrete	137
Barabash D.E., Zelenov G.V. Efficient sealing material based on modified caoutchouc	141

HEAT SUPPLY. VENTILATION, AIR CONDITIONING. GAS SUPPLY AND ILLUMINATION. WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTIONS FOR WATER RESOURCES PROTECTION

Gvozdkov A.N. General characteristics of the heat and humidity exchange processes in catalytic reactor as well as of the methods of their calculation	148
Boglayev V.I., Rossoshansky V.V., Teterev M.V. Improving the systems of dedusting ventilation in the construction materials production	154
Marinenko E.E., Efremova T.V., Cherkasov A.V. Criteria of the complex analysis of the efficiency of biogas gathering facilities at solid domestic waste grounds	157
Artyukhin A.S., Bayev A.V., Tyurin A.S. Comparing the efficiency of cross-vortex flow and cyclone devices for purification of atmospheric emissions caused by construction companies	161
Moskvicheva Ye.V., Bykov A.A., Geraschenko A.A., Alexikov A.Ye., Rushkovsky P.V. The optimization of measures of decreasing the man-made effect of Volgograd water sewerage system on a water body	165

THEORY AND HISTORY OF ARCHITECTURE, RESTORATION AND RECONSTRUCTION
OF THE HISTORIC AND ARCHITECTURAL HERITAGE

Saprykina N.S. «Sotsgorod Yarrak» in the city of Yaroslavl, phases of its foundation 169

URBAN PLANNING. THEORY OF URBAN DEVELOPMENT. CONTROL OF INVESTMENT
URBAN PLANNING ACTIVITY

Yushkova N.G. The improvement of urban planning documentation in the present-day stage of the
development of urban planning and territories management system 175

Lavrushin Ye.Ye., Kabanov A.N., Zhdankin N.Yu. The architectural-and-planning development
of material medium for level readiness units (by the example of the 76th airborne division) 182

Yushkova N.G. Developing the system of urban planning regulations taking into account the effi-
ciency of territory use 188

Koftin V.V. The main tendencies of the development of effective affordable housing market man-
agement system 194

ENVIRONMENTAL ISSUES IN URBAN PLANNING. LANDSCAPE ARCHITECTURE

Chereshneva N.V., Chereshnev I.V. The significance of planted lands and landscaping elements
for the improvement of living environment of built-up areas in Volgograd 198

Stetsenko S.Ye. Urban planning techniques for decreasing the dust content in urban environment... 202

Myakinin A.S., Kositsyna E.S. Preliminary results of environmental hazard estimation for filling
stations 206

OUR AUTHORS 211

Вниманию читателей и авторов!

На очередные выпуски журнала

первого полугодия 2007 г.

(серии «Естественные науки», «Гуманитарные науки»)

можно подписаться

в отделениях ФГУП «Почта России»

по каталогу «ПРЕССА РОССИИ», индекс 85343,

по Интернет-каталогу агентства «Книга-Сервис», индекс E85343.

Дополнительная информация
о подписке и приобретении выпусков журнала
по телефону редакции **(8-844-2)-96-98-46**

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ.
ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ.
СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

УДК 624.131.524.3

А.Н. Богомолов, О.А. Вихарева, С.И. Шиян

**О ФОРМЕ ГРАНИЦЫ УПЛОТНЕННОГО ГРУНТОВОГО ЯДРА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ
В ОСНОВАНИИ ЗАГЛУБЛЕННОГО ФУНДАМЕНТА**

С помощью компьютерных программ, разработанных в ВолгГАСУ, проведены теоретические расчеты формы и размеров уплотненного грунтового ядра в основании заглубленного фундамента. Полученные результаты сопоставлены с известными экспериментальными данными.

The paper presents the theoretical analysis of the forms and dimensions of a compact soil plug in the bottom of a buried foundation, carried out with the help of the software, developed at Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. The obtained results were compared to the existing experimental data.

Известно, что под подошвой нагруженного фундамента, когда величина интенсивности внешнего воздействия превышает некоторое предельное значение, начинают образовываться области пластических деформаций (ОПД), размеры которых увеличиваются по мере роста нагрузки. В момент смыкания ОПД под подошвой фундамента окончательно формируется уплотненное грунтовое ядро.

На рис. 1 изображены области пластических деформаций в однородном основании заглубленного фундамента при условии, что глубина заложения фундамента $h_3 = 2,58$ м, величина интенсивности внешней нагрузки $q = 100,12$ кПа. Плотность, сцепление и угол внутреннего трения грунта основания соответственно равны $\rho = 17,64$ т/м³; $C = 19,6$ кПа; $\varphi = 16^\circ$. Расчеты проведены для двух значений величины отношения ширины фундамента к глубине его заложения $2b/h_3 = 0,5; 1,5$. Величина коэффициента бокового давления грунта принята равной $\xi_0 = 0,75$, что соответствует его среднему значению для глинистых грунтов [1].

Расчеты проведены при помощи компьютерных программ, разработанных в ВолгГАСУ [2], на основе аналитического решения первой основной задачи теории упругости для весомой однородной и изотропной полуплоскости с криволинейным вырезом на ее горизонтальной границе [3], полученного на основе использования методов теории функций комплексного переменного [4].

В каждой точке границы ОПД выполняется условие равенства величины коэффициента устойчивости единице ($K=1$) [5], численное значение которого определяется выражением

$$K = \frac{[\sigma_z \cos^2 \alpha + \sigma_x \sin^2 \alpha + 2\tau_{xz} \sin \alpha \cos \alpha + \sigma_{св}] \operatorname{tg} \varphi}{(\sigma_x - \sigma_z) \sin \alpha \cos \alpha + \tau_{xz} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}, \quad (1)$$

где σ_z ; σ_x ; τ_{xz} и α — соответственно компоненты полного напряжения и угол наклона наиболее вероятной площадки сдвига в рассматриваемой точке грунтового массива; $\sigma_{св} = C \operatorname{tg} \varphi$ — давление связности (C и φ — соответственно сцепление и угол внутреннего трения грунта).

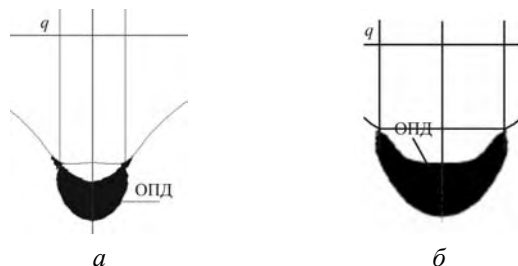


Рис. 1. Области пластических деформаций в основании заглубленного фундамента при $2b/h_3 = 0,5$ (а) и $2b/h_3 = 1,5$ (б), построенные на основе условия пластичности

Отметим, что величина угла α определяется из условий, что

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \alpha} &= 0; \\ \frac{\partial^2 K}{\partial \alpha^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

которые гарантируют вычисление минимального значения величины K в каждой точке грунтового массива [6].

Записать уравнения границ области пластических деформаций не представляется сложным. Оказалось, что верхняя и нижняя границы ОПД могут быть аппроксимированы полиномами различных степеней, при этом погрешность аппроксимации не превышает 6...8 % [7].

Из рис. 1 видно, что верхняя граница области пластических деформаций одновременно является нижней границей уплотненного (упругого) грунтового ядра, которое ограничено сверху подошвой фундамента. Следовательно, уравнение его нижней границы записывается в виде полинома.

В [8] нами показано, что нижняя граница уплотненного грунтового ядра может быть так же описана двумя ветвями параболы вида $y = ax^2 + bx + c$ или показательной функцией $y = b \cdot a^{x+c}$ в системе координат, начало которой находится в самой нижней точке ядра, а координатные оси Y и X направлены соответственно вверх и вправо. Нами так же установлено, что при увеличении геометрического параметра, определяющего величину отношения ширины фундамента к глубине его заложения $2b/h_3$, и всех прочих равных условиях упругое ядро сжимается и постепенно приобретает форму криволинейной трапеции (см. рис. 1).

В [9] приведена постановка «смешанной задачи теории упругости и статике сыпучей среды» и результаты решения в ее контексте задач об определении границ жесткой, упругой и пластической областей, возникающих в незаглубленном основании под абсолютно гибким и абсолютно жестким штампами.

На рис. 2 изображены границы жесткой на сдвиг (терминология автора [9]) (1), упругой (2) и пластической (3) областей при условии, что расчетные данные следующие (сохранены обозначения [9]): $f = 0,5$ (аналог коэффициента внутреннего трения $\operatorname{tg}\varphi$); $H = 0,15 \text{ кг/см}^2$ (предел прочности при всестороннем растяжении или давлении связности); объемный вес $\gamma = 0,0015 \text{ кг/см}^3$; $p = 2 \text{ кг/см}^2$; ширина штампа — $2a$ (численное значение размера «а» автор не указывает). При этом «коэффициент бокового давления при вычислении влияния собственного веса грунта на величину σ принят равным единице».

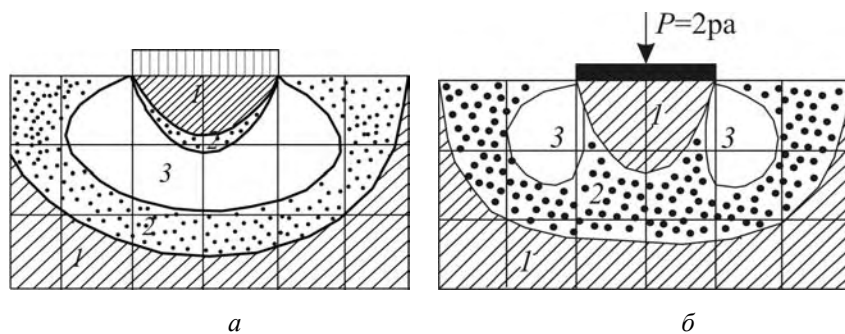


Рис. 2. Границы жесткой, упругой и пластической областей под гибким (а) и жестким (б) фундаментом по данным [9]

Нами проведена математическая аппроксимация линий, являющихся границами жесткого ядра (1). Оказалось, что в обоих случаях эти линии могут быть аппроксимированы параболами вида $y = ax^2 + bx + c$ либо показательными функциями вида $y = d^x + f$, графики которых приведены на рис. 3.

Ошибки аппроксимации составили $3,36 \times 10^{-3}$; $3,395 \times 10^{-3}$; $0,011$ и $2,563 \times 10^{-3}$ соответственно.

Считаем необходимым привести краткое описание и результаты экспериментов, проведенных для определения высоты и формы уплотненного грунтового ядра с глинистыми грунтами (пастами) твердой, полутвердой и тугопластичной консистенции, изложенные в [10].

В опытах исследовались элювиальные суглинки и глины плотностью $\rho = 1700; 1820; 1920 \text{ кг/м}^3$, влажностью 25; 32; 38 %, с числом пластичности 15 и 20, коэффициентом пористости $e = 0,67 \dots 0,78$.

Для исследований применялась радиоизотопная установка, позволяющая получать картограммы изменения плотности глинистых грунтов при их нагружении без нарушения сплошности. Были исследованы модели фундаментов площадью 200; 240; 750 см^2 в виде полос (соотношение сторон 1:3; 1:4).

Глинистый грунт помещался в лоток с прозрачными стенками из оргстекла, расстояние между которыми равнялось длине модели, что соответствует условиям плоской задачи.

Экспериментальные данные о форме и размерах ядра в зависимости от плотности-влажности обрабатывались с помощью компьютера. Возможные очертания уплотненного ядра, полученные в опытах, задавались абсолютными координатами x и y точек его границы.

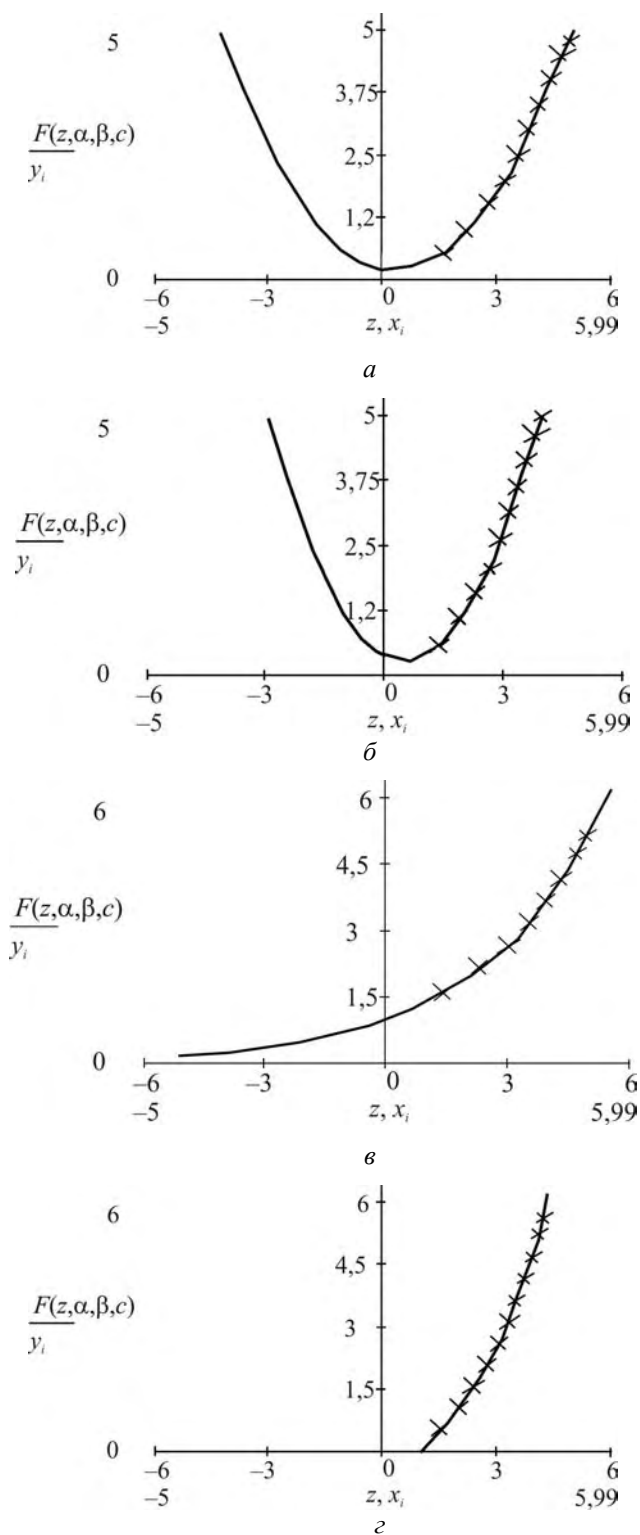


Рис. 3. Графики аппроксимирующих кривых для границ жесткого грунтового ядра под гибким (*a*; *в*) и жестким (*б*; *г*) фундаментами

Для расчета принимали не менее трех возможных очертаний уплотненного ядра. Всего было апробировано десять видов теоретических кривых (прямая, парабола, гипербола и т.д.). Функцию, наилучшим образом аппроксимирующую экспериментальное очертание уплотненного ядра, выбирали по дисперсии и корреляционному отношению. В результате было установлено, что границы уплотненного ядра в глинистых грунтах твердой консистенции лучше всего описываются двумя ветвями параболы $y = ax^2 + b$, а в глинистых грунтах полутвердой и тугопластичной консистенции — двумя ветвями функции вида $y = C \ln \frac{x}{a} + d$, где a — полуширина штампа.

Таким образом, независимо друг от друга получены теоретический и экспериментальный результаты, говорящие о том, что форма уплотненного грунтового ядра может не быть треугольной как в сыпучей, так и в связной среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М. : Стройиздат, 1978.
2. Вихарева О.А. Пакет прикладных программ для исследования устойчивости грунтовых массивов ASV32 / А.Н. Богомолов, О.А. Вихарева, М.П. Кривчиков, А.В. Редин // Город, экология, строительство : программа, доклады и сообщения международной научно-практической конференции, Каир, Египет, 1999 / ВолгГАСА. Волгоград, 1999.
3. Богомолов А.Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь : ПГТУ, 1996.
4. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. : Наука, 1966.
5. Вихарева О.А. К вопросу о форме уплотненного грунтового ядра, образующегося в основании фундамента / А.Н. Богомолов, О.А. Вихарева, Д.П. Торшин // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. 2001. Вып. 4.
6. Цветков В.К. Расчет устойчивости откосов и склонов. Волгоград : Нижне-Волжское кн. изд-во, 1979.
7. Вихарева О.А. Уравнения границ областей пластических деформаций грунта в основании заглубленного фундамента / О.А. Вихарева, В.А. Пшеничкина // Архитектурно-градостроительные и строительные проблемы национального проекта — доступное комфортное жилье : доклады и сообщения междунар. науч.-практ. конф.-семинара, Шарджа, ОАЭ, 2006. Волгоград, 2006.
8. Вихарева О.А. Исследование формы упругого грунтового ядра, образующегося под жестким заглубленным фундаментом // Региональные технологические и экономико-социальные проблемы развития строительного комплекса Волгоградской области. Наука. Практика. Образование : материалы II науч.-техн. конф. Ч. I. Волгоград, 2005.
9. Гениев Г.А. К вопросу о постановке смешанной задачи теории упругости и статике сыпучей среды // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1966. № 5.
10. Дубов К.А. Форма уплотненного ядра, образующегося в глинистом основании под жестким фундаментом при критической нагрузке // Основания, фундаменты и подземные сооружения. Сб. № 63. М. : Стройиздат, 1972.

УДК 692.23:699.8

А.Г. Перехоженцев**РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ В МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ**

Приведена методика расчета распределения влаги в многослойных ограждающих конструкциях зданий для неизо термических квазистационарных условий эксплуатации на основе потенциала влажности.

The method is given to analyze the humidity distribution in multi-layer building envelope for nonisothermic quasistationary conditions of building maintenance, basing on humidity potential.

Нестационарные тепло-влажностные процессы в наружных ограждающих конструкциях зданий на основе изотермического относительного потенциала влажности описываются системой дифференциальных уравнений параболического типа, которая для одномерного случая имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_t \cdot \operatorname{div}\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_o}{\partial \tau} = a_\theta \operatorname{div}\left(\frac{\partial \theta_o}{\partial x}\right) - a_\theta \delta_\theta \operatorname{div}\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right), \end{cases} \quad (2)$$

где t — температура; α_t и a_θ — коэффициенты теплопроводности и потенциало проводности влаги; δ_θ — термоградиентный коэффициент; θ_o — относительный потенциал влажности, определяемый по формуле [1]

$$\theta_o = -10,857 \ln(1-\varphi),$$

где φ — относительная влажность воздуха.

При квазистационарном режиме, т.е. режиме установившемся при повторении равнозначных граничных условий, в данном случае при ежегодных повторениях климатических параметров, можно выбрать наиболее неблагоприятные условия, для которых произвести расчет. В этом случае система уравнений (1), (2) будет иметь вид уравнений для стационарных условий, т.е.

$$\begin{cases} \alpha_t \frac{\partial t}{\partial x} = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - a_\theta \delta_\theta \frac{\partial t}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решение уравнения (3) для любой точки многослойной конструкции при известных граничных условиях и заданных характеристиках материалов будет иметь вид

$$t_i = t_B - \frac{(t_B - t_H)}{R_o} \cdot (R_B + \sum R_i). \quad (5)$$

При квазистационарных условиях, как это видно из уравнения (4), изотермический поток влаги уравнивается термовлагопроводностью, т.е.

$$a_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} = a_{\theta} \delta_{\theta} \cdot \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (6)$$

В конечно-разностной форме это уравнение можно переписать следующим образом:

$$\frac{\Delta \theta}{R_{\theta}} = \delta_{\theta} \frac{\Delta t}{R_{\theta}}, \quad (7)$$

где $R_{\theta} = \frac{\Delta x}{a_{\theta}}$ — сопротивление влагопередаче, $\Delta \theta = (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{н}})$, $\Delta t = t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$.

Из условия равенства удельных потоков потенциалов влажности определим разность $\Delta \theta$

$$\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{н}} = \frac{\theta_{\text{в}} - \theta_i}{\sum R_{\theta i}} \cdot R_{\theta}. \quad (8)$$

Подставляя в (7) значения $\Delta \theta$ из уравнения (8) и Δt из уравнения (5), получим:

$$\frac{(\theta_{\text{в}} - \theta_i) R_{\theta}}{R_{\theta} \cdot \sum R_{\theta i}} = \delta_{\theta} \frac{(t_{\text{в}} - t_i) R_o}{R_{\theta} \sum R_i}. \quad (9)$$

Значения потенциалов влажности для любого сечения i многослойной конструкции определим из уравнения (9):

$$\theta_i = \theta_{\text{в}} - (t_{\text{в}} - t_i) \frac{R_o \sum R_{\theta i}}{R_{\theta} \sum R_i} \cdot \delta_{\theta}. \quad (10)$$

Таким образом, определив распределение температуры в конструкции по уравнению (5), подставляя соответствующие значения в (10), определим распределение потенциалов влажности в конструкции.

Соответствующее распределение влагосодержания в конструкции определим по зависимостям $\theta = f(\omega_o)$.

Рассмотрим решение задачи определения влаги в многослойной конструкции на примере.

П р и м е р. Определить распределение влажности в материалах трехслойной керамзитобетонной панели, утепленной жесткими минераловатными плитами, в жилом доме, расположенном в г. Москве.

Исходные данные:

г. Москва, условия эксплуатации «Б»;

температура холодного периода года $t_x = -15$ °С;

относительная влажность наружного воздуха в холодный период года $\varphi_{\text{н}} = 84$ %;

температура холодной пятидневки $t_{\text{хп}} = -28$ °С;

ГСОП = 4943 °С сут;

температура внутреннего воздуха в помещении $t_{\text{в}} = 20$ °С;

относительная влажность воздуха в помещении $\varphi_{\text{н}} = 60$ %.

Конструкция стены: внутренний слой из керамзитобетона $\rho_0 = 1400$ кг/м³ толщиной 120 мм; утепляющий — из минераловатных плит $\rho_0 = 300$ кг/м³ толщиной 140 мм; наружный — из керамзитобетона $\rho_0 = 1400$ кг/м³ толщиной 80 мм.

Характеристики материалов:

керамзитобетон: $\lambda_{\text{Б}}^{\text{кб}} = 0,65 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$; $\alpha_{\theta}^{\text{кб}} = 0,754 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{р} \cdot ^\circ\text{В}$; $\delta_{\theta}^{\text{кб}} = 0,054 \text{ } ^\circ\text{В}/^\circ\text{C}$;

минеральные плиты: $\lambda_{\text{Б}}^{\text{мб}} = 0,71 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$; $\alpha_{\theta}^{\text{мб}} = 0,092 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{р} \cdot ^\circ\text{В}$; $\delta_{\theta}^{\text{мб}} = 2,0 \text{ } ^\circ\text{В}/^\circ\text{C}$;

относительный потенциал влажности воздуха в помещении, $^\circ\text{В}$ —

$$\theta_{\text{в}} = -10,857 \text{ Ln}(1-\varphi_{\text{в}}) = 9,95;$$

относительный потенциал влажности наружного воздуха, $^\circ\text{В}$ —

$$\theta_{\text{н}} = -10,857 \text{ Ln}(1-\varphi_{\text{н}}) = 19,9;$$

Общее сопротивление теплопередаче конструкции, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ —

$$R_0 = R_{\text{в}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + R_{\text{н}} = 0,115 + 0,185 + 2,0 + 0,123 + 0,043 = 2,466.$$

Сопротивление теплопередаче потенциалов влажности определим по формуле:

$$R_0 = \frac{\delta_1}{\alpha_{\theta 1}} + \frac{\delta_2}{\alpha_{\theta 2}} + \frac{\delta_3}{\alpha_{\theta 3}} = \frac{0,12}{0,754 \cdot 10^{-5}} + \frac{0,14}{0,092 \cdot 10^{-5}} + \frac{0,08}{0,754 \cdot 10^{-5}} = 1,82 \cdot 10^5.$$

Для более точного расчета каждый из слоев разобьем на две части, таким образом получим дополнительные расчетные слои.

Распределение температуры по слоям определим по формуле:

$$\tau_i = t_{\text{в}} - (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \sum R_i / R_0.$$

Получим следующее послойное распределение температуры:

$$\tau_{\text{в}} = 18,7 \text{ } ^\circ\text{C}; \tau_{11} = 17,0 \text{ } ^\circ\text{C}; \tau_{1,2} = 15,7 \text{ } ^\circ\text{C}; \tau_{22} = 1,53 \text{ } ^\circ\text{C}; \tau_{2,3} = -12,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_{33} = -13,2 \text{ } ^\circ\text{C}; \tau_{\text{н}} = -14,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Далее определим распределение потенциалов влажности по слоям по формуле (10):

$$\theta_i = \theta_{\text{в}} + (t_{\text{в}} - \tau_i) (R_0 \sum R_{\text{и}i} \cdot \delta_{\text{и}i}) / (R_{\text{и}} \cdot \sum R_i).$$

Получим следующее распределение потенциалов влажности (рис. 1) по слоям:

$$\theta_{\text{в}} = 9,95 \text{ } ^\circ\text{В}; \theta_{11} = 10,5 \text{ } ^\circ\text{В}; \theta_{12} = 10,1 \text{ } ^\circ\text{В}; \theta_{22} = 26 \text{ } ^\circ\text{В}; \theta_{23} = 75,7 \text{ } ^\circ\text{В}; \theta_{33} = 11,8 \text{ } ^\circ\text{В}; \theta_{\text{н}} = 11,4 \text{ } ^\circ\text{В}.$$

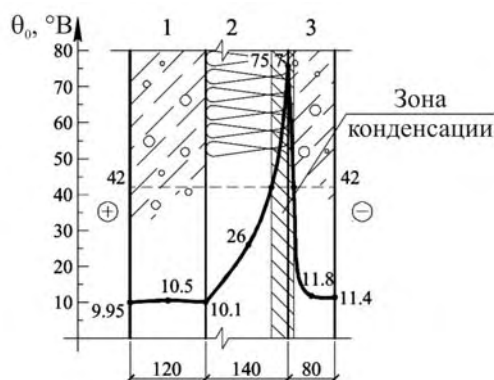


Рис. 1. Распределение потенциалов влажности в конструкции

Для получения распределения влаги в конструкции воспользуемся зависимостями $\theta = f(\omega_0)$, полученными по кривым капиллярного испарения керамзитобетона и минеральной ваты (рис. 2).

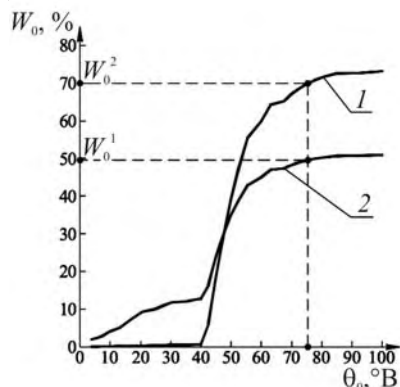


Рис. 2. Зависимости объемных влагосодержаний материалов от относительного потенциала влажности: 1 — керамзитобетон; 2 — минераловатные плиты

Излом в зависимостях на рис. 2 при $\theta_0 = 42^\circ\text{В}$ отмечает переход от адсорбционной связи влаги с материалом к капиллярной. Поэтому части конструкции на стыке слоев 2 и 3, где потенциал влажности превышает величину 42°В , находятся в зоне капиллярной конденсации.

По известным потенциалам влажности по зависимостям $\theta = f(\omega_0)$ получим следующее распределение объемных влагосодержаний, %: $\omega_{\text{в}}^{\text{кб}} = 4,0$; $\omega_{1,1}^{\text{кб}} = 4,35$; $\omega_{1,2}^{\text{кб}} = 4,2$; $\omega_{1,2}^{\text{мв}} = 0,2$; $\omega_{2,2}^{\text{мв}} = 0,45$; $\omega_{2,3}^{\text{мв}} = 70$; $\omega_{2,3}^{\text{кб}} = 49,5$; $\omega_{3,3}^{\text{кб}} = 4,8$; $\omega_{3,\text{н}}^{\text{кб}} = 4,5$.

На стыках слоев из разных материалов потенциалы влажности для разных материалов равны между собой. Влагосодержания же на стыке слоев из разных материалов имеют скачок. Поэтому для таких стыков слоев влагосодержания приведены для соответствующих материалов слева и справа от стыка (рис. 3).

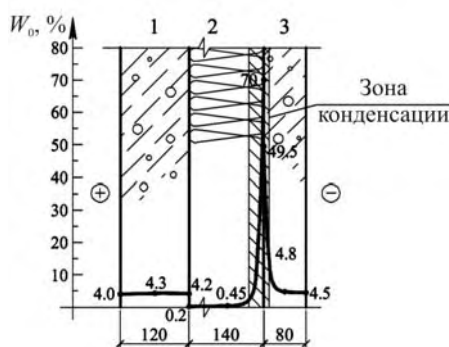


Рис. 3. Распределение объемных влагосодержаний в материалах конструкции

Таким образом, по данной методике можно получить примерное распределение влагосодержаний материалов в многослойных конструкциях наружных ограждений зданий, состоящих из различных материалов, при неизотермическом квазистационарном режиме эксплуатации. При этом получаем результаты как в диапазоне сорбционного увлажнения материалов, так и при так называемом «сверхсорбционном» увлажнении капиллярной влагой, например, при увлажнении в результате термической конденсации влаги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перехоженцев А.Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий / ВолгГАСА. Волгоград, 1997. 273 с.

© Перехоженцев А.Г., 2006

УДК 699.812.2: 624.012

А.Ф. Жарков**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛОВ ОГНЕСТОЙКОСТИ НАРУЖНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ С ДЕРЕВЯННЫМ КАРКАСОМ И ЭФФЕКТИВНЫМ УТЕПЛИТЕЛЕМ**

Приведены методика и результаты расчетов температурных полей конструкций. Коэффициент теплопроводности среды принимали переменным во времени и зависящим от температуры. Нестационарное температурное поле в конструкции трехслойной панели определялось численно методом конечных разностей (МКР). Доказано, что предел огнестойкости конструкции в составе здания $t_{r,T}$ отличается от предела огнестойкости конструкции при огневом испытании t_r , поскольку на усилия от нормативной нагрузки S_{ser} накладываются температурные усилия S_t , возрастающие и изменяющиеся по мере развития пожара.

The principles and results of calculations of temperature fields of designs are given. Thermal diffusivity environments accepted factor a variable in time and dependent on temperature. The non-stationary temperature field in a design of the three-layer panel was defined numerically by a finite difference method. The limit of fire resistance of a design in structure of a building $t_{r,T}$, differs from a limit of fire resistance of a firing test t_r , as on efforts from normative loading S_{ser} temperature efforts S_t are imposed, growing, and varied in process of development of a fire.

Рабочие чертежи трехслойных панелей наружных стен разработаны ООО «ТСК» для жилых полносборных малоэтажных домов, возводимых в Волгоградской области.

Номенклатура стеновых панелей включает глухие панели, панели с оконным проемом и балконной дверью. Толщина деревянных брусков в стеновых панелях принята 150 мм, ширина — 50 мм. Толщина деревянных брусков в перекрытии принята 250 мм, ширина — 50 мм. Деревянные бруски имеют поверхностную неглубокую обработку антипиреном.

Определение огнестойкости конструкции определяем из решения двумерного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье в плоской системе координат

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \Delta^2 T = a_t \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где T — в нашем случае искомая функция температуры T ; Δ — дифференциальный оператор Лапласа; x, y — координаты конструкции.

Расчет прогрева конструкций производится при условии изменения температуры нагреваемой среды по режиму «стандартного пожара», описываемого выражением:

$$T = 345 \lg(0,133\tau + 1) + t_n, \quad (2)$$

где t_n — начальная температура конструкций до пожара, $t_n = 293$ К.

В расчетах учитывали физическую нелинейность теплотехнических свойств материалов. Коэффициент теплопроводности среды принимали переменным во времени и зависящим от температуры:

$$a_t = \frac{\lambda_t}{C_t \rho_m}, \quad (3)$$

где λ_t — коэффициент теплопроводности материала с учетом изменения свойств от температуры t , Вт/(м·°C); C_t — удельная теплоемкость материала с учетом изменения свойств от температуры t , кДж/(кг·°C); ρ_m — объемная плотность материала, кг/м³.

Объемная плотность всех материалов принималась неизменяемой, за исключением массы минплиты «URSA». Результаты экспериментальных исследований, проведенных совместно с сотрудниками ИПЛ УПС МЧС РФ г. Волгограда показали, что масса плиты при огневом воздействии не постоянна, и с увеличением температуры уменьшается (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Потеря веса минплиты «URSA», %, от температуры пожара

Потеря массы, %	0,25	1,16	1,3	3,6	6,2	6,7	7,4	8,6	8,7
Температура, °C	100	200	300	350	400	450	500	550	600
Аппроксимация	0,311	1,33	3,112	4,299	5,688	7,281	9,08	11,09	13,31

Изменение объемной плотности минплиты «URSA» аппроксимировалось зависимостью с наибольшим коэффициентом корреляции, равным 0,9517:

$$\rho_m^{\text{минплиты}} = 0,00002t^{2,096}, \quad (4)$$

где t — температура пожара.

Зависимость (4) использовалась в расчете температурных полей. Уменьшение массы утеплителя приводит к увеличению теплопроводности (3) конструкции, что увеличивает скорость повышения температуры в конструкции.

В расчетах учитывали изменение:

коэффициентов теплопроводности металла, утеплителя и ЦСП (цементно-стружечных плит) от температуры:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{мет}} &= 65 - 0,048t, \\ \lambda_{\text{ут}} &= 0,05 + 0,00058t, \\ \lambda_{\text{ЦСП}} &= 0,23 + 0,00035t, \end{aligned} \quad (5)$$

где t — температура пожара;

коэффициентов теплоемкости металла, утеплителя и ЦСП от температуры:

$$\begin{aligned} C_{\text{мет}} &= 0,44 + 0,00063t, \\ C_{\text{ут}} &= 0,84 + 0,00063t, \\ C_{\text{ЦСП}} &= 1 + 0,0006t. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициент теплопроводности среды принимали переменным во времени и зависящим от температуры по (3) (табл. 2).

При решении задачи нестационарной теплопроводности (1) использовались граничные условия 3-го рода, что позволяет учитывать изменение теплофизических свойств пограничного слоя в течение времени и в зависимости от температуры среды.

Коэффициент теплоотдачи α , Вт/м²·К, от среды пожара к поверхности конструкции определили по формуле [3]:

$$\alpha = 29 + 5,77\varepsilon_{\text{пр}} \frac{(t_{\text{п}}/100)^4 - (t_0/100)^4}{t_{\text{п}} - t_0}, \quad (7)$$

где 29 — конвективная составляющая теплового потока, принималась постоянной; 5,77 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты системы «нагревающая среда — поверхность конструкции»

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1}, \quad (8)$$

где ε — степень черноты нагревающей среды, $\varepsilon=0,85$; ε_1 — степень черноты поверхности конструкций, принималась равной 0,91.

Т а б л и ц а 2

Изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры пожара

Температура, °С	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
a , мет, м ² /час	0,018	0,015	0,013	0,01	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003
a , ут, м ² /час	0,072	0,12	0,174	0,225	0,274	0,324	0,377	0,436	0,505	0,59
a , цсп, м ² /час	2E-04	3E-04	3E-04	3E-04	3E-04	3E-04	3E-04	3E-04	3E-04	4E-04

На холодной поверхности конструкции коэффициент теплоотдачи от нагреваемой поверхности с температурой t_x в окружающую среду $t_0=20$ °С определили по уравнению

$$\alpha_1 = k_1 \sqrt[3]{t_x - t_0} + 5,675 \varepsilon_{\text{пр}} \frac{(t_x/100)^4 - (t_0/100)^4}{t_x - t_0} > 8,7, \quad (9)$$

где $k_1=1,5$ Вт/м² °С; 8,7 — коэффициент теплоотдачи для внутренней поверхности согласно СНиП II-3-79 [1].

Нестационарное температурное поле в конструкции трехслойной панели определяли численно методом конечных разностей (МКР). МКР основан на замене производных их приближенными значениями, выраженными через разности значений функций в отдельных дискретных точках — узлах сетки.

Для равномерной сетки уравнение (1) в конечно-разностном представлении запишется в виде:

$$T_{i,t+1} = T_{i,t} + a_t \Delta t_{\text{max}} \left(\frac{T_\ell + T_k + T_n + T_m - 4T_i}{\lambda^2} \right); \quad (10)$$

при неравномерном шаге сетки (рис. 1) — в виде:

$$T_{i,t+1} = T_{i,t} + a_t \Delta t_{\text{max}} \left[\frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left(\frac{T_k}{\lambda_1} - \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) T_i + \frac{T_\ell}{\lambda_2} \right) + \frac{2}{\lambda_3 + \lambda_4} \left(\frac{T_m}{\lambda_3} - \left(\frac{1}{\lambda_3} + \frac{1}{\lambda_4} \right) T_i + \frac{T_n}{\lambda_4} \right) \right]. \quad (11)$$

При равномерной сетке $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda$ формула (11) преобразуется в (10).

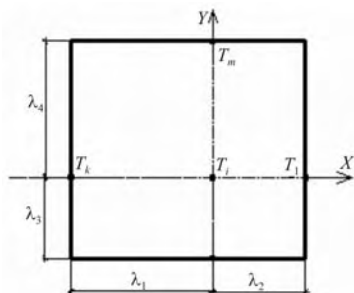


Рис. 1. К расчету МКР с неравномерной сеткой

Максимальный интервал времени при решении задачи не должен превышать следующего значения:

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{\lambda_{\min}^2}{4a_t}, \quad (12)$$

где $\lambda_{\min}$ — минимальный размер наносимой на конструкцию сетки.

Максимальный интервал расчетного времени на шаге приращения должен быть выбран таким образом, чтобы за все время решения задачи с изменяемыми физическими свойствами материалов он не превышал величину (12). Перед началом решения задачи для начальных и максимальных значений температуропроводности анализируется величина $\Delta t_{\max}$ и принимается ее минимальное значение. При соблюдении условия (12) гарантируется устойчивое решение задачи.

Изменение физических свойств материалов на $i+1$ -м шаге решения задачи линейризуется и принимается постоянным, равным значениям i -го шага, на $i+2$ -м шаге — соответственно равным свойствам материалов $i+1$ -го шага.

С учетом минимального разбиения конструкции на элементы, равного 5 мм (для металла), временной шаг решения задачи составлял 0,035 с, и общее количество неизвестных для панели Н4 составило 355 млрд. Такие задачи на компьютере Pentium4 с тактовой частотой процессора 3600 мс занимают примерно 2 ч машинного времени.

Изменение теплофизических свойств материалов в стеновой панели Н4 через 60 мин пожара представлено на рис. 2.

График распределения температуры в конструкции панели Н4 через 60 мин пожара приведен на рис. 3. Пики температуры находятся в металлических шурупах крепления обшивки из ЦСП к деревянным брускам.

При температуре 230...250 °С древесина полностью теряет способность сопротивляться действующим нагрузкам [5]. Экспериментальные исследования, проведенные в ЦНИИСК [4], показали, что самостоятельное пламенное горение древесины начинается при температуре 238...255 °С. Воспламенение древесины может произойти при отсутствии открытого источника огня. При быстром нагревании (1-2 мин) древесина воспламеняется при температуре свыше 330 °С. При длительном нагревании температура самовоспламенения снижается до 166 °С [4]. В расчетах огнестойкости принимали температуру 238 °С, при которой прочность считаем равной нулю.

Панель Н4 состоит из шести деревянных стоек, и уменьшение их сечения при пожаре приведено в табл. 3, уменьшение момента инерции — на рис. 4.

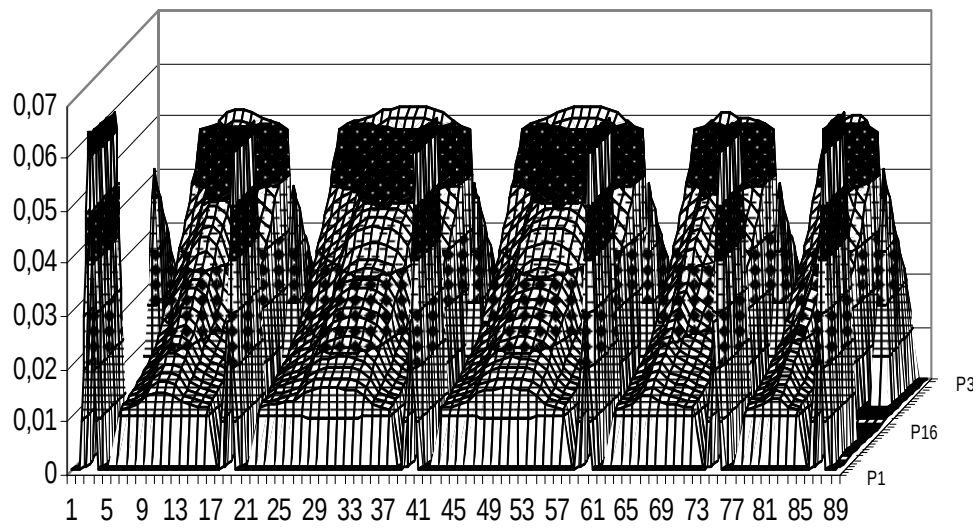


Рис. 2. Температуропроводность через 60 мин пожара

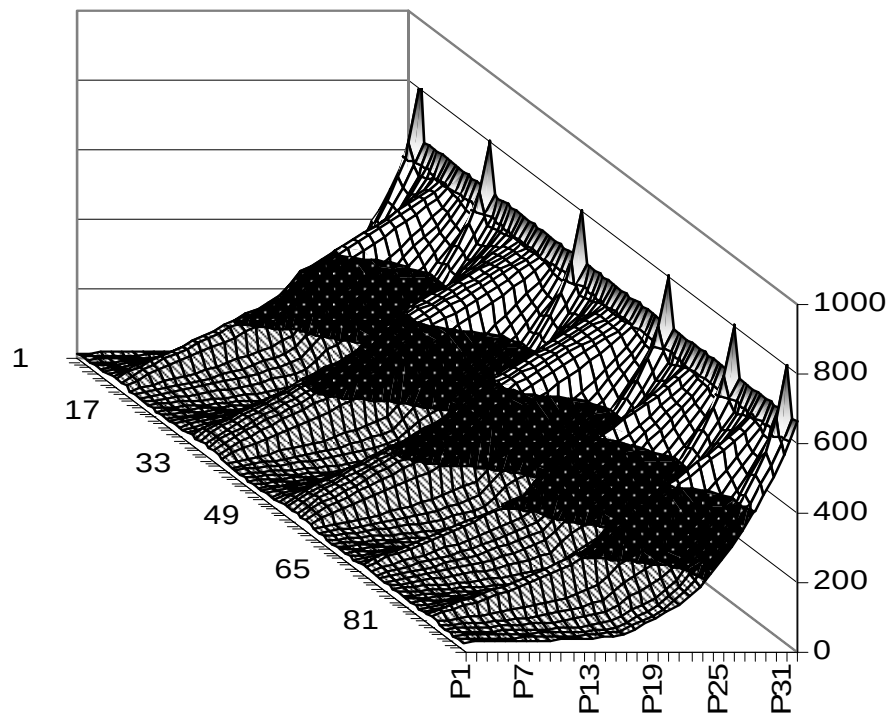


Рис. 3. Температурное поле в панели Н4 через 60 мин пожара

Т а б л и ц а 3

*Уменьшение рабочей высоты деревянных ребер
при стандартном пожаре в панели Н4*

Время, мин	Рабочая высота стоек в панели Н4 при стандартном пожаре, см					
	1	2	3	4	5	6
180,02708	8,50	7,375	7,500	7,500	7,500	7,375
150,03923	9,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,7
119,99936	9,9	8,8	8,8	8,8	8,8	9,6
90,017294	10,8	9,8	9,9	10,0	9,9	10,6
60,006328	12,0	11,3	11,3	11,3	11,3	11,8
46,523643	12,5	12,0	12,0	12,0	12,0	12,4
30,035816	13,5	13,0	13,0	13,0	13,0	13,5
0	15	15	15	15	15	15

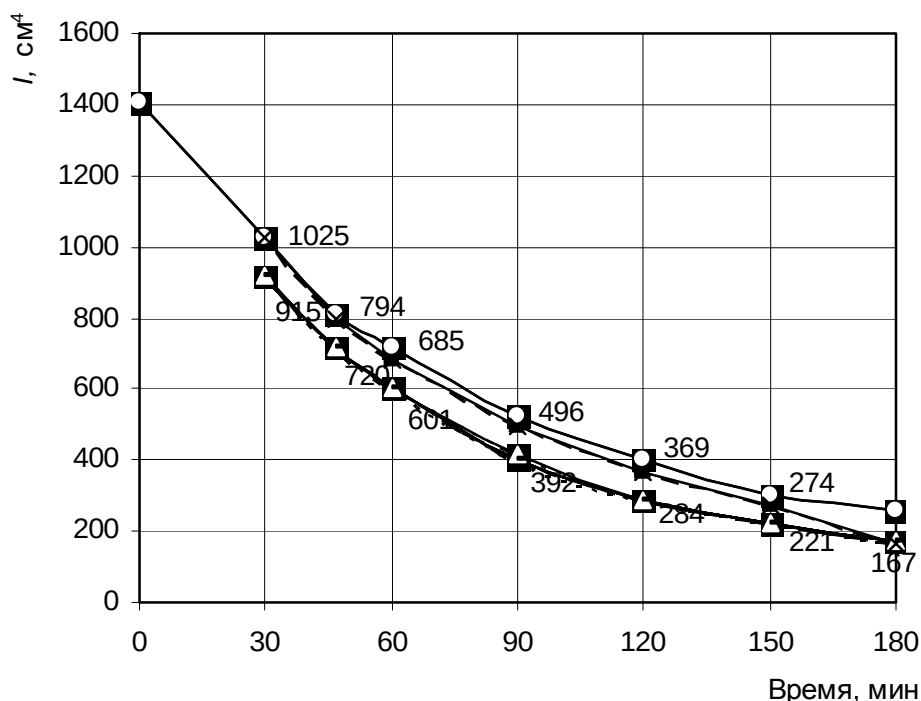


Рис. 4. Уменьшение момента инерции деревянных стоек в панели Н4 при стандартном пожаре

Вследствие обугливания древесины происходит изменение геометрических характеристик сечения элемента. Показатели сопротивления древесины для расчета на огнестойкость приняты по табл. 31[4].

В литературе [4, 6] приведена методика расчета огнестойкости деревянных конструкций с помощью графиков и таблиц для элементов прямоугольных сечений при обугливании с четырех сторон. В нашем случае обугливание в основном происходит с одной стороны (со стороны огневого воздействия), и с двух сторон — для стоек панелей в месте расположения окон.

Поэтому методики расчета [4, 6] имеют ограниченное применение, но полезны с точки зрения их дополнения и развития.

При статическом расчете учитывали следующие нагрузки с их нормативными значениями, которые вошли в 6 загрузений: 1) загрузка от собственного веса конструкций; 2) нагрузка от веса обшивки панелей и утеплителя и его влажности по всей площади принималась как равномерно распределенная с нормативным значением 0,062 т/м по поверхности перекрытия и 0,0477 т/м для стеновых панелей; 3) полезная нагрузка на перекрытия принималась как равномерно распределенная с нормативным значением 0,09 т/м; 4) нагрузка от снега принималась с нормативным значением 65 кг/м; 5) нагрузка от ветра с нормативным значением 30 кг/м; 6) температурное загрузение с моделированием начала пожара на 1-м этаже. Температурный перепад для стержневых элементов рассматривали в зависимости от результатов расчетов температурных полей в трехслойной конструкции на каждом рассматриваемом промежутке времени с шагом 15 мин. При этом сечение элементов задавалось с фактическими размерами, еще не пораженными огнем. Температурная нагрузка на стержни задавалась в местной системе координат в соответствии с рис. 5.

Температурные нагрузки

Стержни | Плиты | Балки-стенки | Оболочки |

Коэффициент линейного расширения 1/градус

☒ Стержни

Действие температуры	Изменение температуры по отношению к температуре замыкания (градусы)
☐ Вдоль оси X1	0
☐ Вдоль оси Y1	Верхняя 20 Нижняя 250
☒ Вдоль оси Z1	H (В) 0.14 м

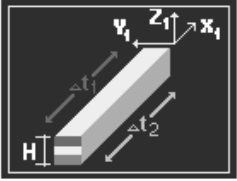


Рис. 5

Загружения комбинировались в 4 сочетаниях (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Номер	Наименование комбинации
1	1·(1) + 1·(2) + 1·(3) + 1·(4)
2	1·(1) + 1·(2) + 1·(3) + 1·(5)
3	1·(1) + 1·(2) + 1·(3) + 0,9·(4) + 0,9·(5)
4	1·(1) + 1·(2) + 1·(3) + 0,9·(4) + 0,9·(5) + 1·(6)

Усилия для расчета прочности деревянных конструкций определены из статического расчета конструкций дома (рис. 6).

Расчет на прочность внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов следует производить по формулам [2]. Расчет прочности и устойчивости деревянной стойки панели Н4 во время пожара приведен в табл. 5 и на рис. 7, 8.

Огнестойкость стеновой панели Н4 по прочности составляет 60 мин (R60).

Т а б л и ц а 5

	Время пожара, мин							
	0	30,04	46,52	60,01	90,02	120,00	150,04	180,03
Нормативное сопротивление древесины 1-го сорта R_c , кг/см ²	250	250	250	250	250	250	250	250
Продольная сила в элементе N , кг	1670	1670	1670	1670	1670	1670	1670	1670
Изгибающий момент в элементе M , кгм	250	250	250	250	250	250	250	250
Приведенная ширина бруса b , см	6	6	6	6	6	6	6	6
Высота бруса h , см	15	13,17	12,15	11,5	10,17	9,12	8,35	7,625
Длина бруса l , см	310	310	310	310	310	310	310	310
Коэффициент закрепления μ , см	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Расчетная длина элемента l , см	226,3	226,3	226,3	226,3	226,3	226,3	226,3	226,3
Момент сопротивления бруса W , см ³	225,00	173,36	147,62	132,25	103,36	83,11	69,72	58,14
Момент инерции бруса I , см ⁴	1687,50	1141,29	896,81	760,44	525,42	378,86	291,09	221,66
Радиус инерции сечения r , см	4,33	3,80	3,51	3,32	2,93	2,63	2,41	2,20
Гибкость элемента λ	52,26	59,54	64,52	68,17	77,11	85,99	93,88	102,81
Коэффициент продольного изгиба φ	0,78	0,72	0,67	0,63	0,50	0,41	0,34	0,28
Коэффициент, учитывающий дополнительный момент, $\xi = 1 - N / \varphi R_c F_{бр}$	0,91	0,88	0,86	0,85	0,78	0,70	0,61	0,49
Изгибающий момент от действия поперечных и продольных сил, кгм, определяемый из расчета по деформированной схеме $M_d = M / \xi$	276,24	283,46	289,82	295,54	319,30	357,65	411,01	514,87
Напряжения от внешних усилий, кг/см ² $(N / F_{рас-}) + (M_d / W_{рас-}) \leq R_c$	141,33	184,65	219,23	247,67	336,29	460,84	622,82	922,06
Коэффициент использования древесины по прочности на сжатие κ	0,57	0,74	0,88	0,99	1,35	1,84	2,49	3,69
Расчет на устойчивость								
Коэффициент $\varphi_M = 140 \frac{b^2}{l_p h} k_{tm}$	2,60	2,96	3,21	3,39	3,83	4,28	4,67	5,11
Устойчивость $\frac{N}{\varphi R_c F_{бр}} + \left(\frac{M_d}{\varphi_M R_H W_{бр}} \right)^n \leq 1$	0,10	0,12	0,14	0,16	0,22	0,31	0,40	0,52

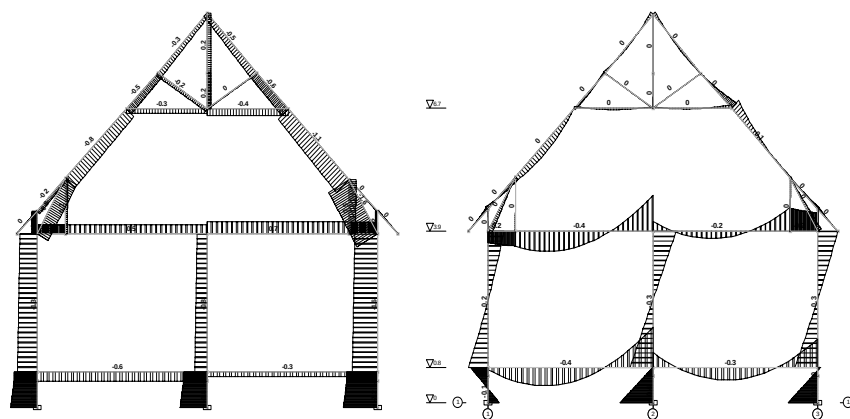


Рис. 6. Усилия N и M от 3-го основного сочетания нагрузок



Рис. 7. Изменение напряжений от внешних усилий в деревянной стойке стеновой панели Н4 во время пожара

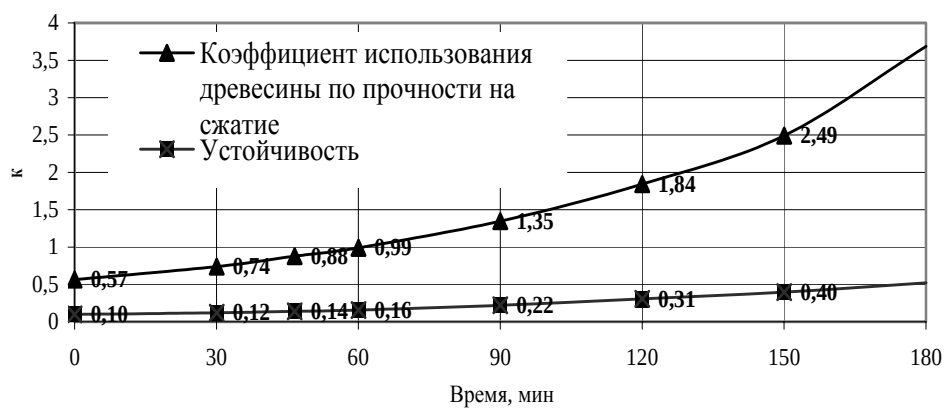


Рис. 8. Коэффициент использования древесины по прочности и устойчивости

Выводы. 1. Уменьшение массы утеплителя приводит к увеличению теплопроводности конструкции, что увеличивает скорость повышения температуры в конструкции. В расчетах необходимо учитывать физическую нелинейность теплотехнических свойств материалов.

2. При расчете огнестойкости в условиях пожара необходимо учитывать дополнительные температурные усилия S_b , возникающие от сдерживания температурных деформаций элемента связями (соседними конструкциями), которые, накладываясь на усилия от нормативной нагрузки S_{ser} , снижают предел огнестойкости по сравнению с расчетом по существующей методике.

3. Собственные температурные напряжения σ_b , возникающие при нелинейном распределении температуры по сечению конструкции, также влияют на несущую способность $R(t)$, увеличивая или снижая ее в зависимости от форм температурного поля.

4. Предел огнестойкости конструкции в составе здания $t_{r,T}$ отличается от предела огнестойкости конструкции при огневом испытании t_r , поскольку на усилия от нормативной нагрузки S_{ser} накладываются температурные усилия S_b , возрастающие по мере развития пожара.

5. Температурные усилия возникают также в ненагретых конструктивных элементах, которые могут потерять прочность в процессе развития пожара.

6. Для расчета огнестойкости статически неопределимых каркасных зданий необходимо рассчитать усилия в конструкциях от нормативной нагрузки, определить температурные усилия в них для различных стадий нагрева заданного участка здания, выявить характер возникновения пластических шарниров и, наконец, определить предельное состояние, характеризующее возникновение геометрически изменяемой схемы. Такие расчеты целесообразно проводить, используя современные программные комплексы, например, ПК «Лира-Windows», SCAD.

7. Результаты расчета рамных статических неопределимых конструкций показывают, что предельное состояние может возникнуть задолго до снижения несущей способности элементов при нагреве R . Причиной этого является накопление температурных деформаций элементов, перераспределение усилий в результате образования пластических шарниров, потеря несущей способности элементов, не подверженных нагреву.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП II-3-79***. Строительная теплотехника / Минстрой России. М. : ГП ЦПП. 2000. 32 с.
2. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. М. : Стройиздат, 1982. 66 с.
3. Инструкция по расчету огнестойкости легких ограждающих конструкций / ВНИИПО. М., 1981. 45 с.
4. Романенков И.Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов / И.Г. Романенков, В.Н. Зигерн-Корн. М. : Стройиздат, 1984. 240 с., ил.
5. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов. М. : Спецтехника, 2001. 496 с.
6. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Б. Бартелеми, Ж. Крюппа. М. : Стройиздат, 1985. 216 с.
7. Фомин С.Л. Основные положения оценки огнестойкости железобетонных зданий // Юбилейные научные чтения по проблемам теории железобетона (посвящ. 80-летию Бондаренко В.М.) / МИКХиС. М. : ИПЦ, 2005. С 90—99.

© Жарков А.Ф., 2006

УДК 624.04:514 + 624.072.33

В.В. Галишникова, П.Я. Паль

ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ ПЛОСКИХ РАМ

Геометрически нелинейная трехмерная теория упругости сведена к двумерной нелинейной теории плоских рам путем введения соответствующих гипотез. Результирующие уравнения решены при помощи численного алгоритма, основанного на методе конечных элементов, определении инкрементальной жесткости через производные по направлениям и методе постоянных дуг для пошагового вычисления кривой перемещения-нагрузки. Полученные численные результаты сравниваются с аналитическими решениями уравнений.

В [1] представлен обобщенный подход к геометрически нелинейному расчету конструкций при произвольно больших перемещениях и углах поворота, но малых относительных деформациях. Этот подход основан на формулировке нелинейной теории упругости, адаптируемой к различным видам конструкций путем введения гипотез, отражающих особенности их работы. В данной статье демонстрируется применение обобщенного подхода к нелинейному расчету плоских рам.

Рассмотрим исходную конфигурацию плоской рамы, состоящей из прямолинейных элементов, соединенных в узлах. Закрепление рамы происходит в узлах, называемых опорными. Перемещения узлов происходят только в плоскости рамы.

Конструкция загружена силами, действующими в ее плоскости и изгибающими моментами, действующими относительно нормалей к этой плоскости. Нагрузки могут быть приложены к узлам или элементам рамы. Предполагается, что узлы рамы не деформируются под нагрузкой, то есть угол между осями элементов,

V. Galishnikova, P.J. Pahl

GEOMETRICALLY NONLINEAR ANALYSIS OF PLANE FRAMES

The geometrically nonlinear theory for elastic solids is reduced by means of a hypothesis to a 2-dimensional theory for plane frames. The resulting governing equations are solved by a numerical algorithm which is based on the finite element method, determination of incremental stiffness by directional derivatives and arc length control for the step-wise computation of the displacement-load curve. The results are compared to analytical solutions of the governing equations.

A unified and general concept for the geometrically nonlinear analysis of elastic solids subject to large displacements and rotations but small strains is presented in [1]. The concept is based on the nonlinear theory of elasticity, which is adapted to each type of structural component by means of a hypothesis that reflects the specific nature of the component behaviour. In this paper, the general concept is applied to the nonlinear analysis of plane frames.

Consider the reference configuration of a plane frame which consists of straight members that are connected at joints. The frame is supported at its joints which do not displace normal to the plane of the frame. It is loaded by forces acting in the plane and by moments acting about the normal to the plane of the frame. The loads are applied either to the members or to the joints. It is assumed that the joints do not deform under load. This implies that the angle between the axes of the members at their common node remains constant under load. The displacements and reactions at the joints as well as the deformations of the members of the

сходящихся в узле, остается постоянным при действии нагрузки.

Предположим также, что все элементы имеют призматическое сечение и размеры их поперечных сечений малы по сравнению с длинами. Сечения принимаются симметричными относительно плоскости рамы, а оси наибольшей жесткости сечений — перпендикулярными к этой плоскости. Основными характеристиками сечения являются его площадь и момент инерции относительно главной оси, перпендикулярной плоскости рамы.

Необходимо определить перемещения и реакции в узлах рамы, а также деформации элементов и внутренние усилия (напряжения) в них.

1. Нелинейная кинематика плоских рам

1.1 Применяемые гипотезы

Теория нелинейного поведения рам выводится из общей нелинейной теории упругости путем введения следующих гипотез.

1. Перемещение каждой точки плоского поперечного сечения элемента является векторной суммой перемещения точки P данного поперечного сечения, лежащей на оси элемента, и перемещения благодаря повороту сечения как жесткого тела относительно оси, проходящей через точку P нормально к плоскости рамы.

2. При повороте поперечного сечения относительно нормали к плоскости рамы волокна элемента, перпендикулярные поперечному сечению в исходной конфигурации, остаются перпендикулярными ему и в мгновенной конфигурации.

1.2. Координатные системы

Поведение рам описывается координатными системами, показанными на рис. 1.1.

frame and their internal stresses are to be determined.

It is assumed that each member is prismatic and that the dimensions of the cross-section are one order of magnitude smaller than the length of the member. The axis passes through the centroid of the cross-section which is assumed to be symmetric with respect to the plane of the frame. The axis normal to the plane of the frame passing through the centroid of a cross-section is therefore a principal axis of the cross-section. The cross-section is described by its area and its moment of inertia about the principal axis normal to the plane of the frame.

1. Nonlinear Kinematics of Plane Frames

1.1. Plane Frame Hypothesis

The theory for the nonlinear behaviour of frames is derived from the general theory for the nonlinear behaviour of elastic bodies by adding the following hypothesis.

1. The displacement of every point on a plane cross-section of a member is the vector sum of the displacement of the point P of the cross-section which lies on the axis and the displacement due to a rigid body rotation of the cross-section about the axis through P normal to the plane of the frame.

2. The angle of rotation of the cross-section about the normal to the plane of the frame is such that a fibre of the member which is normal to the cross-section in the reference configuration remains normal to the rotated cross-section in the instant configuration.

1.2. Coordinate Systems

The behaviour of frames is described with the coordinate systems shown in Fig. 1.1.

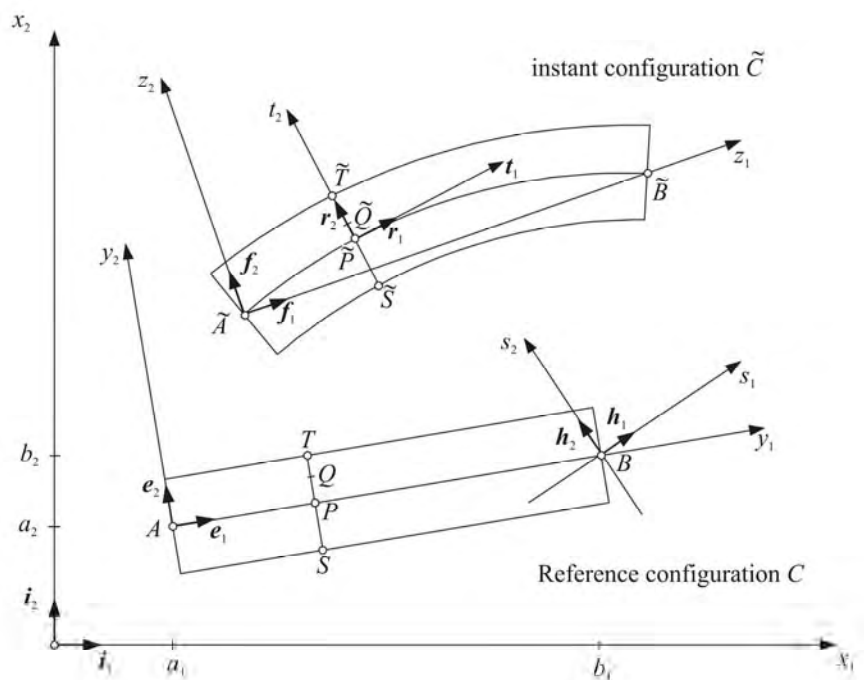


Рис. 1.1. Координатные системы для нелинейного расчета рамы: x_1, x_2 — глобальные координаты с базовыми векторами i_1, i_2 ; y_1, y_2 — исходные координаты с базовыми векторами e_1, e_2 ; z_1, z_2 — мгновенные координаты с базовыми векторами f_1, f_2 ; s_1, s_2 — узловые координаты с базовыми векторами h_1, h_2 ; t_1, t_2 — локальные координаты с базовыми векторами r_1, r_2

Координаты точки x на плоскости могут быть выражены через единичные базовые векторы глобальной системы координат i_1 и i_2 :

$$x = x_1 i_1 + x_2 i_2. \quad (1.1)$$

Узел A выбран началом исходной декартовой системы координат элемента AB на рис. 1.1. Базовый вектор e_1 направлен от A к B , e_3 сонаправлен с i_3 . Исходные координаты y_1, y_2 произвольной точки преобразуются следующим образом:

$$x = a + R_{xy} y \quad (1.2)$$

$$R_{xy}^T R_{xy} = I \quad (1.3)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

Fig. 2.1. Coordinate systems for nonlinear frame analysis: x_1, x_2 — global coordinates with base vectors i_1, i_2 ; y_1, y_2 — reference coordinates with base vectors e_1, e_2 ; z_1, z_2 — instant coordinates with base vectors f_1, f_2 ; s_1, s_2 — node coordinates with base vectors h_1, h_2 ; t_1, t_2 — local coordinates with base vectors r_1, r_2

The unit base vectors of the global coordinate system are denoted by i_1 and i_2 , the coordinates of a point x in the plane by x_1 and x_2 :

Node A is chosen as origin of the Cartesian reference coordinate system of member AB in Fig. 1.1. The base vector e_1 points from A to B , e_3 points in the direction of i_3 . The reference coordinates y_1, y_2 of a point transform as follows:

R_{xy} — матрица поворота из глобального в исходное пространство; e_{1m}, e_{2m} — глобальные координаты базового вектора e_m .

Узел $\tilde{A}$ выбран началом мгновенной декартовой системы координат элемента $\tilde{A}\tilde{B}$ на рис. 1.1. Базовый вектор f_1 направлен вдоль хорды от $\tilde{A}$ к $\tilde{B}$, вектор f_3 сонаправлен с вектором i_3 . Мгновенные координаты z_1, z_2 произвольной точки преобразуются следующим образом:

$$x = \tilde{a} + R_{xz} z \quad (1.4)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

R_{xz} — матрица поворота из глобального в мгновенное пространство; f_{ik} — глобальные координаты исходных базовых векторов f_1, f_2 .

Преобразование между исходным пространством y_1, y_2 и мгновенным пространством z_1, z_2 получается подстановкой значения x из выражения (1.4) в (1.1):

$$y = y_A + R_{yz} z \quad (1.5)$$

$$R_{yz} = R_{xy}^T R_{xz} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

R_{yz} — матрица поворота из исходного в мгновенное пространство; θ — направленный угол от оси y_1 к оси z_1 с положительным направлением против часовой стрелки.

Точки на оси элемента задаются нормализованной координатой z , не зависящей от конфигурации рамы:

исходная конфигурация:

$$y_1 = za$$

мгновенная конфигурация:

$$z_1 = z\tilde{a}$$

$2a$ — длина элемента в исходной конфигурации; $2\tilde{a}$ — длина хорды элемента в мгновенной конфигурации.

R_{xy} — rotation matrix global — reference space; e_{1m}, e_{2m} — global coordinates of base vector e_m .

Node $\tilde{A}$ is chosen as origin of the Cartesian instant coordinate system of member $\tilde{A}\tilde{B}$ in Fig. 1.1. The base vector f_1 points along the chord from $\tilde{A}$ to $\tilde{B}$, f_3 points in the direction of i_3 . The instant coordinates z_1, z_2 of a point transform as follows:

R_{xz} — rotation matrix global — instant space; f_{ik} — global coordinates of the reference base vectors f_1, f_2 .

The transformation between reference space y_1, y_2 and instant space z_1, z_2 is derived by substitution of x from (1.4) into (1.1):

R_{yz} — rotation matrix reference - instant space; θ — angle from axis y_1 to axis z_1 , positive anti-clockwise.

Points on the axis of a member are identified with a normalised coordinate z which is independent of the configuration of the frame:

reference configuration:

$$y_1 = za \quad -1 \leq z \leq 1 \quad (1.7)$$

instant configuration:

$$z_1 = z\tilde{a} \quad (1.8)$$

$2a$ — length of the member in the reference configuration; $2\tilde{a}$ — length of the chord of the member in the instant configuration.

1.3. Векторы перемещений узлов и элементов

Узловой вектор перемещений содержит координаты перемещения и угол поворота β оси элемента относительно нормали к плоскости рамы в данном узле. Он обозначается как $\mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n$ или $\mathbf{w}_n$ в глобальном, исходном или мгновенном пространствах соответственно:

$$\mathbf{u}_n = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \beta \end{bmatrix} \quad \mathbf{v}_n = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \beta \end{bmatrix} \quad \mathbf{w}_n = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \beta \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

u_1, u_2 — координаты перемещения в глобальном пространстве x_1, x_2 ; v_1, v_2 — координаты перемещения в исходном пространстве y_1, y_2 ; w_1, w_2 — координаты перемещения в мгновенном пространстве z_1, z_2 .

Координаты векторов узловых перемещений преобразуются при помощи матриц поворота, определенных в 1.2:

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{R}_{nxy} \mathbf{v}_n \quad \mathbf{u}_n = \mathbf{R}_{nxz} \mathbf{w}_n \quad \mathbf{v}_n = \mathbf{R}_{nyz} \mathbf{w}_n$$

$$\mathbf{R}_{nxy} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{xy} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{nyz} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{yz} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Вектор перемещений элемента содержит векторы перемещений его узлов. Он обозначается, как $\mathbf{u}_e, \mathbf{v}_e$ и $\mathbf{w}_e$ в глобальном, исходном и мгновенном пространствах:

$$\mathbf{u}_e = \begin{bmatrix} u_{1A} \\ u_{2A} \\ \beta_A \\ u_{1B} \\ u_{2B} \\ \beta_B \end{bmatrix} \quad \mathbf{v}_e = \begin{bmatrix} v_{1A} \\ v_{2A} \\ \beta_A \\ v_{1B} \\ v_{2B} \\ \beta_B \end{bmatrix} \quad \mathbf{w}_e = \begin{bmatrix} w_{1A} \\ w_{2A} \\ \beta_A \\ w_{1B} \\ w_{2B} \\ \beta_B \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Преобразование координат для вектора перемещений элемента следует из (1.10):

1.3. Node and Element Displacement Vectors

The node displacement vector contains the coordinates of the displacement and the angle of rotation β of the axis about the normal to plane of the frame at the node. It is denoted by $\mathbf{u}_n, \mathbf{v}_n$ or $\mathbf{w}_n$ for the global, reference or instant spaces:

u_1, u_2 — displacement coordinates in global space x_1, x_2 ; v_1, v_2 — displacement coordinates in reference space y_1, y_2 ; w_1, w_2 — displacement coordinates in instant space z_1, z_2 .

The coordinates of the node displacement vectors are transformed by means of the rotation matrices defined in section 1.2:

The member displacement vector contains the displacement vectors for the nodes of the member. It is denoted by $\mathbf{u}_e, \mathbf{v}_e$ or $\mathbf{w}_e$ for the global, reference or instant spaces:

The coordinate transformation for member displacement vectors follows from (1.10):

$$\mathbf{u}_e = \mathbf{R}_{exy} \mathbf{v}_e \quad \mathbf{u}_e = \mathbf{R}_{exz} \mathbf{w}_e \quad \mathbf{v}_e = \mathbf{R}_{eyz} \mathbf{w}_e \quad (1.12)$$

$$\mathbf{R}_{exy} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{nxy} & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_{nxy} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{eyz} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{nyz} & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_{nyz} \end{bmatrix}$$

1.4. Поворот поперечного сечения

Рассмотрим поворот точки P относительно прямолинейной оси, заданной единичным вектором $\mathbf{a}$, показанный на рис. 1.2. Пусть перпендикуляр, опущенный из точки P , пересекает ось в точке M и пусть P поворачивается вокруг точки M против часовой стрелки на угол β , переходя в точку Q . Единичные векторы $\mathbf{e}$ в направлении от P к M и $\mathbf{n}$, нормальный к $\mathbf{e}$, задаются следующим образом:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{p} = r \mathbf{n} \quad (1.13)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{a} \times \mathbf{n} = \frac{1}{r} \mathbf{a} \times (\mathbf{a} \times \mathbf{p}) \quad (1.14)$$

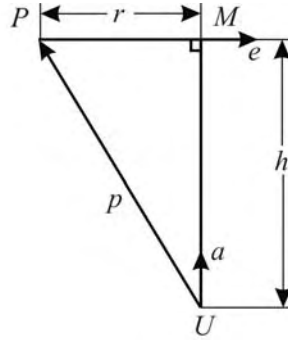
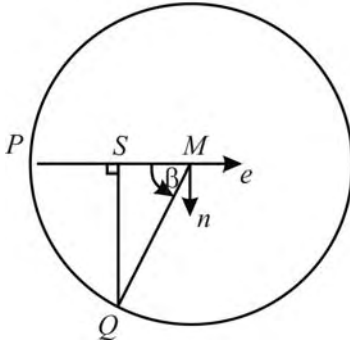


Рис. 1.2. Поворот точки P относительно оси $\mathbf{a}$

Fig. 1.2. Rotation of point P about axis $\mathbf{a}$

Вектор $\overline{UQ}$ обозначается как $\tilde{\mathbf{p}}$:

The vector $\overline{UQ}$ is denoted by $\tilde{\mathbf{p}}$:

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{p} + r \mathbf{e} (1 - \cos \beta) + r \mathbf{n} \sin \beta,$$

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{p} + (1 - \cos \beta) \mathbf{a} \times (\mathbf{a} \times \mathbf{p}) + \sin \beta \mathbf{a} \times \mathbf{p}. \quad (1.15)$$

Векторное произведение $\mathbf{a} \times \mathbf{p}$

The cross-product $\mathbf{a} \times \mathbf{p}$ is written

записывается в матричной форме:

in matrix form:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{p} = \mathbf{A} \mathbf{p} \quad (1.16)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица поворота $\mathbf{R}$ и перемещение $\mathbf{u}$ точки P следуют из (1.15) и (1.16):

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{R} \mathbf{p}, \quad (1.17)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \mathbf{A} \sin \beta + \mathbf{A}^2 (1 - \cos \beta), \quad (1.18)$$

$$\mathbf{u} = \sin \beta \mathbf{A} \mathbf{p} + (1 - \cos \beta) \mathbf{A}^2 \mathbf{p}. \quad (1.19)$$

Перемещение $\mathbf{u}_\theta$ точки Q относительно P на рис. 1.1 следует из (1.19):

$$\mathbf{u}_\theta = \begin{bmatrix} -y_2 \sin \beta \\ -y_2 (1 - \cos \beta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

1.5. Перемещения точек поперечного сечения

Перемещение $\mathbf{v}_Q$ точки Q , принадлежащей поперечному сечению, проходящему через P на рис. 1.1, является суммой перемещения $\mathbf{v}_P$ точки P и относительного перемещения точки Q , задаваемого выражением (1.20):

$$\mathbf{v}_Q = \mathbf{v}_P + y_2 \bar{\mathbf{v}}_P \quad (1.21)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_P = \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ -(1 - \cos \beta) \end{bmatrix}$$

Мгновенные базовые векторы $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2$ в точке $\tilde{Q}$ в мгновенной конфигурации определяются как производные вектора положения $\mathbf{v}_Q$:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_1 &= \mathbf{i}_1 + \frac{\partial \mathbf{v}_Q}{\partial y_1} = \begin{bmatrix} 1 + v_{1,1} \\ v_{2,1} \end{bmatrix} + y_2 \begin{bmatrix} \bar{v}_{1,1} \\ \bar{v}_{2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + v_{1,1} \\ v_{2,1} \end{bmatrix} + y_2 \begin{bmatrix} -\cos \beta \\ -\sin \beta \end{bmatrix} \frac{d\beta}{dy_1} \\ \mathbf{c}_2 &= \mathbf{i}_2 + \bar{\mathbf{v}}_P = \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ 1 + \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.22)$$

Матрица поворота поперечного сечения SPT на рис. 1.1 обозначена $\mathbf{R}_P$:

The rotation matrix $\mathbf{R}$ and the displacement $\mathbf{u}$ of P follow from (1.15) and (1.16):

The displacement $\mathbf{u}_\theta$ of Q relative to P in Fig. 1.1 follows from (1.19):

1.5. Displacement of points on a cross-section:

The displacement $\mathbf{v}_Q$ of point Q on the cross-section passing through P in Fig. 1.1 is the sum of the displacement $\mathbf{v}_P$ of P and the relative displacement (1.20) of Q :

The instant base vectors $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2$ at point $\tilde{Q}$ in the instant configuration are denoted by $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2$ and determined as derivatives of the location vector $\mathbf{v}_Q$:

The rotation matrix for cross-section SPT in Fig. 1.1 is denoted by $\mathbf{R}_P$:

$$\mathbf{R}_P = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Столбцы матрицы $\mathbf{R}_p$ обозначены как $\mathbf{r}_1$ и $\mathbf{r}_2$. Базовый вектор $\mathbf{c}_2$ равен $\mathbf{r}_2$. Гипотеза плоских рам удовлетворяется путем выбора угла β таким, что $\mathbf{c}_1$ становится нормальным к $\mathbf{r}_2$:

$$\begin{aligned} \tan \beta &= \frac{v_{2,1}}{1+v_{1,1}} & \sin \beta &= \frac{v_{2,1}}{d} & \cos \beta &= \frac{1+v_{1,1}}{d} \\ d &= \sqrt{(1+v_{1,1})^2 + (v_{2,1})^2} \end{aligned} \quad (1.24)$$

$$\mathbf{c}_1 = \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} (d - y_2 \frac{d\beta}{dy_1}) \quad \mathbf{c}_2 = \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

Компоненты перемещений точки Q в выражении (1.21) дифференцируются по координатам y_1, y_2 исходного пространства:

The displacement coordinates of point Q in (1.21) are differentiated with respect to the reference coordinates y_1, y_2 :

$$\frac{\partial \mathbf{v}_Q}{\partial y_1} = \frac{\partial \mathbf{v}_P}{\partial y_1} + y_2 \frac{\partial \bar{\mathbf{v}}_P}{\partial y_1} \quad (1.26)$$

$$\begin{bmatrix} v_{1Q,1} \\ v_{2Q,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1,1} \\ v_{2,1} \end{bmatrix} + \frac{y_2}{d} (v_{1,11} \sin \beta - v_{2,11} \cos \beta) \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_Q}{\partial y_2} = \bar{\mathbf{v}}_P \quad (1.27)$$

$$\begin{bmatrix} v_{1Q,2} \\ v_{2Q,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ -(1 - \cos \beta) \end{bmatrix}$$

1.6. Деформированное состояние

Деформированное состояние описывается тензором относительных деформаций Грина (см. 3.2 [1]). Перемещение v_3 равно нулю благодаря симметрии относительно плоскости рамы. Производные перемещений v_1 и v_2 по координате y_3 равны нулю согласно принятой гипотезе. В результате относительные деформации e_{31}, e_{32} и e_{33} равны нулю, и остающиеся относительные деформации сводятся к следующим выражениям:

1.6. State of Strain

The state of strain is described with the strain tensor of Green [2]. The displacement v_3 is null due to the symmetry about the plane of the frame. The derivatives of v_1 and v_2 with respect to y_3 are null by hypothesis. As a result, the strains e_{31}, e_{32}, e_{33} are null and the remaining strains reduce to:

$$\begin{aligned} e_{11Q} &= \{v_{1,1} + \frac{1}{2}(v_{1,1}^2 + v_{2,1}^2)\}_Q, \\ e_{22Q} &= \{v_{2,2} + \frac{1}{2}(v_{1,2}^2 + v_{2,2}^2)\}_Q, \end{aligned} \quad (1.28)$$

$$e_{12Q} = \frac{1}{2}\{v_{1,2} + v_{2,1} + v_{1,1}v_{1,2} + v_{2,1}v_{2,2}\}_Q.$$

Подстановка выражений (1.21), (1.26) и (1.27) в (1.28) показывает, что деформации e_{22} и e_{12} равны нулю. Осевая относительная деформация e_{11Q} определяется подстановкой выражения (1.27) в (1.28):

$$e_{11Q} = v_{1,1} + \frac{1}{2}(v_{1,1}^2 + v_{2,1}^2) + y_2 F + \left(\frac{y_2 F}{d}\right)^2, \quad (1.29)$$

$$F := v_{1,11} \sin \beta - v_{2,11} \cos \beta. \quad (1.30)$$

Так как θ не зависит от y_1 , то подстановка (1.5) в (1.30) дает следующее выражение:

$$F = w_{1,11} \sin \gamma - w_{2,11} \cos \gamma, \quad (1.31)$$

$$\gamma := \beta - \theta \quad (1.32)$$

угол поворота оси относительно хорды angle of rotation of the axis relative to the chord

Величина F в выражении (1.31) выражается через значение w_{11} , которое по теории балок равно изгибающему моменту, деленному на изгибную жесткость. Таким образом, $y_2 F$ является отношением нормального напряжения при изгибе к модулю упругости, что значительно меньше единицы. Последним членом выражения (1.29) можно пренебречь, и продольная относительная деформация ε определится выражением

$$\varepsilon = v_{1,1} + \frac{1}{2}(v_{1,1}^2 + v_{2,1}^2) + y_2(w_{1,11} \sin \gamma - w_{2,11} \cos \gamma). \quad (1.33)$$

2. Нелинейная статика плоских рам

2.1. Интегральная форма разрешающих уравнений

Интегральная форма разрешающих уравнений нелинейной теории упругости для трехмерных тел приведена в уравнении (3.49) [1]. Для

Substitution of (1.21), (1.26) and (1.27) into (1.28) shows that e_{22} and e_{12} are null. The axial strain e_{11Q} is determined by substitution of (1.27) into (1.28):

Since θ is independent of y_1 , substitution of (1.5) into (1.30) yields:

F in (1.31) is approximated by w_{11} , which by beam theory equals the bending moment divided by the bending stiffness. Thus $y_2 F$ is the ratio of axial bending stress to modulus of elasticity, which is much smaller than 1.0. The last term in (1.29) can therefore be disregarded, and the longitudinal strain ε is then given by:

2. Nonlinear Statics of Plane Frames

2.1. Integral Form of the Governing Equations

The integral form [3] of the governing equations for the nonlinear behaviour of elastic bodies is specialized for plane frames. Each integral over the

случая плоских рам каждый интеграл по объему тела заменяется суммой интегралов по объемам элементов конструкции. Скалярное произведение $\delta \mathbf{e}^T \mathbf{y}$ заменяется вариацией $\delta \varepsilon$ осевой относительной деформации, умноженной на осевое напряжение σ . Объемная нагрузка $\rho \mathbf{q}$ заменяется нагрузкой $\mathbf{p}_a$ на единицу длины в исходном состоянии. Поверхностные нагрузки и реакции в узлах заменяются нагрузками и реакциями в узлах рамы с использованием уравнения (3.76) [1]. В результате получим следующую интегральную форму разрешающих уравнений для плоских рам:

$$\sum_e \int_{C_e} \delta \varepsilon s dv = \sum_e \int_{L_e} \delta \mathbf{v}^T \mathbf{p}_a dy_1 + \delta (\Delta \mathbf{u}_s)^T (\mathbf{q}_n + \mathbf{r}_s) \quad (2.1)$$

где C_e — объем элемента e ; $\mathbf{v}$ — перемещение точки на оси элемента (в координатном пространстве y_1, y_2); $\Delta \mathbf{u}_s$ — приращение вектора перемещений системы (в координатном пространстве x_1, x_2); $\mathbf{q}_n$ — вектор узловых нагрузок системы (в координатном пространстве x_1, x_2); $\mathbf{r}_s$ — вектор реакций системы (в координатном пространстве x_1, x_2).

2.2. Равнодействующие напряжения

Продольная относительная деформация на расстоянии y_2 от оси элемента задана выражением (1.33):

$$\varepsilon = \varepsilon_a + y_2 \bar{\varepsilon}_b, \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_a = v_{1,1} + \frac{1}{2}(v_{1,1}^2 + v_{2,1}^2), \quad (2.3)$$

$$\bar{\varepsilon}_b = w_{1,11} \sin \gamma - w_{2,11} \cos \gamma, \quad (2.4)$$

где ε_a — осевая относительная деформация; $\bar{\varepsilon}_b$ — производная относительной деформации изгиба по переменной y_2 .

Выражение для вектора напряжений $\mathbf{s}$, действующего в поперечном сечении мгновенной конфигурации, следует из определения второго тензора Пиолы — Кирхгофа:

$$\mathbf{s} = s \mathbf{c}_1 = E \varepsilon \mathbf{c}_1. \quad (2.5)$$

volume of the body is replaced by the sum of the integrals over the volumes of the members. The scalar product $\delta \mathbf{e}^T \mathbf{y}$ is replaced by the variation $\delta \varepsilon$ of the axial strain times the axial stress σ . The volume load $\rho \mathbf{q}$ is replaced by a load $\mathbf{p}_a$ per unit length in the reference configuration. The surface loads and reactions are replaced by loads and reactions at the joints of the frame, as derived in [1]. This leads to the following integral form of the governing equations for plane frames:

C_e — volume of element e ; v — displacement of a point on the axis (coordinates in space y_1, y_2); $\Delta \mathbf{u}_s$ — increment of the system displacement vector (coordinates in space x_1, x_2); $\mathbf{q}_n$ — system node load vector (coordinates in space x_1, x_2).

2.2. Stress Resultants

The longitudinal strain at distance y_2 from the axis of the member is given by (1.33):

ε_a — axial strain; $\bar{\varepsilon}_b$ — bending strain derivative with respect to y_2 .

The stress vector $\mathbf{s}$ acting on a cross-section of the instant configuration follows from the definition of the 2. Piola-Kirchhoff tensor:

Физическое напряжение σ отнесено к вектору единичной длины в направлении c_1 . Оно раскладывается на осевое напряжение σ_a и производную нормального напряжения при изгибе $\bar{\sigma}_b$:

$$\begin{aligned}\sigma &= |c_1|s = \sigma_a + y_2 \bar{\sigma}_b, \\ \sigma_a &= E \varepsilon_a |c_1| \quad \bar{\sigma}_b = E \bar{\varepsilon}_b |c_1|.\end{aligned}\quad (2.6)$$

Напряжение σ_a создает осевую силу n в центре тяжести сечения, действующую по касательной к оси элемента в мгновенной конфигурации:

$$n = \int_A (\sigma_a + y_2 \bar{\sigma}_b) da = A \sigma_a. \quad (2.7)$$

Напряжение $y_2 \bar{\sigma}_b$ приводит к изгибающему моменту m , действующему относительно оси, нормальной к плоскости рамы в центре тяжести поперечного сечения:

$$m = \int_A (\sigma_a + y_2 \bar{\sigma}_b) y_2 da = I \bar{\sigma}_b \quad (2.8)$$

2.3. Приращения переменных состояния

Интегральная форма инкрементальных разрешающих уравнений, описывающих нелинейное поведение упругих тел, приведена в уравнении (3.63) [1]. Для частного случая плоских рам переменные состояния выражаются как суммы их значений в известной мгновенной конфигурации $\tilde{C}$ и приращений (инкрементов) при переходе к следующей, неизвестной конфигурации $\bar{C}$:

$$\begin{aligned}\bar{v}_i &= v_i + \Delta v_i \text{ —} \\ \text{перемещение,} & \quad \text{displacement,} \\ \bar{\varepsilon} &= \varepsilon + \Delta \varepsilon \text{ —} \\ \text{относительная деформация,} & \quad \text{strain,} \\ \bar{s} &= s + \Delta s \text{ —} \quad (2.9) \\ \text{напряжение,} & \quad \text{stress,} \\ \bar{p}_{ai} &= p_{ai} + \Delta p_{ai} \text{ —} \\ \text{нагрузка.} & \quad \text{load.}\end{aligned}$$

Осевая относительная деформация в известном мгновенном состоя-

The physical stress σ is referred to a vector of unit length in the direction of c_1 . It is decomposed into an axial stress σ_a and a bending stress derivative $\bar{\sigma}_b$:

The stress σ_a leads to an axial force n at the centroid of the cross-section which is tangential to the axis in the instant configuration:

The stress $y_2 \bar{\sigma}_b$ leads to a bending moment m acting about an axis normal to the plane of the frame through the centroid of the cross-section:

2.3. Increments of the State Variables

The integral form [1] of the incremental governing equations for the nonlinear behaviour of elastic solids is specialized for plane frames. The behavioural variables are expressed as sums of their value in the known instant configuration $\tilde{C}$ and an increment to the next configuration $\bar{C}$, which is unknown:

The strain on the axis in the known instant configuration $\tilde{C}$ is

нии $\tilde{C}$ задана уравнением (2.3). Относительная деформация в неизвестном мгновенном состоянии $\bar{C}$ может быть определена по аналогии:

$$\begin{aligned}\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_a &= (v_{1,1} + \Delta v_{1,1}) + \frac{1}{2}(v_{1,1} + \Delta v_{1,1})^2 + \frac{1}{2}(v_{2,1} + \Delta v_{2,1})^2, \\ \Delta\varepsilon_a &= \Delta v_{1,1} + v_{1,1}\Delta v_{1,1} + \frac{1}{2}(\Delta v_{1,1})^2 + v_{2,1}\Delta v_{2,1} + \frac{1}{2}(\Delta v_{2,1})^2.\end{aligned}\quad (2.10)$$

Инкремент относительной деформации $\Delta\varepsilon_a$ раскладывается на компоненту $\Delta\varepsilon_a^0$, которая линейно зависит от $\Delta v_{i,1}$, и компоненту $\Delta\varepsilon_a^n$, которая зависит от квадрата $\Delta v_{i,1}$:

$$\Delta\varepsilon_a = \Delta\varepsilon_a^0 + \Delta\varepsilon_a^n, \quad (2.11)$$

$$\Delta\varepsilon_a^0 = \Delta v_{1,1} + v_{1,1}\Delta v_{1,1} + v_{2,1}\Delta v_{2,1}, \quad (2.12)$$

$$\Delta\varepsilon_a^n = \frac{1}{2}(\Delta v_{1,1})^2 + \frac{1}{2}(\Delta v_{2,1})^2. \quad (2.13)$$

Производная изгибной относительной деформации в мгновенной конфигурации $\tilde{C}$ задана выражением (2.4). Предполагается, что угол γ достаточно мал, так что $\sin\gamma$ может быть приближенно принят равным нулю, а $\cos\gamma$ — равным 1. Производная изгибной относительной деформации тогда запишется как

$$\Delta\bar{\varepsilon}_b = -\Delta w_{2,11}. \quad (2.14)$$

Так как рама в известной мгновенной конфигурации находится в равновесии, то вариации переменных состояния в мгновенной конфигурации $\tilde{C}$ полагаются равными нулю:

$$\delta\bar{\mathbf{u}} = \delta(\mathbf{u} + \Delta\mathbf{u}) = \delta\mathbf{u} + \delta(\Delta\mathbf{u}) = \delta(\Delta\mathbf{u}), \quad (2.15)$$

$$\delta(\mathbf{v}_e + \Delta\mathbf{v}_e) = \delta(\Delta\mathbf{v}_e), \quad (2.16)$$

$$\delta(\mathbf{w}_e + \Delta\mathbf{w}_e) = \delta(\Delta\mathbf{w}_e), \quad (2.17)$$

$$\delta(\Delta\varepsilon_a^0) = (1 + v_{1,1})\delta(\Delta v_{1,1}) + v_{2,1}\delta(\Delta v_{2,1}), \quad (2.18)$$

$$\delta(\Delta\varepsilon_a^n) = \Delta v_{1,1}\delta(\Delta v_{1,1}) + \Delta v_{2,1}\delta(\Delta v_{2,1}), \quad (2.19)$$

$$\delta(\Delta\bar{\varepsilon}_b) = y_2\delta(\Delta\bar{\varepsilon}_b) = -y_2\delta(\Delta w_{2,11}). \quad (2.20)$$

given by (2.3). The strain in the unknown instant configuration $\bar{C}$ is analogously given by:

The strain increment $\Delta\varepsilon_a$ is split into a component $\Delta\varepsilon_a^0$ which depends linearly on $\Delta v_{i,1}$ and a component $\Delta\varepsilon_a^n$ which depends on the square of $\Delta v_{i,1}$:

The bending strain derivative in the instant configuration $\tilde{C}$ is given by (2.4). It is assumed that γ is sufficiently small so that $\sin\gamma$ can be approximated by 0 and $\cos\gamma$ by 1. The derivative of the bending strain is then given by:

Since the frame is in equilibrium in the known instant configuration, the variations of the behavioural variables in the instant configuration $\tilde{C}$ are set to null:

2.4. Инкрементальные разрешающие уравнения

Разрешающее уравнение (2.1) применяется к мгновенной конфигурации $\bar{C}$. Второе напряжение Пиолы — Кирхгофа раскладывается на осевое напряжение s_a и производную нормального напряжения при изгибе $\bar{s}_b$:

$$\begin{aligned} s &= s_a + y_2 \bar{s}_b, \\ s_a &= E \varepsilon_a, \quad \bar{s}_b = E \bar{\varepsilon}_b. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Из левой части уравнения (2.1) следует:

$$\begin{aligned} \sum_e \int_{C_e} \delta(\varepsilon + \Delta \varepsilon)(s + \Delta s) dv &= \sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^0) s_a dv + \\ &+ \sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^0) \Delta s_a dv + \sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^n) s_a dv + \sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^n) \Delta s_a dv + \\ &+ \sum_e \int_{C_e} y_2^2 \delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b) \bar{s}_b dv + \sum_e \int_{C_e} y_2^2 \delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b) \Delta \bar{s}_b dv. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Правая часть уравнения (2.1) дает:

$$\begin{aligned} \sum_e \int_{L_e} \delta(\mathbf{v} + \Delta \mathbf{v})^T (\mathbf{p}_a + \Delta \mathbf{p}_a) dy_1 + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T (\mathbf{q}_n + \Delta \mathbf{q}_n + \mathbf{r}_s + \Delta \mathbf{r}_s) = \\ = \sum_e \int_{L_e} \delta(\Delta \mathbf{v})^T \mathbf{p}_a dy_1 + \sum_e \int_{L_e} \delta(\Delta \mathbf{v}) \Delta \mathbf{p}_a dy_1 + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{q}_n + \\ + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \Delta \mathbf{q}_n + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{r}_s + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \Delta \mathbf{r}_s. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Члены, описывающие поведение конструкции в известной мгновенной конфигурации, не являются точными и не уничтожаются, а составляют в сумме член, определяющий погрешность δe :

$$\begin{aligned} \delta e = - \sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^0) s_a dv - \sum_e \int_{C_e} y_2^2 \delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b) \bar{s}_b dv + \\ + \sum_e \int_{L_e} \delta(\Delta \mathbf{v})^T \mathbf{p}_a dy_1 + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{q}_n + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{r}_s. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Второй член правой части (2.22) запишется как:

$$\begin{aligned} \sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^0) \Delta s_a dv = \sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^0) E \Delta \varepsilon_a^0 dv + \\ + \sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^0) E \Delta \varepsilon_a^n dv. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Вторым членом в правой части уравнения (2.25) можно пренебречь,

2.4. Incremental Governing Equations

The governing equation (2.1) is applied to the instant configuration $\bar{C}$. The 2. Piola-Kirchhoff stress is decomposed into axial stress s_a and bending stress derivative $\bar{s}_b$:

The left-hand side of (2.1) yields:

The right-hand side of (3.1) yields:

The terms associated with the behaviour in the known instant configuration $\tilde{C}$ are not exact and therefore do not cancel, but rather lead to an error term δe :

The second term on the right-hand side of (2.22) yields:

The second term on the right hand side of (2.25) is neglected because it is

так как он содержит квадрат инкремента перемещения. Выражение (2.12) для $\Delta \varepsilon_a^0$ подставляется в (2.25), после чего выполняется аналитическое интегрирование по площади сечения:

$$\sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^0) E \Delta \varepsilon_a^0 dv = \sum_e \int_{L_e} E A_e ((1 + v_{1,1}) \delta(\Delta v_{1,1}) + v_{2,1} \delta(\Delta v_{2,1})) ((1 + v_{1,1}) (\Delta v_{1,1}) + v_{2,1} (\Delta v_{2,1})) dy_1. \quad (2.26)$$

Выражение (2.19) подставляется в третий член правой части (2.22). Выполняется аналитическое интегрирование по площади поперечного сечения:

$$\sum_e \int_{C_e} \delta(\Delta \varepsilon_a^n) s_a dv = \sum_e \int_{L_e} A_e s_a (\Delta v_{1,1} \delta(\Delta v_{1,1}) + \Delta v_{2,1} \delta(\Delta v_{2,1})) dy_1. \quad (2.27)$$

Четвертым членом правой части (2.22) можно пренебречь, так как он зависит от квадрата инкремента перемещения. Значение $\Delta \bar{\varepsilon}_b$ из выражения (2.14) подставляется в последний член правой части уравнения (2.22):

$$\sum_e \int_{C_e} y_2^2 \delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b) \Delta \bar{\varepsilon}_b dv = \sum_e \int_{L_e} E I_b \delta(\Delta w_{2,11}) \Delta w_{2,11} dy_1. \quad (2.28)$$

Подстановка выражений с (2.22) по (2.24) и с (2.26) по (2.28) в (2.1) дает инкрементальное разрешающее уравнение для плоских рам:

$$\begin{aligned} & \sum_e \int_{L_e} E A_e ((1 + v_{1,1}) \delta(\Delta v_{1,1}) + v_{2,1} \delta(\Delta v_{2,1})) ((1 + v_{1,1}) (\Delta v_{1,1}) + \\ & + v_{2,1} (\Delta v_{2,1})) dy_1 + \sum_e \int_{L_e} E I_b \delta(\Delta w_{2,11}) \Delta w_{2,11} dy_1 + \\ & + \sum_e \int_{L_e} A_e s_a (\Delta v_{1,1} \delta(\Delta v_{1,1}) + \Delta v_{2,1} \delta(\Delta v_{2,1})) dy_1 = \\ & = \delta e + \sum_e \int_{L_e} \delta(\Delta \mathbf{v})^T \Delta \mathbf{p}_a dy_1 + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \Delta \mathbf{q}_s + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \Delta \mathbf{r}_s. \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.5. Условие малости относительных деформаций

Разложим перемещение элемента (рис. 1.1) из состояния AB в состояние $\tilde{A}\tilde{B}$ на следующие составляющие:

а) линейное перемещение элемента как жесткого тела, при кото-

quadratic in the displacement increments. Expression (2.12) for $\Delta \varepsilon_a^0$ is substituted into (2.25) and the integration over the cross-section is performed analytically:

Expression (2.19) is substituted into the third term on the right hand side of (2.22). The integration over the cross-section is performed analytically:

The fourth term on the right hand side of (2.22) is neglected because it is quadratic in the increments of the displacement. The value of $\Delta \bar{\varepsilon}_b$ from (2.14) is substituted into the last term on the right hand side of (2.22):

Substitution of (2.22) to (2.24) and (2.26) to (2.28) into (2.1) leads to the incremental governing equation for plane frames:

2.5. Small Strain Condition

Let the displacement of the member in Fig. 1.1 from AB to $\tilde{A}\tilde{B}$ be decomposed into the following components:

a) a rigid body translation, which is strain-free and moves A to $\tilde{A}$,

ром точка A перемещается в точку $\tilde{A}$ без деформирования элемента;

б) поворот элемента как жесткого тела вокруг точки $\tilde{A}$, при котором точка B перемещается в точку $\tilde{B}$ на отрезке $\tilde{A}\tilde{B}$ без деформирования элемента;

в) растяжение отрезка $\tilde{A}\tilde{B}$, вызывающее осевые относительные деформации, при котором точка $\tilde{B}$ перемещается в точку $\tilde{B}$;

г) перемещение, нормальное к оси элемента, вызывающее изгибные относительные деформации.

Пусть бесконечно малая длина продольного волокна равна ds в исходной конфигурации и $d\tilde{s}$ — в мгновенной конфигурации. Из определения относительных деформаций e_{11} Грина и $\tilde{e}_{11}$ Эйлера, рассмотренных совместно с выражениями с (2.11) по (2.14), следует:

$$d\tilde{s}^2 - ds^2 = e_{11} dy_1^2 = (v_{1,1} + \frac{1}{2}v_{1,1}^2 + \frac{1}{2}v_{2,1}^2 - y_2 w_{2,11}) dy_1^2, \quad (2.30)$$

$$d\tilde{s}^2 - ds^2 = \tilde{e}_{11} dz_1^2 = (w_{1,1} - \frac{1}{2}w_{1,1}^2 - \frac{1}{2}w_{2,1}^2 - z_2 w_{2,11}) dz_1^2. \quad (2.31)$$

Производные перемещения $v_{i,1}$ в выражении (2.30) относятся к исходному пространству. Благодаря большим перемещениям и углам поворота в составляющих перемещения (a) и (b) , эти производные не являются малыми величинами. Производные перемещения $w_{i,1}$ в выражении (2.31) отнесены к мгновенному пространству и будут интерполироваться в разделе 3.2 независимо от составляющих перемещения (a) и (b) . Предполагается, что они имеют порядок величин $O(10^{-3})$, таким образом, членами, содержащими $w_{i,1}^2$ можно пренебречь. Приравнивание $d\tilde{s}^2 - ds^2$ в выражениях (2.30) и (2.31) дает выражение относительной деформации Грина через перемещение элемента в мгновенной конфигурации:

b) a rigid body rotation about $\tilde{A}$, which is strain-free and moves B to $\tilde{B}$ on line $\tilde{A}\tilde{B}$,

c) a stretching of the line $\tilde{A}\tilde{B}$ which moves $\tilde{B}$ to $\tilde{B}$ and causes axial strain,

d) a displacement normal to the axis which causes bending strain.

Let the infinitesimal length of a longitudinal fibre be ds in the reference and $d\tilde{s}$ in the instant configuration. The definitions of the strains e_{11} of Green and $\tilde{e}_{11}$ of Euler together with (2.11) to (2.14) yield:

The displacement derivatives $v_{i,1}$ in (2.30) are referred to reference space. Due to large displacements and rotations in displacement components (a) and (b) , these derivatives are not small. The displacement derivatives $w_{i,1}$ in (2.31) are referred to instant space and will be interpolated independent of the displacement components (a) and (b) in section 4.2. It is assumed that they are $O(10^{-3})$, so that the terms containing $w_{i,1}^2$ can be neglected relative to the term containing $w_{1,1}$. Equating $d\tilde{s}^2 - ds^2$ in (2.30) and (2.31) yields an expression for the strain of Green in terms of the displacement of the member in the instant configuration:

$$e_{11} = w_{1,1} - z_2 w_{2,11}. \quad (2.32)$$

Выражения (2.2)—(2.4) для относительных деформаций, (2.11)—(2.14) для инкрементов относительных деформаций и (2.18)—(2.20) для вариаций инкрементов относительных деформаций преобразуются к следующему виду:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_a + z_2 \bar{\varepsilon}_b & \Delta \varepsilon &= \Delta \varepsilon_a + z_2 \Delta \bar{\varepsilon}_b \\ \varepsilon_a &= w_{1,1} & \Delta \varepsilon_a &= \Delta w_{1,1} \\ \bar{\varepsilon}_b &= -w_{2,11} & \Delta \bar{\varepsilon}_b &= -\Delta w_{2,11} \\ \delta(\Delta \varepsilon_a) &= \delta(\Delta w_{1,1}) & \delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b) &= -\delta(\Delta w_{2,11}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Подстановка выражения (2.33) в левую часть (2.1) дает:

Substitution of (2.33) into the left-hand side of (2.1) yields:

$$\begin{aligned} \sum_e \int_{C_e} \delta(\varepsilon + \Delta \varepsilon)(s + \Delta s) dv &= \sum_e \int_{\tilde{C}_e} \delta(\Delta \varepsilon_a) s_a dv + \\ &+ \sum_e \int_{\tilde{C}_e} \delta(\Delta \varepsilon_a) \Delta s_a dv + \sum_e \int_{\tilde{C}_e} z_2^2 \delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b) \bar{s}_b dv + \sum_e \int_{\tilde{C}_e} z_2^2 \delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b) \Delta \bar{s}_b dv. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Векторы $\mathbf{v}$ и $\mathbf{p}_a$ в выражениях (2.23) и (2.24) преобразуются из исходного в мгновенное пространство. Дифференциал dy_1 приводится в соответствие дифференциалу dz_1 при помощи выражений (1.7) и (1.8):

The vectors $\mathbf{v}$ and $\mathbf{p}_a$ in (2.23) and (2.24) are transformed from reference to instant space. The differential dy_1 is mapped to the differential dz_1 with (1.7) and (1.8):

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{v}^T \mathbf{p}_a &= \delta \mathbf{w}^T \mathbf{R}_{yz}^T \mathbf{R}_{yz} \mathbf{p}_z = \delta \mathbf{w}^T \mathbf{p}_z, \\ \tilde{a} dy_1 &= a dz_1. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Инкрементальное разрешающее уравнение (2.29) преобразуется к следующему виду:

The incremental governing equation (2.29) for plane frames is replaced by:

$$\begin{aligned} \sum_e \int_0^{2\tilde{a}} EA_e \delta(\Delta w_{1,1}) \Delta w_{1,1} dz_1 + \sum_e \int_0^{2\tilde{a}} EI_e \delta(\Delta w_{2,11}) \Delta w_{2,11} dz_1 &= \\ = \delta e + \sum_e \int_0^{2\tilde{a}} \frac{a}{\tilde{a}} \delta(\Delta \mathbf{w})^T \Delta \mathbf{p}_z dz_1 + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \Delta \mathbf{q}_s + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \Delta \mathbf{r}_s \end{aligned} \quad (2.36)$$

Погрешность δe в уравнении (2.36) определена выражением (2.24). Для того чтобы записать выражение (2.24) для мгновенного пространства, вариации относительных деформаций $\delta(\Delta \varepsilon_a)$ и $\delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b)$ из выражения (2.33) подставляются в выражение (2.24):

The error term δe in (2.36) is given by (2.24). In order to formulate (2.24) for instant space, the variations $\delta(\Delta \varepsilon_a)$ of the axial strain and $\delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b)$ of the bending strain derivative are substituted from (2.33) into (2.24):

$$\int_0^{2\bar{a}} A_e \delta(\Delta \varepsilon_a) s_a dz_1 = \int_0^{2\bar{a}} E A_e \delta(\Delta w_{1,1}) \varepsilon_a dz_1, \quad (2.37)$$

$$\int_0^{2\bar{a}} I_e \delta(\Delta \bar{\varepsilon}_b) \bar{s}_b dz_1 = - \int_0^{2\bar{a}} E I_e \delta(\Delta w_{2,11}) \bar{\varepsilon}_b dz_1. \quad (2.38)$$

Выражения (2.35) подставляются в третий член выражения (2.24):

Expressions (2.35) are substituted into the third term of (2.24):

$$\int_0^{2a} \delta(\Delta \mathbf{v})^T \mathbf{p}_a dy_1 = \int_0^{2\bar{a}} \frac{a}{\bar{a}} \delta(\Delta \mathbf{w})^T \mathbf{p}_z dz_1. \quad (2.39)$$

Таким образом, погрешность при условии малости относительных деформаций определится следующим образом:

The error term for the small strain condition is thus:

$$\begin{aligned} \delta e = & - \sum_e \int_0^{2\bar{a}} E A_e \delta(\Delta w_{1,1}) \varepsilon_a dz_1 + \sum_e \int_0^{2\bar{a}} E I_e \delta(\Delta w_{2,11}) \bar{\varepsilon}_b dz_1 + \\ & + \sum_e \int_0^{2\bar{a}} \frac{a}{\bar{a}} \delta(\Delta \mathbf{w})^T \mathbf{p}_z dz_1 + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{q}_n + \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{r}_s. \end{aligned} \quad (2.40)$$

3. Алгебраические разрешающие уравнения

3. Algebraic Governing Equations

3.1. Конечно-элементная аппроксимация

3.1. Finite Element Approximation

Алгебраические уравнения, описывающие нелинейное поведение плоских ферм, выводятся при помощи метода конечных элементов, как описано в 3.9 [1]. Вектор перемещений системы содержит по три переменных для каждого узла фермы: координаты линейных перемещений в глобальной системе u_1 , u_2 и поворот β относительно нормали к плоскости рамы. Соответствующими переменными в векторах нагрузок и реакций системы являются глобальные силовые координаты p_1 , p_2 и момент m относительно нормали к плоскости рамы.

The algebraic equations for the nonlinear behaviour of plane trusses are derived by the finite element method as described in [1]. The system displacement vector contains three variables per node of the frame: the global displacement coordinates u_1 , u_2 and the rotation β about the normal to the plane of the frame. The corresponding variables in the system load and reaction vectors are the global force coordinates p_1 , p_2 and the moment m about the normal to the plane of the frame.

В линейной теории рам существуют аппроксимирующие функции для интерполяции перемещений точек на оси элементов, которые точно удовлетворяют разрешающим уравнениям в пределах элементов. Благодаря этому каждый элемент рамы, работающей линейно, может быть представлен одним конечным элементом без потери

The trial functions for the interpolation of the displacement of points on the axis of a member in linear frame theory satisfy the governing equations in the domain of the member exactly. As a result, each member of a linear truss can be modelled by a single finite element without loss of accuracy. Comparable trial functions are not available for nonlinear frames. A frame member may thus

точности. Для нелинейного расчета рам подобных функций не существует, и для достижения требуемой точности может понадобиться представление каждого элемента рамы в виде нескольких конечных элементов.

3.2 Интерполяция переменных состояния

Перемещения интерполируются в мгновенном пространстве. Продольные осевые перемещения линейно интерполируются между их значениями в узлах. Перемещения, связанные с изгибом, равны нулю в узлах и изменяются вдоль оси по кубическому закону. *Перемещение точки z на оси зависит от модифицированного вектора перемещений элемента, обозначаемого в мгновенном пространстве как $\bar{\mathbf{w}}_e$, а в исходном пространстве — как $\bar{\mathbf{v}}_e$. Вектор перемещений точки z на оси элемента обозначается как $\mathbf{w}_p$ в мгновенном пространстве и $\mathbf{v}_p$ — в исходном пространстве.*

have to be subdivided into several finite elements in order to achieve the desired accuracy.

3.2. Interpolation of the State Variables for the Error Vector

The displacement is interpolated in instant space. The displacements due to bar behaviour are interpolated linearly between the node values. The displacements due to bending behaviour are null at the nodes and vary cubically on the axis. The displacement of point z on the axis depends on a modified member displacement vector, which is denoted by $\bar{\mathbf{w}}_e$ in instant space and $\bar{\mathbf{v}}_e$ in reference space. The displacement vector of point z on the axis is denoted by $\mathbf{w}_p$ in instant space and by $\mathbf{v}_p$ in reference space.

$$\mathbf{w}_p = \mathbf{S}_p \bar{\mathbf{w}}_e \quad (3.1)$$

$$\mathbf{S}_p = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \frac{1}{2}(1-z) & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1+z) & 0 & 0 \\ \hline 0 & \frac{1}{2}(1-z) & \frac{\tilde{a}}{4}(1-z-z^2+z^3) & 0 & \frac{1}{2}(1+z) & \frac{\tilde{a}}{4}(-1-z+z^2+z^3) \\ \hline \end{array}$$

$$\bar{\mathbf{w}}_e^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline w_{1A} & w_{2A} & \tan(\beta_A - \theta) & w_{1B} & w_{1B} & \tan(\beta_B - \theta) \\ \hline \end{array}$$

Преобразования (1.12) и (1.10) приводят к следующему выражению: Transformations (1.12) and (2.10) yield:

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{R}_{yz} \mathbf{S}_p \mathbf{R}_{eyz}^T \bar{\mathbf{v}}_e \quad (3.2)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_e^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline v_{1A} & v_{2A} & \tan(\beta_A - \theta) & v_{1B} & v_{2B} & \tan(\beta_B - \theta) \\ \hline \end{array}$$

Первая производная $\mathbf{w}_p$ по y_1 :

The first derivative of $\mathbf{w}_p$ with respect to y_1 is:

$$\frac{\partial \mathbf{w}_p}{\partial y_1} = \frac{\partial \mathbf{S}_p}{\partial y_1} \bar{\mathbf{w}}_e := \mathbf{S}_{p,1} \bar{\mathbf{w}}_e \quad (3.3)$$

$$\mathbf{S}_{p,1} = \frac{1}{a} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -\frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \hline 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\tilde{a}}{4}(-1-2z+3z^2) & 0 & \frac{1}{2} & \frac{\tilde{a}}{4}(-1+2z+3z^2) \\ \hline \end{array}$$

Вторая производная $\mathbf{w}_P$ по y_1 равна: The second derivative of $\mathbf{w}_P$ with respect to y_1 is:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{w}_P}{\partial y_1^2} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}_P}{\partial y_1^2} \bar{\mathbf{w}}_e := \mathbf{S}_{P,11} \bar{\mathbf{w}}_e \quad (3.4)$$

$$\mathbf{S}_{P,11} = \frac{1}{a^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\tilde{a}}{2}(-1+3z) & 0 & 0 & \frac{\tilde{a}}{2}(1+3z) \end{bmatrix}$$

Вариацию относительного поворота γ можно получить из второй строки матрицы $\mathbf{S}_{P,1}$ в выражении (3.3), полагая компоненты w_{2A} и w_{2B} равными нулю: The variation of the relative rotation γ is obtained from the second row of $\mathbf{S}_{P,1}$ in (3.3) by setting the contribution of w_{2A} and w_{2B} to null:

$$\tan \gamma = \mathbf{s}_\gamma^T \bar{\mathbf{w}}_e \quad (3.5)$$

$$\mathbf{s}_\gamma^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{4}(-1-2z+3z^2) & 0 & 0 & \frac{1}{4}(-1+2z+3z^2) \end{bmatrix}$$

Относительная деформация в мгновенной конфигурации определяется подстановкой интерполяций (3.1)—(3.5) в выражение (2.33). The strain in the instant configuration is determined by substituting the interpolations (3.1) to (3.5) into (2.33).

3.3. Интерполяция инкрементов перемещений 3.3. Interpolation of the Increments of the Displacements

Перемещение $\mathbf{w}_P$ в (3.1) является функцией зависимой переменной $\theta(\varphi)$ и независимых переменных $\varphi := \{w_{1A}, w_{2A}, \beta_A, w_{1B}, w_{2B}, \beta_B\}$. Инкремент $\Delta \mathbf{w}$ от $\Delta \varphi$ определяется через производную $\mathbf{w}(\varphi)$ по направлению $\Delta \varphi$: The displacement $\mathbf{w}_P$ in (3.1) is a function of the dependent variable $\theta(\varphi)$ and the independent variables $\varphi := \{w_{1A}, w_{2A}, \beta_A, w_{1B}, w_{2B}, \beta_B\}$. The increment $\Delta \mathbf{w}$ due to $\Delta \varphi$ is determined by means of the derivative of $\mathbf{w}(\varphi)$ in the direction of $\Delta \varphi$:

$$\Delta \mathbf{w} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \langle \mathbf{w}(\varphi + \varepsilon \Delta \varphi) \rangle_{\varepsilon=0}. \quad (3.6)$$

Производные направлений коэффициентов модифицированного вектора перемещений элемента $\bar{\mathbf{w}}_e$ в выражении (3.1) в узлах A и B заданы следующим выражением: The directional derivatives of the translation coefficients of the modified member displacement vector $\bar{\mathbf{w}}_e$ in (3.1) at nodes A and B are given by:

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \langle w_i + \varepsilon \Delta w_i \rangle_{\varepsilon=0} = \Delta w_i \quad i \in \{1, 2\} \quad (3.7)$$

Изменение $\varepsilon \Delta \theta$ угла поворота происходит из-за перемещений, нормальных к хорде элемента: The change $\varepsilon \Delta \theta$ in the rotation is due to the displacements normal to the chord:

$$\varepsilon \Delta \theta = \varepsilon \frac{\Delta w_{2B} - \Delta w_A}{2\tilde{a}}. \quad (3.8)$$

Производная направления функции $\tan(\beta - \theta)$ равна:

The directional derivative of $\tan(\beta - \theta)$ is :

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \langle \tan(\beta + \varepsilon \Delta \beta - \theta - \varepsilon \Delta \theta) \rangle_{\varepsilon=0} = \frac{1}{\cos^2(\beta - \theta)} \left(\Delta \beta - \frac{\Delta w_{BV} - \Delta w_{2A}}{2\tilde{a}} \right). \quad (3.9)$$

Выражение для производной направления $\Delta \bar{\mathbf{w}}_e$ следует из (3.7) и (3.9):

The directional derivative of $\Delta \bar{\mathbf{w}}_e$ follows from (3.7) and (3.9):

$$\Delta \bar{\mathbf{w}}_e = \begin{bmatrix} \Delta w_{1A} & \Delta w_{2A} & k_1 & \Delta w_{1B} & \Delta w_{2B} & k_2 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = \frac{1}{\cos^2 \gamma_A} \left(\Delta \beta_A - \frac{\Delta w_B - \Delta w_A}{2\tilde{a}} \right), \quad k_2 = \frac{1}{\cos^2 \gamma_B} \left(\Delta \beta_B - \frac{\Delta w_B - \Delta w_A}{2\tilde{a}} \right).$$

Произведение $\mathbf{S}_P \Delta \bar{\mathbf{w}}_e$ выражается через независимые переменные:

The product $\mathbf{S}_P \Delta \bar{\mathbf{w}}_e$ is rewritten in terms of the independent variables:

$$\mathbf{w}_P = \mathbf{S}_P \Delta \bar{\mathbf{w}}_e = \bar{\mathbf{S}}_P \Delta \mathbf{w}_e, \quad (3.10)$$

где

$$\bar{\mathbf{S}}_P = \begin{bmatrix} 0.5(1-z) & 0 & 0 & 0.5(1+z) & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & f_2 & 0 & f_3 & f_4 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{w}_e^T = \begin{bmatrix} \Delta w_{1A} & \Delta w_{2A} & \Delta \beta_A & \Delta w_{1B} & \Delta w_{2B} & \Delta \beta_B \end{bmatrix}$$

$$f_1 = \frac{1}{2}(1-z) + \frac{1}{8\cos^2 \gamma_A}(1-z-z^2+z^3) + \frac{1}{8\cos^2 \gamma_B}(-1-z+z^2+z^3)$$

$$f_2 = \frac{\tilde{a}}{4\cos^2 \gamma_A}(1-z-z^2+z^3)$$

$$f_3 = \frac{1}{2}(1+z) - \frac{1}{8\cos^2 \gamma_A}(1-z-z^2+z^3) - \frac{1}{8\cos^2 \gamma_B}(-1-z+z^2+z^3)$$

$$f_4 = \frac{\tilde{a}}{4\cos^2 \gamma_B}(-1-z+z^2+z^3)$$

Аппроксимация $\cos^2 \gamma = 1$ сводит выражение (3.10) к интерполирующим функциям линейной теории рам:

The approximation $\cos^2 \gamma = 1$ reduces (3.10) to the interpolation of linear frame theory:

$$\Delta \mathbf{w}_P = \bar{\mathbf{S}}'_P \Delta \mathbf{w}_e, \quad (3.11)$$

где

$$\bar{\mathbf{S}}'_P = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1-z) & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1+z) & 0 & 0 \\ 0 & f'_1 & f'_2 & 0 & f'_3 & f'_4 \end{bmatrix}$$

$$f_1' = \frac{1}{4}(2 - 3z + z^3), \quad f_2' = \frac{\tilde{a}}{4}(1 - z - z^2 + z^3),$$

$$f_3' = \frac{1}{4}(2 + 3z - z^3), \quad f_4' = \frac{\tilde{a}}{4}(-1 - z + z^2 + z^3).$$

Обозначим строки матрицы $\bar{\mathbf{S}}_P'$ через $\mathbf{s}_1^T$ и $\mathbf{s}_2^T$. Тогда интерполяция инкрементов перемещений запишется как

Let the rows of $\bar{\mathbf{S}}_P'$ be denoted by $\mathbf{s}_1^T$ and $\mathbf{s}_2^T$. Then the displacement increments are interpolated by:

$$\Delta \mathbf{w}_m = \mathbf{s}_m^T \Delta \mathbf{w}_e \quad m \in \{1, 2\}. \quad (3.12)$$

Первая производная от $\Delta \mathbf{w}_P$ по z_1 равна:

The first derivative of $\Delta \mathbf{w}_P$ with respect to z_1 is:

$$\frac{\partial(\Delta \mathbf{w}_P)}{\partial z_1} = \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_P}{\partial z_1} \Delta \mathbf{w}_e := \bar{\mathbf{S}}_{P,1} \Delta \mathbf{w}_e \quad (3.13)$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{P,1} = \frac{1}{\tilde{a}} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ \hline 0 & f_{1,1} & f_{2,1} & 0 & f_{3,1} & f_{4,1} \\ \hline \end{array}$$

Аппроксимация $\cos^2 \gamma = 1$ сводит интерполяционную матрицу $\bar{\mathbf{S}}_{P,1}$ к виду:

For $\cos^2 \gamma = 1$ the interpolation matrix $\bar{\mathbf{S}}_{P,1}$ reduces to:

$$\bar{\mathbf{S}}_{P,1}' := \frac{1}{\tilde{a}} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -\frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \hline 0 & \frac{3}{4}(-1 + z^2) & \frac{\tilde{a}}{4}(-1 - 2z + 3z^2) & 0 & \frac{3}{4}(1 - z^2) & \frac{\tilde{a}}{4}(-1 + 2z + 3z^2) \\ \hline \end{array}$$

Обозначим строки матрицы $\bar{\mathbf{S}}_{P,1}'$ через $\mathbf{g}_1^T$ и $\mathbf{g}_2^T$. Тогда производные координат перемещений интерполируются следующим образом:

Let the rows of $\bar{\mathbf{S}}_{P,1}'$ be denoted by $\mathbf{g}_1^T$ and $\mathbf{g}_2^T$. Then the derivatives of the displacement coordinates are interpolated by:

$$\Delta \mathbf{w}_{m,1} = \mathbf{g}_m^T \Delta \mathbf{w}_e \quad m \in \{1, 2\}. \quad (3.14)$$

Вторая производная $\Delta \mathbf{w}_P$ по z_1 равна

The second derivative of $\Delta \mathbf{w}_P$ with respect to z_1 is:

$$\frac{\partial^2(\Delta \mathbf{w}_P)}{\partial z_1^2} = \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{S}}_P}{\partial z_1^2} \Delta \mathbf{w}_e := \bar{\mathbf{S}}_{P,11} \Delta \mathbf{w}_e \quad (3.15)$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{P,11} = \frac{1}{\tilde{a}^2} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & f_{1,11} & f_{2,11} & 0 & f_{3,11} & f_{4,11} \\ \hline \end{array}$$

При $\cos^2 \gamma = 1$ интерполяционная матрица $\bar{\mathbf{S}}_{P,11}$ имеет вид:

For $\cos^2 \gamma = 1$ the interpolation matrix $\bar{\mathbf{S}}_{P,11}$ reduces to:

$$\bar{\mathbf{S}}'_{p,11} = \frac{1}{\tilde{a}^2} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & \frac{3}{2}z & \frac{\tilde{a}}{2}(-1+3z) & 0 & -\frac{3}{2}z & \frac{\tilde{a}}{2}(1+3z) \\ \hline \end{array} \quad (3.16)$$

Обозначим вторую строку матрицы $\bar{\mathbf{S}}'_{p,11}$ через $\mathbf{h}_2^T$. Тогда интерполяция второй производной координаты перемещения запишется как

$$\Delta w_{2,11} = \mathbf{h}_2^T \Delta \mathbf{w}_e. \quad (3.17)$$

3.4 Вектор погрешности в разрешающих уравнениях

Погрешность в разрешающих уравнениях определяется выражением (2.40). Вариация первой производной инкремента перемещения подставляется из выражения (3.14):

$$\int_0^{2\tilde{a}} E A_e \delta(\Delta w_{1,1}) \varepsilon_a dz_1 = \delta(\Delta \mathbf{w}_e)^T \int_0^{2\tilde{a}} E A_e \varepsilon_a \mathbf{g}_1 dz_1. \quad (3.18)$$

Вариация второй производной инкремента перемещений подставляется из уравнения (3.17):

$$\int_0^{2\tilde{a}} E I_e \delta(\Delta w_{2,11}) \bar{\varepsilon}_b dz_1 = -\delta(\Delta \mathbf{w}_e)^T \int_0^{2\tilde{a}} E I_e \mathbf{h}_2 \bar{\varepsilon}_b dz_1. \quad (3.19)$$

Вариация инкремента перемещения подставляется из уравнения (3.12):

$$\int_0^{2\tilde{a}} \frac{a}{\tilde{a}} \delta(\Delta \mathbf{w})^T \mathbf{p}_z dz_1 = \delta(\Delta \mathbf{w}_e)^T \int_0^{2\tilde{a}} \frac{a}{\tilde{a}} (p_{1z} \mathbf{s}_1 + p_{2z} \mathbf{s}_2) dz_1. \quad (3.20)$$

Для того чтобы просуммировать вклады отдельных элементов в погрешность, векторы перемещений элементов преобразуются в глобальное пространство при помощи выражения (1.12) и включаются в глобальный вектор перемещений системы $\mathbf{u}_s$ при помощи топологических матриц элементов $\mathbf{T}_e$:

$$\delta(\Delta \mathbf{w}_e)^T = \delta(\Delta \mathbf{u}_e)^T \mathbf{R}_{exz} = \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{T}_e^T \mathbf{R}_{exz}. \quad (3.21)$$

Подставив выражения с (3.18) по (3.21) в уравнение погрешности (2.40), получим вектор погрешности системы $\mathbf{e}_s$:

$$\delta e = \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{e}_s, \quad (3.22)$$

Let the second row of $\bar{\mathbf{S}}_{p,11}$ be denoted by $\mathbf{h}_2^T$. Then the second derivative of the displacement coordinate is interpolated by

3.4. Error Vector in the Governing Equations

The error term δe in the governing equations is determined with (2.40). The variation of the first derivative of the displacement increment is substituted from (3.14):

The variation of the second derivative of the increment of the displacement is substituted from (3.17):

The variation of the displacement increment is substituted from (3.12):

In order to assemble the contributions of the elements to the error term, the element displacement vector is transformed to global space with (1.12) and related by the topology matrix $\mathbf{T}_e$ of the member to the global system displacement vector $\mathbf{u}_s$:

Expressions (4.18) to (4.21) are substituted into the error term (3.40) to obtain the system error vector $\mathbf{e}_s$:

где

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_s &= \sum_e \mathbf{T}_e^T \mathbf{R}_{exz} (\mathbf{k}_{pe} - \mathbf{k}_{ae} - \mathbf{k}_{be}) + \mathbf{q}_s + \mathbf{r}_s, \\ \mathbf{k}_{ae} &= \int_0^{2\tilde{a}} EA_e \varepsilon_a \mathbf{g}_1 dz_1, \\ \mathbf{k}_{be} &= - \int_0^{2\tilde{a}} EI_e \bar{\varepsilon}_b \mathbf{h}_2 dz_1, \\ \mathbf{k}_{pe} &= \int_0^{2\tilde{a}} \frac{a}{\tilde{a}} (p_{1z} \mathbf{s}_1 + p_{2z} \mathbf{s}_2) dz_1. \end{aligned}$$

3.5. Инкрементальные алгебраические уравнения

Инкрементальные алгебраические уравнения выводятся из выражений (2.36). Первая производная инкремента перемещения w_1 и ее вариация подставляются из выражения (3.14) в первый член левой части (2.36):

$$\int_0^{2\tilde{a}} EA_e \delta(\Delta w_{1,1}) \Delta w_{1,1} dz_1 = \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \sum_e \mathbf{T}_e^T \mathbf{R}_{exz} \mathbf{K}_a \mathbf{R}_{exz}^T \mathbf{T}_e \Delta \mathbf{u}_s, \quad (3.23)$$

$$\mathbf{K}_a = \int_0^{2\tilde{a}} EA_e \mathbf{g}_1 \mathbf{g}_1^T dz_1.$$

Вторая производная инкремента перемещения w_2 и ее вариация подставляются во второй член левой части (2.36) из выражения (3.17):

$$\int_0^{2\tilde{a}} EI_b \delta(\Delta w_{2,11}) \Delta w_{2,11} dz_1 = \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \sum_e \mathbf{T}_e^T \mathbf{R}_{exz} \mathbf{K}_b \mathbf{R}_{exz}^T \mathbf{T}_e \Delta \mathbf{u}_s, \quad (3.24)$$

$$\mathbf{K}_b = \int_0^{2\tilde{a}} EI_e \mathbf{h}_2 \mathbf{h}_2^T dz_1.$$

Вариация инкремента перемещения подставляется из (3.12) во второй член правой части (2.36):

$$\int_0^{2\tilde{a}} \frac{a}{\tilde{a}} \delta(\Delta \mathbf{w})^T \Delta \mathbf{p}_z dz_1 = \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \sum_e \mathbf{T}_e^T \mathbf{R}_{exz} \Delta \mathbf{q}_e, \quad (3.25)$$

$$\Delta \mathbf{q}_e = \int_0^{2\tilde{a}} \frac{a}{\tilde{a}} (\Delta p_{1z} \mathbf{s}_1 + \Delta p_{2z} \mathbf{s}_2) dz_1.$$

3.5. Algebraic Incremental Equations

The algebraic incremental equations are derived from expressions (2.36). The first derivative of the displacement increment and its variation are substituted from (3.14) into the first term on the left hand side of (2.36):

The second derivative of the increment of the displacement w_2 and its variation are substituted from (3.17) into the second term on the left-hand side of (2.36):

The variation of the displacement increment is substituted from (3.12) into the second term on the right-hand side of (2.36):

Подставив выражения с (3.23) по (3.25) в (2.36), получим:

$$\delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T \mathbf{K}_s \Delta \mathbf{u}_s = \delta(\Delta \mathbf{u}_s)^T (\mathbf{e}_s + \Delta \mathbf{q}_s + \Delta \mathbf{r}_s), \quad (3.26)$$

$$\mathbf{K}_s = \sum_e \mathbf{T}_e^T \mathbf{R}_{exz} (\mathbf{K}_a + \mathbf{K}_b) \mathbf{R}_{exz}^T \mathbf{T}_e,$$

$$\Delta \mathbf{q}_s = \Delta \mathbf{q}_n + \sum_e \mathbf{T}_e^T \mathbf{R}_{exz} \Delta \mathbf{q}_e.$$

Единичные векторы глобального пространства выбраны как вариации вектора перемещений системы в выражении (3.26). Это приводит к алгебраическим разрешающим уравнениям:

$$\mathbf{K}_s \Delta \mathbf{u}_s = \mathbf{e}_s + \Delta \mathbf{q}_s + \Delta \mathbf{r}_s, \quad (3.27)$$

где $\mathbf{K}_s$ — инкрементальная матрица жесткости системы; $\Delta \mathbf{u}_s$ — инкремент вектора перемещений системы; $\Delta \mathbf{q}_s$ — инкремент вектора нагрузок системы; $\Delta \mathbf{r}_s$ — инкремент вектора реакций системы.

Матрицы $\mathbf{K}_a$ и $\mathbf{K}_b$ получаются путем аналитического интегрирования выражений (3.23) и (3.24). Полученные матрицы жесткости отличаются от соответствующих матриц линейной теории рам тем, что вместо исходной длины элемента L они содержат его мгновенную длину $\tilde{L}$. Матрица жесткости элемента преобразуется в глобальное пространство из мгновенного пространства, в то время как в линейной теории она преобразуется из исходного пространства.

Интегрирование выражения для $\Delta \mathbf{q}_e$ в (3.25) также выполняется аналитически. Пусть нагрузка на элемент линейно изменяется по его длине:

$$\Delta \mathbf{p}_z = \mathbf{S}_L \Delta \mathbf{p}_e \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta p_{1z} \\ \Delta p_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, (1-z) & 0 & 0,5(1+z) & 0 \\ 0 & 0, (1-z) & 0 & 0,5(1+z) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta p_{1A} \\ \Delta p_{2A} \\ \Delta p_{1B} \\ \Delta p_{2B} \end{bmatrix}.$$

После интегрирования получим следующий вектор нагрузок элемента:

Substitution of (3.23) to (3.25) into (2.36) leads to:

The unit vectors of global space are chosen as variations of the system displacement vector in (3.26). This leads to the following algebraic governing equations:

$\mathbf{K}_s$ — incremental system stiffness matrix; $\Delta \mathbf{u}_s$ — increment of the system displacement vector; $\Delta \mathbf{q}_s$ — increment of the system load vector; $\Delta \mathbf{r}_s$ — increment of the system reaction vector.

Expressions (3.23) and (3.24) for the matrices $\mathbf{K}_a$ and $\mathbf{K}_b$ are integrated analytically. The stiffness matrices differ from those of linear frame theory because they contain the instant length $\tilde{L}$ of the member instead of the reference length L . The element stiffness matrix is rotated from instant to global space before it is added to the system stiffness matrix, whereas the element stiffness matrix of linear theory is rotated from reference to global space.

The integral for $\Delta \mathbf{q}_e$ in (3.25) is also integrated analytically. Let the element load vary linearly over the length of the member:

Integration leads to the following element load vector:

$$\Delta \mathbf{q}_e = \mathbf{Q}_e \Delta \mathbf{p}_e \quad (3.29)$$

$$\mathbf{Q}_e = L$$

$\frac{2}{3}$	0	$\frac{1}{3}$	0
0	$\frac{7}{10}$	0	$\frac{3}{10}$
0	$\frac{\tilde{L}}{10}$	0	$\frac{\tilde{L}}{15}$
$\frac{1}{3}$	0	$\frac{2}{3}$	0
0	$\frac{3}{10}$	0	$\frac{7}{10}$
0	$-\frac{\tilde{L}}{15}$	0	$-\frac{\tilde{L}}{10}$

4. Решение системы нелинейных уравнений для плоских рам

Шаговый алгоритм решения алгебраических разрешающих уравнений, описанный в п. 4 [1], расширен с учетом специфических свойств плоских рам. Вектор перемещений системы для рамы содержит как перемещения u_i , так и углы поворота β_k . Для того чтобы сохранить единство размерностей при вычислении нормы перемещений a , углы поворота умножаются на размерный коэффициент d , представляющий собой часть средней длины элементов рамы.

$$a = \mu \sqrt{\sum_i u_i^2 + d^2 \sum_k \beta_k^2}. \quad (4.1)$$

Вектор нагрузок системы включает как силы p_i , так и моменты m_k . Чтобы сохранить единство размерностей при вычислении нормы сил p , моменты умножаются на коэффициент, обратный размерному коэффициенту d .

$$p = \sqrt{\sum_i p_i^2 + d^{-2} \sum_k m_k^2}. \quad (4.2)$$

Длина сегмента h_0 метода постоянных дуг учитывает величины сил и перемещений на нулевом шаге, но не учитывает вектор погрешностей $\mathbf{e}_s$ и

4. Solution of the Nonlinear System Equations for Plane Frames

The step algorithm for the solution of the algebraic governing equations in [1] is extended to account for special properties of plane frames. The system displacement vector for a frame contains both displacements u_i and rotations β_k . The rotations are scaled with the dimension factor d (a fraction of the average length of the members of the frame) in order to restore the homogeneity of the dimensions in the computation of the displacement norm a .

The system force vector for frames contains both forces p_i and moments m_k . The moments are scaled with the inverse of the dimension factor d in order to restore the homogeneity of the dimensions in the computation of the force norm p .

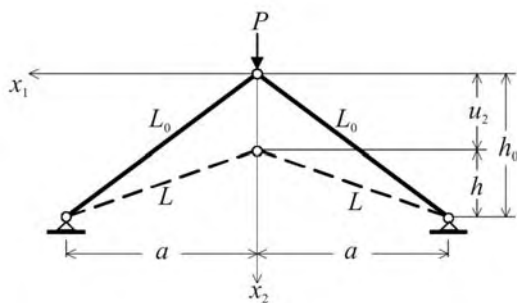
The segment length h_0 of the constant arc method accounts for the forces and for the displacements in step 0, but does not account for the error vector $\mathbf{e}_s$ or for the corrective

поправочные перемещения b_{1s} и реакции b_{2s} . Для рам влияние вектора погрешностей и поправочных векторов может быть очень существенным и должно приниматься во внимание при назначении длины дуги.

5. Точность и эффективность метода

Метод нелинейного расчета рам, описанный в данной работе, реализован на платформе Java. Его эффективность и точность демонстрируются на двух задачах, точные решения которых получены в 1.2 и 1.3 [1].

Применимость метода к расчету стержневых систем, работающих по типу ферм (со стержнями, испытывающими лишь осевые усилия), иллюстрируется на примере двухстержневой фермы, показанной на рис. 5.1. Нагрузка P прикладывается в 20 ступеней, во время которых ферма проходит полный цикл загрузки-разгрузки. Расчет полностью охватывает нелинейную диаграмму работы конструкции, показанную на рис. 1.2 [1]. Результаты расчета приведены в табл. 5.1. Погрешности в определении перемещений и реакций очень малы и не зависят от величин перемещений и углов поворота.



перемещение	$\frac{u_2}{h_0}$	displacement
нагрузка	$\frac{P}{AE} \left(\frac{L_0}{h_0} \right)^3$	load
реакция	$\frac{R}{AE} \left(\frac{L_0}{h_0} \right)^2 \left(\frac{L_0}{a} \right)$	reaction

Рис. 5.1. Определение перемещений и реакций двухстержневой фермы

Рамы, так же, как и фермы, подвержены потере устойчивости вследствие проскока стержней или бифуркации, как описано в [1]. В данной работе не рассматривается проблема бифуркации, которой будет посвяще-

displacements b_{1s} and reactions b_{2s} . In the case of frames, the influence of the error vector and the corrections can be very large and must be taken into account in setting the arc length.

5. Accuracy and Efficiency of the Method

The method for nonlinear frame analysis, which is described in this paper, has been implemented on the Java platform. Its accuracy and efficiency are tested with two examples for which exact results are derived in [1].

The 2-bar-truss in Fig. 5.1 demonstrates the suitability of the method of analysis for axial bar forces. The load P is applied in 20 steps, in which the truss is both loaded and unloaded. The analysis covers the complete, highly nonlinear diagrams in Fig. 1.2 of [1]. The behaviour includes snap-through of the apex under the load P . The errors in the computed displacements and reactions are negligible and independent of the magnitude of the displacements and rotations.

Frames, like trusses, are subject to instability due to snap-through and bifurcation, as described in [1]. Bifurcation is not treated in this publication. It will be treated in the manner described in [1] in a companion paper.

на отдельная статья. Потеря устойчивости, связанная с проскоком стержней, показана на рис. 5.1.

Snap-through instability is illustrated in Fig. 5.1.

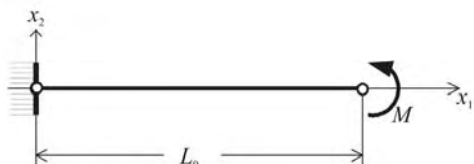
Т а б л и ц а 5.1

Перемещения и реакции двухстержневой фермы

Шаг	Перемещение	Нагрузка		Реакция	
		Полученное значение	Точное значение	Полученное значение	Точное значение
1	0,063433	0,115051	0,115050	0,061421	0,061421
2	0,131780	0,213751	0,213751	0,123097	0,123097
4	0,288338	0,351233	0,351232	0,246768	0,246768
6	0,488026	0,377778	0,377777	0,368941	0,368941
8	0,791831	0,199149	0,199148	0,478333	0,478333
10	1,270852	-0,250983	-0,250982	0,463319	0,463320
12	1,548514	-0,383483	-0,383484	0,349566	0,349566
14	1,739104	-0,335349	-0,335350	0,226862	0,226862
16	1,890837	-0,183878	-0,183877	0,103205	0,103204
18	2,019533	0,040217	0,040217	-0,019723	-0,019723
20	2,132585	0,320238	0,320236	-0,141374	-0,141374

Пример расчета консольной балки, показанной на рис. 5.2, демонстрирует возможности метода при расчете балок и рам, испытывающих действие изгибающих моментов. Балка разделена на 20 конечных элементов. Загружение консоли изгибающим моментом производится за 30 шагов. Этот пример является серьезным испытанием численного алгоритма. Во время итераций нелинейные отношения относительно деформации — напряжения вызывают большие фиктивные осевые усилия, которые должны быть поправлены алгоритмом. Расчет полностью охватывает нелинейные диаграммы, показанные на рис. 1.3 [1]. Результаты расчета приведены в табл. 5.2. Величины погрешностей в вычисленных горизонтальных и вертикальных перемещениях конца консоли имеют порядок 0,1 % от максимальных перемещений и не зависят от величин перемещений и углов поворота.

The cantilever beam in Fig. 5.2 demonstrates the suitability of the method of analysis for bending moments in frames. The beam is subdivided into 20 finite elements and the moment load at the tip is applied in 30 steps. The example is a severe test for the numerical algorithm: During the iteration, the nonlinear strain-displacement relations cause large fictitious axial forces which must be corrected by the algorithm. The analysis covers the complete, highly nonlinear diagrams in Fig. 1.3 of [1]. The magnitude of the errors in the computed horizontal and vertical displacements at the tip of the cantilever is of the order of 0.1 percent of the maximum displacement and independent of the magnitude of the displacements and rotations.



$$\begin{array}{ll} \text{перемещение} & \frac{u_i}{L_0} \quad \text{displacement} \\ \text{момент} & \frac{ML_0}{EI} \quad \text{moment} \end{array}$$

Рис. 5.2. Определение перемещений конца консольной балки

Т а б л и ц а 5.2

Перемещения конца консольной балки

Шаг	Момент	Горизонтальное перемещение		Вертикальное перемещение	
		Полученное значение	Точное значение	Полученное значение	Точное значение
1	0,208328	-0,007219	-0,007218	0,103784	0,103788
5	1,041927	-0,171326	-0,171364	0,475458	0,475506
10	2,085576	-0,582240	-0,582657	0,715482	0,715554
15	3,132259	-0,995990	-0,997020	0,639145	0,638503
20	4,182604	-1,205757	-1,206311	0,362132	0,359907
25	5,236503	-1,167214	-1,165333	0,098152	0,095398
30	6,293296	-1,002509	-0,998393	0,000019	0,000008

Приведенные примеры показывают, что предлагаемый метод расчета обладает высокой точностью и эффективностью. Точность метода не зависит от величин перемещений и углов поворота элементов конструкции. Метод позволяет учитывать явление потери устойчивости вследствие проскака стержней.

Выводы. Представленный в [1] общий подход к геометрически нелинейному расчету упругих тел, подверженных большим перемещениям и углам поворота при условии малости относительных деформаций, успешно применен к расчету плоских рам. Использование гипотезы плоских рам позволило получить эффективный и точный метод расчета. Высокая точность результатов достигнута благодаря следующим факторам:

- а) систематическому учету рабочего координатного пространства;
- б) использованию тригонометрических функций углов поворотов сечений;
- в) интерполяции полного перемещения элемента в мгновенной системе координат;
- г) определению инкрементальных перемещений элемента при помощи производных направлений полного перемещения;

The examples show that the method of analysis is both efficient and accurate, that the accuracy is independent of the magnitude of the displacements and the rotations of the members, and that the method is capable of analysing snap-through instability.

Conclusions. The general concept for the geometrically nonlinear analysis of elastic solids subject to large displacements and rotations but small strains, as presented in [1], has been applied successfully to the nonlinear analysis of plane frames. The frame hypothesis leads to an efficient and accurate method of analysis. Several factors contribute to this result:

- (a) Systematic distinction between the different coordinate spaces,
- (b) treatment of the rotation of the cross-section with trigonometric functions,
- (c) interpolation of the total member displacement in the instant configuration,
- (d) determination of the incremental member displacement by means of the directional derivatives of the total displacement,
- (e) dimensional homogeneity in the normalised displacement-load diagram for the arc length control method.

д) соблюдению единства размерностей при построении нормализованных диаграмм «перемещения — нагрузки» в методе постоянных дуг.

Формулировки уравнений в данной работе выполнены таким образом, что они легко могут быть расширены на случай пространственных рам. Выполненная работа может служить основой для разработки других приложений общего подхода, например методов и алгоритмов расчета пространственных ферм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галишникова В.В. Унифицированный и общий подход к геометрически нелинейному расчету строительных конструкций // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Техн. науки. 2006. Вып. 6(20). С. 42—66.

The formulations for plane frames in this paper are structured so that they can be extended directly to space frames. The insights which have been gained in the analysis of plane frames will form the basis for additional applications of the general concept, for instance the application to space trusses and plates.

LIST OF REFERENCES

1. Galishnikova V.A. Unified and General Approach to the Geometrically Nonlinear Analysis of Structures // Journal of Volgograd State University for Architecture and Civil Engineering. Technical Science. 2006. 6(20). P. 42—66.

© Галишникова В.В., Паль П.Я., 2006

УДК 539.3

В.В. Карпов, В.К. Кудрявцев**УСТОЙЧИВОСТЬ РЕБРИСТЫХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК
ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Исследованы развитие ползучести в материале оболочки при длительном нагружении, когда прогибы соизмеримы с толщиной оболочки, и влияние длительности нагружения на устойчивость оболочки.

The authors investigate the development of the afterflow process under long-term loading, when the bending deflections are commensurable to the shell's thickness, as well as the influence of the duration of loading on the shell's stability.

При длительном воздействии нагрузки на оболочку вследствие развития ползучести материала потеря устойчивости может произойти при меньших нагрузках, чем при воздействии кратковременных нагрузок. Чтобы исследовать снижение критических нагрузок при учете ползучести материала, приходится решать «дважды» нелинейные задачи (геометрическая и физическая нелинейность).

Рассмотрим прямоугольные в плане пологие оболочки двоякой кривизны, подкрепленные со стороны вогнутости перекрестной системой ребер, параллельных осям координат. Срединная поверхность обшивки толщиной h принимается за координатную поверхность. Оси x, y ортогональной системы координат направлены по линиям главных кривизн, ось Z — ортогонально координатной поверхности в сторону вогнутости.

Конструкция, закрепленная определенным образом по контуру, находится под действием поперечной механической нагрузки $q(x, y)$.

Функционал полной энергии деформации такой оболочки при использовании линейной теории наследственной ползучести принимает вид

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{E}_y - \mathfrak{E}_c, \quad (1)$$

где $\mathfrak{E}_y$ — описывает упругую деформацию оболочки, а $\mathfrak{E}_c$ — деформацию ползучести, а именно,

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_y = & \frac{E}{2(1-\mu^2)} \int_0^a \int_0^b \left\{ (h + \bar{F}) \cdot [\varepsilon_x^2 + 2\mu\varepsilon_x\varepsilon_y + \varepsilon_y^2 + \mu_1\gamma_{xy}^2] + \right. \\ & + 2\bar{S} [\varepsilon_x\chi_1 + \mu\varepsilon_x\chi_2 + \varepsilon_y\chi_2 + \mu\varepsilon_y\chi_1 + 2\mu_1\gamma_{xy}\chi_{12}] + \\ & \left. + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J} \right) [\chi_1^2 + 2\mu\chi_1\chi_2 + \chi_2^2 + 4\mu_1\chi_{12}^2] - \frac{2(1-\mu^2)}{E} qW \right\} dx dy; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_c = & \frac{E}{2(1-\mu^2)} \int_0^a \int_0^b \int_{t_0}^t \left\{ [(h + \bar{F}) \cdot (\varepsilon_x^2 + 2\mu\varepsilon_x\varepsilon_y + \varepsilon_y^2) + \right. \\ & + 2\bar{S} \cdot (\varepsilon_x\chi_1 + \mu\varepsilon_x\chi_2 + \varepsilon_y\chi_2 + \mu\varepsilon_y\chi_1) + \\ & \left. + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J} \right) \cdot (\chi_1^2 + 2\mu\chi_1\chi_2 + \chi_2^2)] R_1(t, \tau) + [(h + \bar{F}) \cdot \mu_1\gamma_{xy}^2 + \right. \end{aligned}$$

$$+ 2\bar{S} \cdot 2\mu_1 \gamma_{xy} \chi_{12} + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J} \right) 4\mu_1 \chi_{12}^2 \Big] R_2(t, \tau) \Big\} dx dy d\tau.$$

Здесь ε_x , ε_y , γ_{xy} имеют вид

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} - K_x W + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2;$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} - K_y W + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2;$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial x} \cdot \frac{\partial W}{\partial y};$$

$$\chi_1 = -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \chi_2 = -\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}; 2\chi_{12} = -2\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y};$$

$\bar{F}$, $\bar{S}$, $\bar{J}$ — соответственно площадь поперечного или продольного сечения ребер, приходящаяся на единицу длины сечения, статический момент и момент инерции этого сечения

$$\bar{F} = \int_{h/2}^{h/2+H} dz; \quad \bar{S} = \int_{h/2}^{h/2+H} z dz; \quad \bar{J} = \int_{h/2}^{h/2+H} z^2 dz;$$

$R_1(t, \tau)$, $R_2(t, \tau)$ — функции влияния материала при растяжении (сжатии) и сдвиге; a, b — размеры оболочки в плане; E, μ — механические характеристики материала; $\mu_1 = 0,5(1 - \mu)$. Хотя рассматривается статическая задача, перемещения U, V, W являются функциями переменных x, y, t .

К функционалу (1), записанному в безразмерных параметрах ($\bar{\mathcal{E}} = \bar{\mathcal{E}}_y - \bar{\mathcal{E}}_c$), применяется метод Ритца и находится система нелинейных интегральных уравнений, которую можно записать в виде

$$F_l(X) + F_n(X) + \bar{f}\bar{P} = F_c(X),$$

(2)

где X — неизвестные параметры, зависящие от t ; F_l, F_n — линейные и нелинейные составляющие уравнения, относящиеся к упругой задаче; F_c — составляющая уравнения, относящаяся к задаче ползучести; $\bar{P}$ — заданный параметр нагрузки.

К решению нелинейной системы (2) применяется метод итераций (двойная итерация, так как одна итерация нужна для решения нелинейной упругой задачи при последовательном увеличении нагрузки, а вторая — для решения задачи ползучести при последовательном увеличении времени t).

В развернутом виде уравнения (2) будут иметь вид:

$$\sum_{I=1}^N \left[U(I)CF1(I, J) + V(I)CF2(I, J) + W(I) \left(C1(I, J) + \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{K=1}^N W(K) CF3(I, J, K) \Bigg] = \sum_{I=1}^N \int_{t_0}^t \left\{ \left[U(I) CF4(I, J) + V(I) CF5(I, J) + \right. \right. \\
& + W(I) \left(C2(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) CF6(I, J, K) \right) \Bigg] R_1(t, \tau) + \\
& + \left[U(I) CF7(I, J) + V(I) CF8(I, J) + W(I) \left(CS1(I, J) + \right. \right. \\
& + \sum_{K=1}^N W(K) CF9(I, J, K) \Bigg] R_2(t, \tau) \Bigg\} d\tau; \\
& \sum_{I=1}^N \left[U(I) CF10(I, J) + V(I) CF11(I, J) + W(I) \left(C3(I, J) + \right. \right. \\
& + \sum_{K=1}^N W(K) CF12(I, J, K) \Bigg] \Bigg] = \sum_{I=1}^N \int_{t_0}^t \left\{ \left[U(I) CF13(I, J) + V(I) CF14(I, J) + \right. \right. \\
& + W(I) \left(C4(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) CF15(I, J, K) \right) \Bigg] R_1(t, \tau) + \left[U(I) CF16(I, J) + \right. \\
& + V(I) CF17(I, J) + W(I) \left(CS2(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) CF18(I, J, K) \right) \Bigg] R_2(t, \tau) \Bigg\} d\tau; \\
& \sum_{I=1}^N \left[U(I) \left(C5(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) CF19(I, J, K) \right) + V(I) \left(C6(I, J) + \right. \right. \\
& + \sum_{K=1}^N W(K) CF20(I, J, K) \Bigg) + W(I) \left(C7(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) \left(C8(I, J, K) + \right. \right. \\
& + \sum_{L=1}^N W(L) CF21(I, J, K, L) \Bigg) \Bigg] = CP(I) \bar{P} + \sum_{I=1}^N \int_{t_0}^t \left\{ \left[U(I) \left(C9(I, J) + \right. \right. \right. \\
& + \sum_{K=1}^N W(K) CF22(I, J, K) \Bigg) + V(I) \left(C10(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) CF23(I, J, K) \right) + \\
& + W(I) \left(C11(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) \left(C12(I, J, K) + \sum_{L=1}^N W(L) CF24(I, J, K, L) \right) \right) \Bigg] R_1(t, \tau) + \\
& + \left[U(I) \left(CS3(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) CF25(I, J, K) \right) + V(I) \left(CS4(I, J) + \right. \right. \\
& + \sum_{K=1}^N W(K) CF26(I, J, K) \Bigg) + W(I) \left(CJ1(I, J) + \sum_{K=1}^N W(K) \left(CS5(I, J, K) + \right. \right. \\
& + \sum_{L=1}^N W(L) CF27(I, J, K, L) \Bigg) \Bigg] R_2(t, \tau) \Bigg\} d\xi d\eta d\tau.
\end{aligned}$$

При решении задач устойчивости в упругой постановке (кратковременное нагружение), в уравнениях (2) нужно принять $F_c(x)$ равным нулю. С использованием метода итераций для решения геометрически нелинейных задач

$$F_{\text{л}}(X_i) + F_{\text{н}}(X_{i-1}) + f\bar{P} = 0$$

при последовательном увеличении нагрузки, строится кривая «нагрузка $\bar{P}$ — прогиб $\bar{W}$ или прогиб в центре оболочки, или наибольший прогиб». Нагрузка, соответствующая точке максимума этого графика, берется за критическую нагрузку $\bar{P}_{\text{кр}}$. При этой нагрузке происходит «прохлопывание» оболочки. Для различных параметров кривизны $K_{\xi} = K_{\eta} = K$

$$(K_{\xi} = \frac{a^2 K_x}{h}, K_{\eta} = \frac{b^2 K_y}{h}, \bar{P} = \frac{a^4 q}{E h^4}, \bar{W} = \frac{W}{h}, \xi = \frac{x}{a}, \eta = \frac{y}{b}, \bar{U} = \frac{aU}{h^2},$$

$$\bar{V} = \frac{bV}{h^2}) \text{ получены критические нагрузки.}$$

Так, при $K = 16$ $\bar{P}_{\text{кр}} = 191$, при $K = 32$ $\bar{P}_{\text{кр}} = 900$ при $K = 40$ $\bar{P}_{\text{кр}} = 1200$.

Результаты хорошо согласуются с результатами работы [3] для аналогичных оболочек. При подстановке размерных значений параметров оболочки a, h, R, E , легко получить размерные значения критической нагрузки. Так, для оболочки из оргстекла с параметрами $a = b = 0,6$ м; $h = 0,006$ м; $R_1 = R_2 = 1,51$ м; $E = 0,33 \cdot 10^4$ МПа; $\mu = 0,354$ получим

$$\bar{a} = \frac{a}{h} = 100; \bar{R} = \frac{R}{h} = 251,67; K_{\xi} = 39,735 \text{ и } q_{\text{кр}} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ МПа.}$$

Чтобы выяснить, как снижается критическая нагрузка при длительном воздействии нагрузки, исследуем процесс развития ползучести в материале оболочки при различных значениях нагрузки, не превышающих $q_{\text{кр}}$.

На рис. 1 представлены графики зависимости $W — t$. Для рассмотренной выше оболочки из оргстекла при $R_1(t, \tau) = 0,026945 \cdot e^{-0,045 \cdot 10^{-3}(t-\tau)} (t-\tau)^{-0,95}$, $R_2(t, \tau) = 0,013184 \cdot e^{-0,833 \cdot 10^{-3}(t-\tau)} (t-\tau)^{-0,8}$, полученные при следующих нагрузках:

кривая 1 — при $q = 0,74 \cdot 10^{-2}$ МПа ($W_0 = 0,8h$);

кривая 2 — при $q = 1,11 \cdot 10^{-2}$ МПа ($W_0 = 1,25h$);

кривая 3 — при $q = 2,22 \cdot 10^{-2}$ МПа ($W_0 = 2,5h$);

кривая 4 — при $q = 3,33 \cdot 10^{-2}$ МПа ($W_0 = 3,8h$).

Время, при котором происходит бурный рост прогибов, принимается за критическое время $t_{\text{кр}}$ (происходит «прощелкивание» оболочек вследствие развития ползучести материала).

На рис. 2 приведена кривая снижения критической нагрузки при длительном нагружении и возникновении ползучести в материале рассматриваемой оболочки из оргстекла. Полученные результаты качественно согласуются с результатами, описанными в [2], с учетом того, что в этой работе оболочки имели некоторые начальные несовершенства.

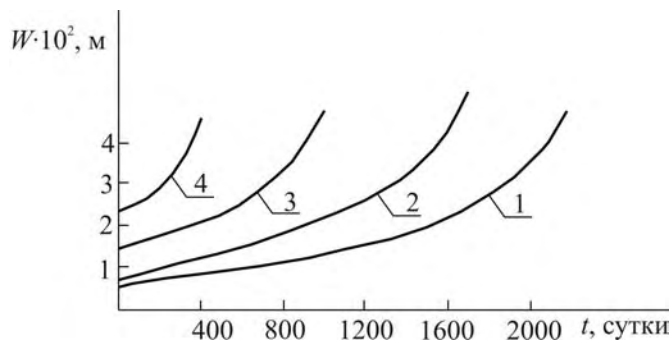
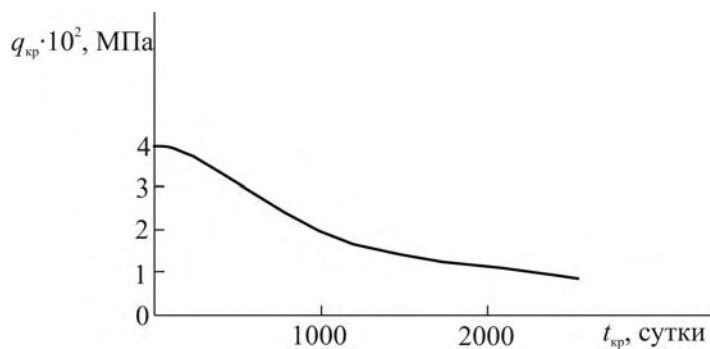
Рис. 1. Зависимости « W — tt » при различном уровне нагружения

Рис. 2. Снижение критической нагрузки при возникновении ползучести материала

Как видно из рассматриваемого примера, при длительном воздействии нагрузки критические нагрузки могут быть существенно меньше тех, которые получаются при решении упругой задачи.

Для ребристых оболочек функции влияния $R_1(t, \tau)$ и $R_2(t, \tau)$ должны быть различными для обшивки и для ребер, что вызывает серьезные трудности при расчете, поэтому предлагается «размазывать» жесткость ребер по оболочке, и тогда функции влияния будут едиными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. М. : Машиностроение, 1968. 400 с.
2. *Климанов В.И.* Нелинейные задачи подкрепленных оболочек / В.И. Климанов, С.А. Тимашев. Свердловск : УНЦ АН СС.
3. *Игнатьев О.В.* Вариационно-параметрический метод в нелинейной теории оболочек ступенчато-переменной толщины / О.В. Игнатьев, В.В. Карпов, В.Н. Филатов ; ВолгГАСА. Волгоград, 2001. 210 с.

УДК 621.643:620.193.2

Г.А. Наумова, А.А. Бубнов, В.В. Кабанин

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТОЛСТОСТЕННОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ

Предложен алгоритм поиска решения модели деформирования и разрушения равномерно прогретого толстостенного стального трубопровода в условиях водородной коррозии.

The article suggests a solution search algorithm of the model of deformation and destruction of a uniformly heated thick-walled steel pipeline in the conditions of hydrogen corrosion.

Высокотемпературная водородная коррозия возникает в стальных конструкциях в случае воздействия на конструктивные элементы водородосодержащей среды при высоких давлениях и температурах и заключается в физико-химическом взаимодействии металла с водородом, приводящем к необратимому изменению первоначальных механических свойств [2]. В результате изменяется характер напряженно-деформированного состояния, уменьшается срок службы конструктивного элемента.

Согласно [4] математическая модель деформирования и разрушения конструктивного элемента будет состоять из следующих компонентов:

- модели нагружения;
- модели воздействия агрессивной внешней среды;
- модели воздействия температуры;
- модели деформирования материала;
- модели наступления предельного состояния;
- модели конструктивного элемента.

Рассмотрим равномерно прогретый до температуры T толстостенный трубопровод в водородосодержащей среде, действующей с внутренней стороны давлением P_0 . Закон стационарного распределения парциального давления водорода по сечению определяется из решения уравнения диффузии и запишется в виде:

$$P(r) = P_0 \left(1 - \frac{\ln \frac{r}{r_B}}{\ln \frac{r_H}{r_B}} \right), \quad (1)$$

где r_B и r_H — внутренний и наружный радиусы соответственно.

Для определения уровня результата коррозионного воздействия водорода будем использовать так называемый параметр химического взаимодействия [4], кинетика которого описывается зависимостью:

$$\frac{d\mu}{dt} = k\mu(1 - \mu) \quad (2)$$

с начальным условием $\mu(0) = \mu_0$. Решение уравнения (2) в случае $k = \text{const}$ имеет вид логистической кривой:

$$\mu = (1 + g_0 \exp(-kt))^{-1}; \quad (3)$$

$$k(P, T) = (P^u / k) \exp(-B/T) \ln(g_0 / g_n).$$

Здесь $g_0 = (1 - \mu_0)/\mu_0$ и $g_n = (1 - \mu_n)/\mu_n$, $\mu_0=0,17$, $\mu_n=0,218$; u , κ , B — коэффициенты, характерные для рассматриваемого материала.

Моделирование ползучести материала будем осуществлять в соответствии с теорией упрочнения [1], воспользуемся соотношением для установившейся ползучести:

$$\frac{dp_n}{dt} = B\sigma_n^n, \quad p_n(0) = 0, \quad (4)$$

где p_n — интенсивность деформаций ползучести; B и n — коэффициенты.

Для определения состояния и момента разрушения необходимо решить уравнение накопления повреждений в виде:

$$\frac{d\Pi}{dt} = a \left(\frac{\sigma_n}{1 - \Pi} \right)^b, \quad \Pi(0) = 0, \quad (5)$$

где Π — параметр поврежденности, изменяющийся от 0 в исходном состоянии до 1 в момент разрушения; σ_n — интенсивность напряжений; a и b — коэффициенты.

Поскольку происходит коррозионное воздействие водорода, то в уравнениях (4) и (5) коэффициенты B , n , a и b являются функциями параметра химического взаимодействия μ в виде:

$$\begin{aligned} B(\mu) &= B_0 \exp\left(\mu \ln \frac{B_1}{B_0}\right); \quad n(\mu) = n_0 - \mu(n_0 - n_1); \\ a(\mu) &= a_0 \exp\left(\mu \ln \frac{a_1}{a_0}\right); \quad b(\mu) = b_0 - \mu(b_0 - b_1). \end{aligned} \quad (6)$$

Задачей моделирования является определение напряженно-деформированного состояния толстостенного трубопровода в различные моменты времени и момента разрушения.

Разрешающее уравнение относительно приращений радиальных напряжений имеет вид:

$$\frac{d^2 \Delta \sigma_r}{dr^2} + \frac{d \Delta \sigma_r}{dr} F_1 + \Delta \sigma_r F_2 = f, \quad (7)$$

$$\text{где } F_1 = \left(\frac{3}{r} + \frac{d\phi_1}{dr} \cdot \frac{1}{\phi_1} \right); \quad F_2 = \frac{1}{r\phi_1} \cdot \frac{d\phi_2}{dr}; \quad \phi_1 = \frac{1-v^2}{E}; \quad \phi_2 = \frac{1-v-2v^2}{E};$$

$$\begin{aligned} f &= J_1 \Delta E + J_2 \Delta v + J_3 \Delta p_u + J_4 \frac{d \Delta E}{dr} + J_5 \frac{d \Delta v}{dr} + J_6 \frac{d \Delta p_u}{dr}; \\ J_1 &= \frac{1}{r\phi_1} \cdot \frac{(1+v)(\sigma_\varphi - \sigma_r)}{rE^2} - \frac{d\phi_3}{dr}; \quad J_2 = \frac{1}{r\phi_1} \left(\frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{rE} - \frac{d\phi_4}{dr} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$J_3 = \frac{1}{r\phi_1} \left(\frac{3\sigma_r - 3\sigma_\phi}{2\sigma_{\text{и}} r} - \frac{d\phi_5}{dr} \right); J_4 = \frac{\phi_3}{r\phi_1}; J_5 = -\frac{\phi_4}{r\phi_1}; J_6 = -\frac{\phi_5}{r\phi_1};$$

$$\phi_3 = \frac{(1+\nu)[\nu\sigma_r - \sigma_\phi(1-\nu)]}{E^2}; \phi_4 = \frac{[\nu\sigma_\phi + \sigma_r(1+\nu) + \sigma_z]}{E}; \phi_5 = \frac{[\sigma_\phi(2-\nu) - \sigma_r(1+\nu) + \sigma_z(2\nu-1)]}{2\sigma_{\text{и}}}$$

Интенсивность напряжений определяется по формуле

$$\sigma_{\text{и}} = \left\{ \left[(\sigma_r - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 \right] \frac{1}{2} \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

В выражениях (8) модуль Юнга и коэффициент Пуассона являются функциями параметра химического взаимодействия:

$$E(\mu) = E_0 - \mu(E_0 - E_1);$$

$$\nu(\mu) = \nu_0 - \mu(\nu_0 - \nu_1). \quad (10)$$

Поставленная задача (7) является краевой, поскольку в начальный момент времени $t_0 = 0$ поле напряжений легко определить из уравнения (7), записав его в полных величинах при условии $f = 0$, а на границах сечения можно задать вполне определенные граничные условия

$$\sigma_1 = -P_0,$$

$$\sigma_2 = 0. \quad (11)$$

В начальный момент времени отсутствуют деформации ползучести и коррозионное воздействие водорода высоких параметров не происходит, поскольку физические свойства материала в течение инкубационного периода $t = t_{\text{инк}}$ не изменяются. По моментам вступления в процесс деформирования и разрушения происходящие процессы можно расположить следующим образом:

при $t_0 = 0$ получим начальное поле напряжений по выше указанной схеме;

в моменты времени $t_1 \geq t_0 + \Delta t \leq t_{\text{инк}}$ решается уравнение (7) в приращениях и правой частью без членов, отвечающих за водородную коррозию. При этом краевые условия будут в виде:

$$\Delta\sigma_r(r_\theta) = 0,$$

$$\Delta\sigma_r(r_{\text{и}}) = 0; \quad (12)$$

в моменты времени $t_2 \geq t_{\text{инк}} t \leq t_p$ решается уравнение (7) в общем виде.

В процессе расчета через определенные промежутки времени следует контролировать наступление момента разрушения t_p конструктивного элемента посредством решения соответствующего уравнения накопления повреждений (5).

Решение уравнения (7) можно осуществить с использованием метода сеток, хорошо описанного в [3]. После дискретизации и представления производных через конечные разности получим следующую расчетную схему:

$$\Delta\sigma_{i-1}^{j+1} + B_1\Delta\sigma_i^{j+1} + \Delta\sigma_{i+1}^{j+1}B_2 = f_i^j, \quad (13)$$

где верхний индекс соответствует дискретизации по времени, а нижний — по координате. Как видно из (13), использовалась неявная расчетная схема, поскольку она позволяет существенно экономить машинное время, избавив от

связи шага по времени с шагом по координате и обеспечив безусловную устойчивость. Правая часть f_i^j определяется на основе интенсивности напряжений σ_{ij} , полученных на предыдущем временном шаге. Все первые производные вычисляются по схеме нахождения производных четвертого порядка точности. Приращения физических характеристик определяются по формуле:

$$\Delta A^{j+1} = A^{j+1} - A^j. \quad (14)$$

Уравнение ползучести (4) решается с использованием метода Эйлера, что дает приемлемые результаты.

В результате получаем СЛАУ, решая которую, находим приращения радиальных напряжений в различные моменты времени с использованием дифференциального уравнения равновесия и условия равенства нулю продольных деформаций, легко определяем окружные и осевые напряжения, а на их основе — σ_{ij} , входящую в правую часть уравнения (7), и уравнение накопления повреждений (5).

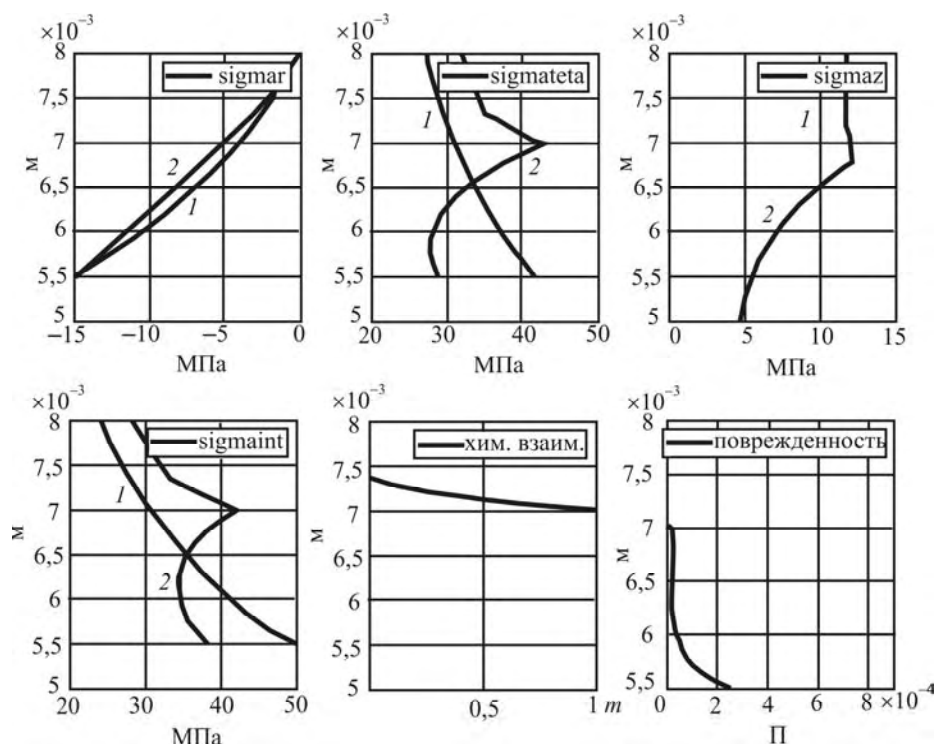
Численное решение уравнения накопления повреждений (5) усложняется тем, что при приближении к единице (моменту разрушения) оно не имеет устойчивого решения, а само решение стремится к бесконечности. В этом случае можно выбрать значение параметра поврежденности P^* , при котором вычислительный процесс останавливается и конструктивный элемент считается разрушенным. Возникают проблемы с тем, что в случае реализации вычислительного процесса в одной программе сочетание шага по времени и координате, дающее решение с приемлемой погрешностью относительно напряжений, не дает такового для параметра P . Одним из выходов из данной ситуации может быть интерполирование вычисленных значений интенсивности напряжений на каждом временном шаге, а затем решение уравнения накопления повреждений. Что касается численного метода, то при решении уравнения (5) хорошо себя зарекомендовал метод прогноза и коррекции четвертого порядка. При этом первые четыре начальных приближения можно получить с использованием метода Эйлера.

Таким образом, общий алгоритм поиска решения модели деформирования и разрушения равномерно прогретого толстостенного трубопровода в условиях водородной коррозии предлагается следующим:

- 1) определение концентрационного поля на основе заданного воздействия водородосодержащей среды;
- 2) решение уравнения кинетики параметра химического взаимодействия (3);
- 3) дискретизация области посредством создания пространственно-временной сетки;
- 4) определение изменения коэффициентов уравнений (4) и (5), модуля Юнга и коэффициента Пуассона вследствие коррозионного воздействия водорода;
- 5) определение начального поля напряжений по выше описанной методике;
- 6) определение приращений напряжений и поля напряжений для последующего момента времени с учетом коррозионного воздействия водорода и ползучести материала;
- 7) проверка наступления момента разрушения конструктивного элемента;

8) повторение шагов 6 и 7 с учетом, что для каждого последующего момента времени в качестве начального поля напряжений выступают определенные на предыдущем временном шаге напряжения.

На рисунке представлены результаты численного моделирования деформирования и разрушения толстостенного трубопровода. Число узлов по координате — 500, по времени — 50, погрешность определяется в соответствии с принципом Рунге.



Поля напряжений в исходном состоянии (1) и спустя 800 ч (2), параметры химического взаимодействия и поврежденности

Следует отметить, что при воздействии водорода высоких параметров происходит разгрузка поврежденных участков сечения и нагружение неповрежденных. Разрушение происходит вследствие нарушения сплошности материала в поврежденной зоне из-за существенного снижения пластичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурлаков А.В. Основы теории пластичности и ползучести. Харьков. : Изд-во Харьк. ун-та, 1968. С. 121.
2. Водород, получение, хранение, транспортировка, применение : справ. изд. / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнова ; под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. М. : Химия, 1989.
3. Киреев В.И. Численные методы в примерах и задачах : учеб. пособие / В.И. Киреев, А.В. Пантелеев. М. : Высш. шк., 2004. 480 с.
4. Овчинников И.Г. Работоспособность в условиях высокотемпературной водородной коррозии / И.Г. Овчинников, Т.А. Хвалько. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2003.

© Наумова Г.А., Бубнов А.А., Кабанин В.В., 2006

УДК 624.074.2.001.573:681.3.06

Е.В. Лебедь, А.А. Куницын**НАЧАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ В СТЕРЖНЯХ ОДНОСЕТЧАТОГО КУПОЛА
ВСЛЕДСТВИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЕГО СБОРКИ И МОНТАЖА**

Выполнено исследование возможных погрешностей начального опирания односетчатого купола посредством численного моделирования его монтажа на персональном компьютере с использованием метода Монте-Карло. В результате исследований установлено, что при монтажной установке собранного каркаса купола неизбежны перемещения и подгоночные операции в опорных узлах. Моделирование этих операций в программном комплексе SCAD позволило определить возможные начальные усилия в стержнях каркаса купола.

The authors carried out the investigation of possible inaccuracy of a single-layer grid dome's initial support by means of the computer-aided numerical simulation of its erecting applying Monte-Carlo method. The results of the investigations proved that displacements and adjustment operations in the supporting nodes are inevitable while the assembled dome's frame is being erected. Simulating these operations in SCAD software complex allowed determining possible initial internal forces in the rods of the dome's frame.

Выполнено численное моделирование монтажа односетчатого купола по разработанной автором программе «SBORKA» [1]. В основе алгоритма этой программы заложен метод Монте-Карло, позволяющий учитывать влияние случайной изменчивости длин стержней каркаса купола в процессе его численной сборки на действительные координаты узлов. Сравнением этих координат с проектными вычисляются отклонения узлов δ_j , которые при многократном повторении численной сборки превращаются в математическое ожидание $m(\delta_j)$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma(\delta_j)$.

Изменчивость длин стержней при численном моделировании монтажа эквивалентна изменчивости расстояний между узлами каркаса сетчатого купола. Она моделирует неточности размеров стержневых и узловых элементов, а также неточности расположения деталей, предназначенных для соединения их друг с другом.

Объектом исследования выбран металлический каркас односетчатого купола (рис. 1), стержнями которого являются прокатные широкополочные двутавры 23Ш1 из алюминиевого сплава. Сопряжение стержней в узлах каркаса жесткое. Купол вписан в сферу радиусом $R=29$ м, состоит из 568 стержней длиной L_i от 2,07 до 3,82 м и насчитывает 201 узел. Допускаемые отклонения расстояний между узлами по направлению всех стержней приняты равными $\Delta L_i/2 = \pm 2$ мм [2].

Случайная изменчивость размеров реальных конструкций характеризуется нормальным законом распределения. Поэтому при численной сборке каркаса купола для моделирования отклонений длин стержней от номинальных значений использовались псевдослучайные нормально распределенные числа с $\mu=1$ и $\sigma=1$, которые генерировались по специальному алгоритму — датчику случайных чисел. Величины допускаемых отклонений при этом соответствовали значению $3\sigma_i$.

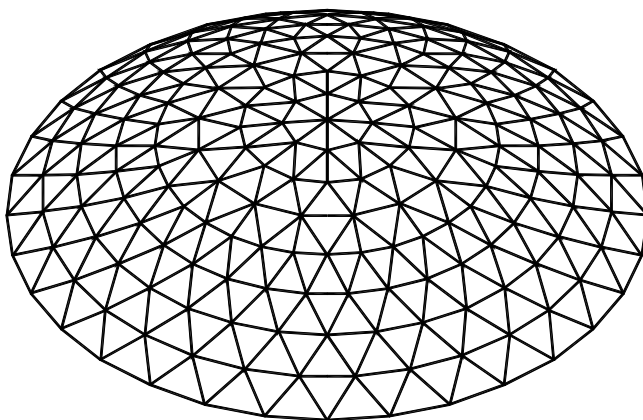


Рис. 1. Общий вид исследуемого односетчатого купола

Номинальные расстояния между узлами L_i определялись по проектным координатам узлов каркаса односетчатого купола, которые были заранее вычислены по программе геометрического расчета пространственных сооружений «GERA» [3].

Численное моделирование монтажа каркаса односетчатого купола осуществлялось последовательным вычислением координат его узлов как точек пересечения действительных расстояний между ними. Для этого использовалась процедура геометрического расчета «Пересечение трех сфер». Такая математическая интерпретация сборки максимально приближена к реальному монтажу стержневых элементов односетчатого купола.

Было выполнено численное моделирование сборки каркаса односетчатого купола, при котором исключалось искажение его геометрической формы как сферического купола. Оно имитировало последовательное крепление к двум уже смонтированным узлам монтажных стержней с соединением их между собой в третьем узле. При этом расстояние от каждого узла купола до центра сферы соответствовало его радиусу, что подразумевает его выверку.

Даже при таком строгом подходе к монтажу односетчатого купола узлы его опорного контура не будут лежать в одной плоскости, и при установке каркаса на опоры только три его контурных узла будут плотно прилегать к опорам. В остальных же опорных узлах возникнут зазоры, т. е. между узлами и опорами появится какое-то расстояние. Ранее проведенное исследование [4] показало, что наиболее вероятным будет такое опирание на три узла, при котором образуется равнобедренный треугольник с величиной угла между одинаковыми сторонами около 22, 45, 56 или 68°.

В данных исследованиях моделировались схемы начального опирания, изображенные на рис. 2. С этой целью, осуществлялись 20 000 численных построений каркаса односетчатого купола, который по завершению построения устанавливался на горизонтальную опорную плоскость указанными тройками узлов контура. Если ни один из остальных узлов контура не оказывался ниже

опорной плоскости, то такое построение считалось благоприятным событием и для него определялись отклонения узлов контура от горизонтальной опорной плоскости, т. е. в направлении оси Z . В противном случае (неблагоприятное событие) численное построение каркаса выбраковывалось. Число благоприятных событий составляло объем выборки.

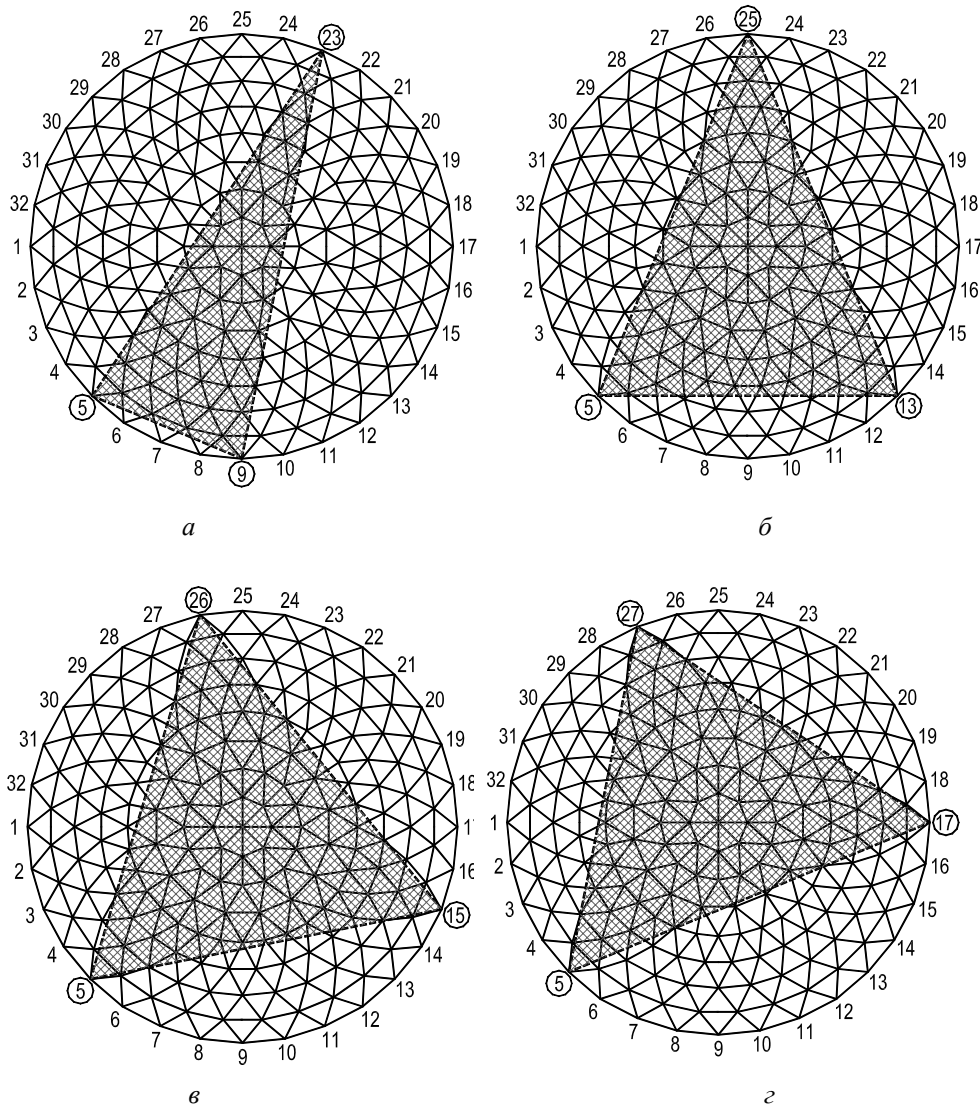


Рис. 2. Исследуемые схемы начального опирания каркаса купола на узлы: a — 5, 9, 23; $б$ — 5, 13, 25; $в$ — 5, 15, 26; $г$ — 5, 17, 27

Результаты статистических испытаний приведены в таблице. Для всех схем начального опирания характерно плавное увеличение среднеквадратических значений σ и математических ожиданий μ отклонений от опорных узлов с максимальными величинами около середины. Иначе говоря, отклонения контурных узлов от опорной плоскости «образуют» ломаную линию между опорными узлами, по форме похожую на дугу.

*Статистические данные по отклонениям, мм, контурных узлов
для различных схем начального опирания (n — объем выборки)*

№ узла	Схема а n=83		Схема б n=100		Схема в n=98		Схема г n=137	
	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ
1	2,14	3,74	1,92	2,73	1,96	2,49	1,99	2,95
2	2,13	3,23	1,88	2,74	1,82	3,22	1,78	3,26
3	1,81	2,68	1,97	2,35	1,47	2,32	1,70	2,43
4	1,60	2,17	1,53	1,86	1,34	1,82	1,57	2,12
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1,51	1,78	1,26	1,52	1,31	1,80	1,41	1,87
7	1,74	2,13	1,75	2,62	2,23	3,32	2,12	3,40
8	1,32	1,87	1,57	2,29	1,81	2,93	1,89	3,01
9	0	0	1,88	2,45	2,18	3,45	2,08	3,31
10	1,31	1,89	1,90	3,03	1,87	3,49	2,00	3,23
11	2,19	2,77	1,70	2,52	2,07	3,06	2,18	4,49
12	2,02	2,57	1,44	2,21	2,06	3,53	1,93	3,59
13	2,11	2,42	0	0	2,06	2,82	2,08	3,43
14	2,03	2,93	1,29	1,90	1,75	2,38	1,94	3,38
15	2,19	3,38	1,98	2,78	0	0	1,53	2,10
16	2,27	2,97	1,67	2,53	1,36	1,81	1,40	2,23
17	2,33	3,73	1,79	2,92	1,67	2,13	0	0
18	2,26	3,25	1,90	3,00	1,63	2,33	1,36	1,60
19	2,02	2,82	2,15	3,69	1,86	2,69	2,00	3,09
20	2,09	3,50	2,01	3,35	1,69	2,54	1,75	2,70
21	2,03	3,28	1,94	2,89	1,94	2,96	1,96	3,63
22	1,67	2,88	2,01	3,25	1,54	2,64	1,88	3,38
23	0	0	1,68	2,25	1,53	2,11	2,16	3,54
24	1,29	1,69	1,30	1,85	1,47	2,02	1,93	3,62
25	1,44	2,03	0	0	1,2	1,45	2,05	3,35
26	1,45	2,37	1,22	1,82	0	0	1,60	2,48
27	1,95	3,38	2,17	3,52	1,67	2,37	0	0
28	2,04	3,19	1,91	2,91	1,71	2,48	1,22	1,43
29	2,13	3,48	1,92	2,79	1,71	3,11	1,51	2,29
30	1,60	2,82	1,63	2,77	1,67	2,58	1,55	2,25
31	2,28	4,26	2,18	4,04	2,13	3,20	1,70	2,55
32	2,01	3,83	2,01	3,11	1,68	2,75	1,76	2,59

На рис. 3 приведены графики, отражающие изменение значений математических ожиданий отклонений контурных узлов для разных схем начального опирания каркаса исследуемого купола.



Рис. 3. Графики изменения математических ожиданий отклонений контурных узлов для разных схем начального опирания

Из таблицы и рис. 3 видно, что наиболее значимым, как с точки зрения вероятности появления, так и по величине отклонений, является первоначальное опирание по схеме 2.

Предельные отклонения узлов контура по каждому участку — «пролету» между узлами начального опирания могут быть вычислены по формуле

$$[\delta_j] = \mu_j + 3\sigma_j. \quad (1)$$

Вероятность предельного отклонения в сторону увеличения по абсолютной величине (для нормального распределения) равна $P_{[\delta]} = (1/2) 0,0027$.

Так как отклонения узлов на разных участках между узлами начального опирания не зависят друг от друга, то вероятность одновременного появления предельных отклонений на них практически равна нулю. Поэтому в дальнейшем для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) каркаса односетчатого купола следует учитывать отклонения, величина которых не превышает

$$\delta_j = \mu_j + 1,5\sigma_j. \quad (2)$$

Вероятность одновременного появления такого отклонения на всех участках между узлами первоначального опирания (5, 17, 27) будет равна

$$P_{[\delta]} = (1/2) (0,1336)^3 = (1/2) 0,0024.$$

На рис. 4 представлен график изменения наибольших отклонений δ_j для схемы 2. Так как этот график из-за небольшого объема выборки является ломаной линией, то здесь же приведена его интерпретация в виде плавной и симметричной на отдельных участках кривой в качестве расчетных отклонений — $\delta_{\text{расч}}$.

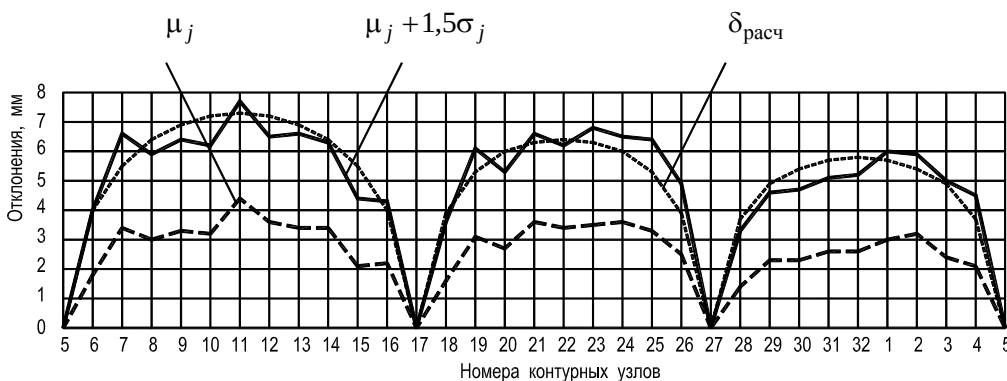


Рис. 4. График изменения наибольших расчетных отклонений контурных узлов для схемы 2 начального опирания

Каркас односетчатого купола после первоначального опирания на три узла будет деформироваться под действием собственного веса конструкций.

Для изучения этого процесса были выполнены специальные исследования НДС каркаса односетчатого купола с использованием программного

комплекса SCAD [5]. Методика этих исследований диктовалась поведением каркаса односетчатого купола после момента первоначального опирания, когда три его контурных узла (5, 17, 27) становятся опорными. Оно характеризуется последовательным изменением расчетной схемы купола в процессе деформирования каркаса. Изменение расчетной схемы в основном связано с постоянно увеличивающимся из-за деформирования количества опорных узлов по контуру купола. На рис. 5 приведены графики изменения отклонений контурных узлов в процессе деформирования сетчатого каркаса.

Расчеты, выполненные в рамках этих исследований, моделировали отдельные этапы деформирования каркаса односетчатого купола в процессе последовательного включения в работу в качестве опоры одного или несколько контурных узлов на участках между узлами начального опирания 5, 17, 27.

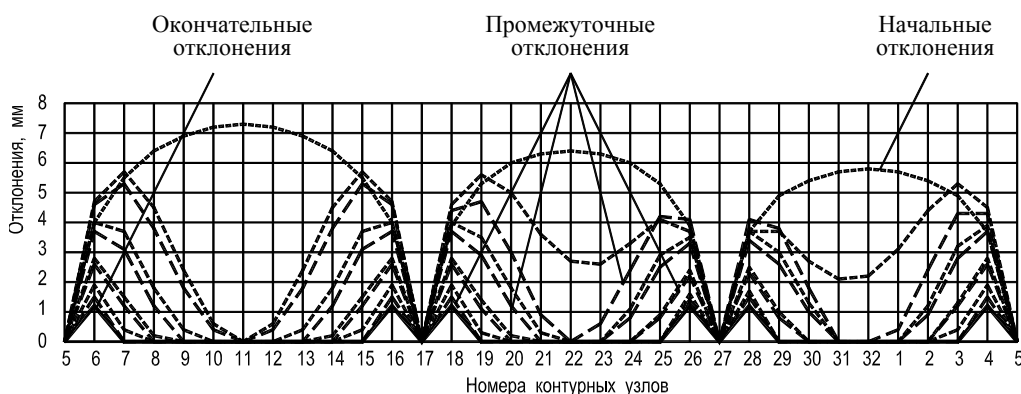


Рис. 5. Графики изменения отклонений контурных узлов односетчатого купола в процессе деформирования от собственного веса каркаса для схемы с начальным опирания

Рассмотрим принципиальные моменты этого процесса. На первом этапе участок («пролет») контура между узлами 5 и 17 (см. рис. 2, 5) будет прогибаться подобно криволинейной балке до момента, пока узел 11 не коснется опорной плоскости. С этого момента узел 11 становится опорным и схема каркаса становится четырехопорной. Затем прогиб участков контура между узлами 17—27 и 27—5 приведет к появлению, как минимум, еще двух опорных узлов: 22 и 32, после чего схема каркаса купола становится шестиопорной.

Исследования показали, что на втором этапе включаются в работу в качестве опор 31, 10, 12, 21, 23 и 1-й контурные узлы, то есть опорные группы узлов увеличиваются от середин «пролетов» схемы начального опирания. После завершения деформирования каркаса купола под действием собственного веса не во всех контурных узлах отклонения компенсируются прогибами. В шести узлах: 6, 16, 18, 26, 28, 4, с каждой стороны около узлов первоначального опирания (5, 17, 27) отклонения остаются.

При деформациях каркаса купола на каждом этапе в стержнях возникают внутренние усилия. Учитывая то обстоятельство, что расчетные схемы на всех этапах различны и отличаются от проектной расчетной схемы, следует

ожидать появления в стержнях усилий, отличающихся от усилий, возникающих от собственного веса в случае опирания на все контурные узлы.

На рис. 6 приведены схемы распределения начальных усилий в стержнях каркаса купола, полученные в результате исследования НДС каркаса.

Устранение оставшихся после деформирования каркаса отклонений в контурных узлах путем притягивания их к опорной плоскости приводит к появлению существенных усилий в стержнях, расположенных около этих узлов.

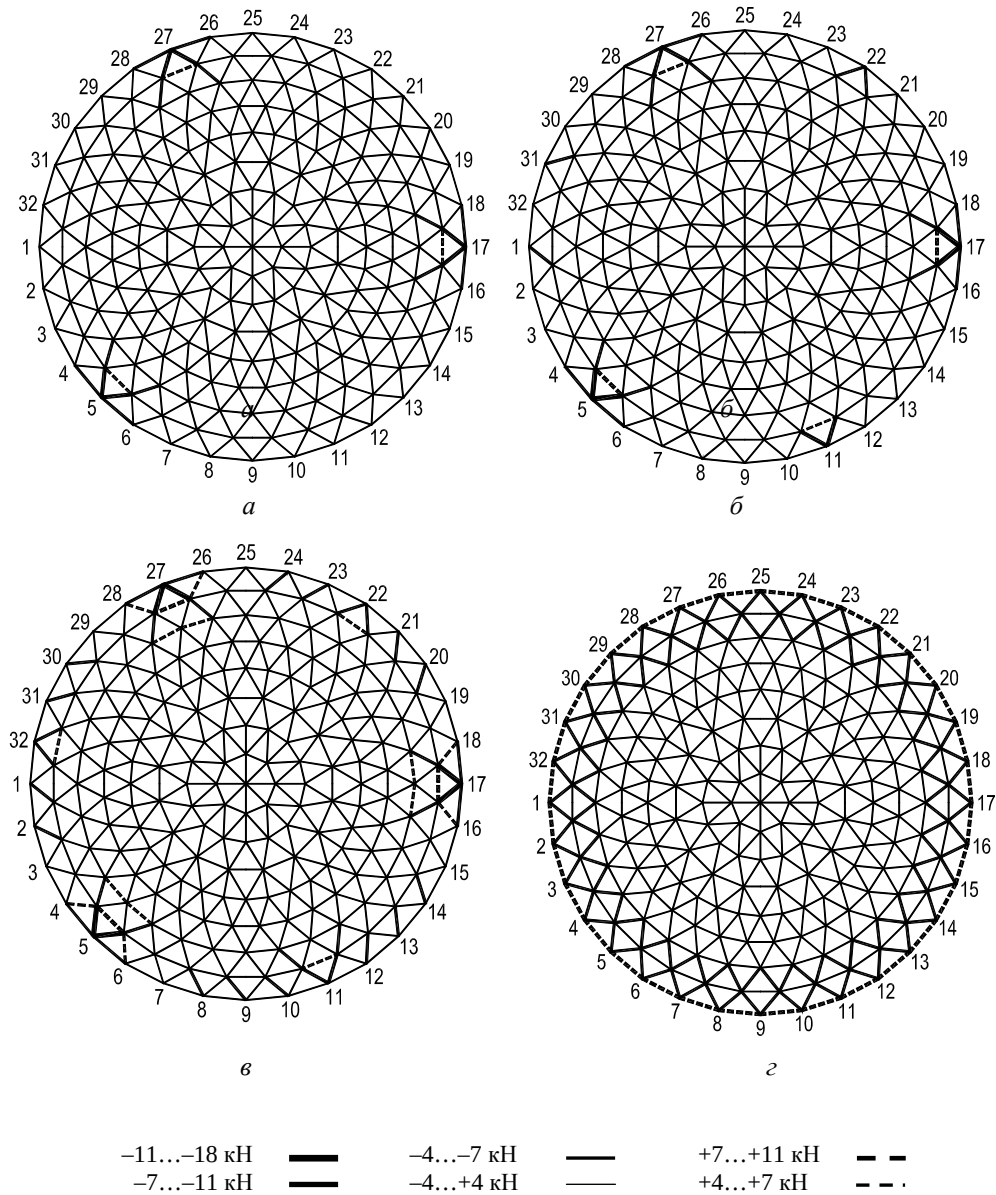


Рис. 6. Схемы распределения начальных усилий в стержнях купола от собственного веса каркаса: а — 1-й этап деформирования для схемы г начального опирания; б — 2-й этап деформирования; в — завершение деформирования; г — при проектном опирании на все контурные узлы

Анализ схем распределения начальных усилий в стержнях каркаса исследуемого односетчатого купола позволяет отметить следующее:

наибольшие усилия, которые могут появиться в отдельных стержнях вследствие погрешностей сборки и монтажа односетчатого купола, по своей абсолютной величине существенно превышают усилия, возникающие от собственного веса каркаса проектной геометрической формы и схемы опирания;

по характеру действия эти усилия (сжатие или растяжение) совпадают или могут быть противоположными усилиям для каркаса проектной формы;

распределяются данные усилия в контурных зонах каркаса возле узлов начального опирания и узлов последующего включения в работу независимо от того, на какой стадии это происходит;

наибольшее влияние на величины этих усилий оказывают первые два этапа деформирования каркаса после начального опирания.

При учете начальных усилий для оценки НДС следует отличать усилия от деформирования контура каркаса от усилий при проектном опирании.

Основываясь на полученных в результате численных исследований данных, можно сделать также общие *выводы*:

1) погрешности сборки и монтажа односетчатого купола могут оказать влияние на его НДС из-за появления значительных начальных усилий в стержнях;

2) силовые способы устранения зазоров в опорных узлах могут также привести к изменению НДС купольных каркасов;

3) расчетные схемы каркасов односетчатых куполов при проверке их НДС на эксплуатационные воздействия могут отличаться от проектных на некоторых стадиях работы из-за искажения их действительной геометрической формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедь Е.В. Особенности численного моделирования монтажа каркаса односетчатого купола // Вестник ВолгГАСА. Серия: Строительство и архитектура. 2003. Вып. 3(9). С. 81—86.
2. Котлов А.Ф. Допуски и технические измерения при монтаже металлических и железобетонных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 304 с.
3. Лебедь Е.В. Геометрический расчет каркасов пространственных сооружений : учеб. пособие. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. 40 с.
4. Лебедь Е.В. Анализ особенностей начального опирания односетчатого купола из-за погрешностей сборки на основе его численного моделирования // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Технические науки. 2006. Вып. 6(20). С. 67—71.
5. Карпиловский В.С. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко и др. М. : Издательство АСВ, 2004. 592 с.

© Лебедь Е.В., Куницын А.А., 2006

УДК 624.072.2.012.45

Е.И. Журбина, В. Крингс**ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ. СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТОМ СОГЛАСНО DIN 1045-1**

Выполнены расчеты сложных сечений с тавровой, трапециевидной или треугольной формой сжатой зоны на изгиб с продольной силой и получены таблицы для армирования таких сечений.

The authors carried out the analysis of the composite sections with T-shaped, trapezoid or triangular form of the compression region while buckling and designed the tables describing the reinforcement of such sections

Для упрощенного расчета элементов со сложным поперечным сечением на изгиб с продольной силой в данной статье приведены таблицы, по которым в зависимости от коэффициента A_0 для прямоугольного сечения можно получить площадь требуемой арматуры для сложного сечения.

Таблицы для тавровых сечений и прямоугольных сечений со скошенными краями вверху будут приведены в последующей публикации¹.

Чтобы получить представление о необходимом количестве арматуры, здесь даны не коэффициенты армирования η , а процентное увеличение требуемого количества арматуры по сравнению с прямоугольным сечением. Таким образом, наглядно показано приращение арматуры в зависимости от формы сечения и нагрузки (положения нейтральной оси) для всех типов сечения. С помощью этих таблиц пользователь имеет возможность быстро и просто рассчитывать сложные сечения.

Согласно (6.13) [1] расчет изгибаемых сечений должен производиться из условия:

$$M \leq M_{ult}.$$

Расчет сечений изгибаемых элементов согласно п. 6.2.13 [1] должен производиться из условия

$$\chi \leq \xi_R \cdot h_0,$$

где значение граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R определяется по формуле (6.11) [1]:

$$\xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b,ult}}}.$$

Значения ξ_R для различных классов арматуры приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Значение граничной относительной сжатой зоны ξ_R

A240	A300	A400	A500
0,612	0,577	0,531	0,493

¹ См. в Интернет-вестнике ВолгГАСУ. Сер.: Строительная информатика. 2006. Вып. 1(2).

Применение таблиц

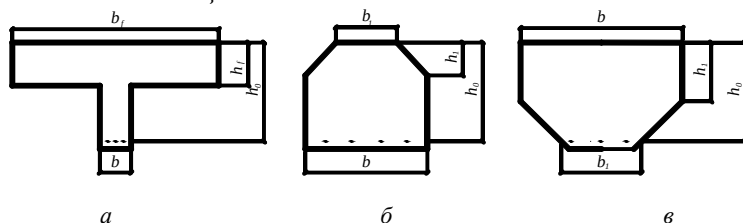


Рис. 1. Обозначения размеров сечения: *a* — тавровое сечение; *б* — прямоугольное сечение со скошенными краями вверх; *в* — прямоугольное сечение со скошенными краями вниз

Дано: материал конструкции — бетон класса В15÷В60, арматура класса А240÷А500; размеры сечения: b_1 , b , h_1 , h_0 ; нагрузка: M и N ; расчетный изгибающий момент относительно центра тяжести арматуры $M_S = M - N \cdot z_S$;

коэффициент для таблицы $A_0 = \frac{M_S}{R_b \cdot \gamma_{bi} \cdot b \cdot h_0^2}$.

Необходимо определить требуемую площадь арматуры.

Из табл. 2 считываем процент увеличения армирования k_S в соответствии с нагрузкой и заданным соотношением размеров сечения $\frac{b_1}{b}$ и $\frac{h_1}{h_0}$:

$$\rho_S = 1 + \frac{k_S}{100}.$$

Тогда требуемая площадь арматуры равна $A_S = \rho_S \cdot \frac{M_S}{R_S \cdot \eta \cdot h_0} + \frac{N}{R_S}$, где η — коэффициент для прямоугольного сечения.

Пример 1

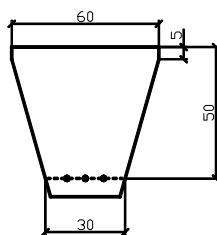


Рис. 2. Прямоугольное сечение со скошенными краями внизу

Дано: материал конструкции — бетон класса В40, $R_b = 22,0$ МПа; арматура класса А500; $R_S = 435$ МПа; размеры сечения: b_1 , b , h_1 , h_0 ; 15/ 30/ 5/ 50 см; нагрузка $M = 940$ кН·м; расчетный момент относительно центра тяжести арматуры $M_S = 940$ кН·м; коэффициент для таблицы $A_0 = \frac{940 \cdot 100}{2,2 \cdot 0,9 \cdot 60 \cdot 50^2} = 0,28$;

соотношение размеров сечения $\frac{b_1}{b} = 0,50$ и $\frac{h_1}{h_0} = 0,10$.

Для этого сечения по табл. 3 получили $\xi = 0,357$, что не превышает предельного значения, согласно табл. 1, $\xi_R = 0,493$.

Значения k_s для прямоугольного сечения со скошенными краями внизу

A ₀	η	h ₁ / h ₀ =									h ₁ / h ₀ =									h ₁ / h ₀ =											
		0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
0,01	0,995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,02	0,990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,04	0,980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,06	0,969	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,08	0,958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,10	0,947	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,12	0,936	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,14	0,924	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,16	0,912	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,18	0,900	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,20	0,887	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,22	0,874	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,24	0,861	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,26	0,846	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,28	0,832	5	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,30	0,816	7	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,32	0,800		6	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,34	0,783			5	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,36	0,765					3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,38	0,745						2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,40	0,724									1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,42	0,700											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		b ₁ / b =0,00									b ₁ / b =0,20									b ₁ / b =0,40											

A ₀	η	h ₁ / h ₀ =										h ₁ / h ₀ =										h ₁ / h ₀ =										
		0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	
0,01	0,995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,02	0,990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,04	0,980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,06	0,969	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,08	0,958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,10	0,947	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,12	0,936	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,14	0,924	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,16	0,912	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,18	0,900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,20	0,887	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,22	0,874	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,24	0,861	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,26	0,846	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,28	0,832	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,30	0,816	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0		
0,32	0,800	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0		
0,34	0,783	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0		
0,36	0,765	5	4	2	2	1	1	0	0	0	0	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0		
0,38	0,745			4	2	2	1	0	0	0	0	5	4	3	2	1	1	0	0	0	0	2	2	1	1	1	0	0	0	0		
0,40	0,724						2	1	0	0	0				2	1	1	0	0	0	3	2	2	1	1	1	0	0	0	0		
0,42	0,700									1	0						1	1	0	0				1	1	1	0	0	0	0		
0,44	0,673										0							1	1	0								0	0	0		
b ₁ / b =0,50											b ₁ / b =0,60											b ₁ / b =0,80										

Значения $\xi \cdot 10^3$ для прямоугольного сечения со скошенными краями внизу

A ₀	η	h ₁ / h ₀ =										h ₁ / h ₀ =										h ₁ / h ₀ =									
		0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
0,01	0,0101	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
0,02	0,0202	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
0,04	0,0408	42	41	41	41	41	41	41	41	41	42	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	
0,06	0,0619	64	62	62	62	62	62	62	62	62	64	62	62	62	62	62	62	62	62	62	63	62	62	62	62	62	62	62	62	62	
0,08	0,0835	87	84	83	83	83	83	83	83	83	87	84	83	83	83	83	83	83	83	83	86	84	83	83	83	83	83	83	83	83	
0,10	0,1056	112	107	105	106	106	106	106	106	106	111	106	105	106	106	106	106	106	106	106	108	106	105	106	106	106	106	106	106	106	
0,12	0,1282	138	132	129	128	128	128	128	128	128	136	131	128	128	128	128	128	128	128	128	134	130	128	128	128	128	128	128	128	128	
0,14	0,1515	166	158	153	151	151	151	151	151	151	162	156	153	151	151	151	151	151	151	151	159	155	152	151	151	151	151	151	151	151	
0,16	0,1754	196	185	179	176	175	175	175	175	175	191	183	178	176	175	175	175	175	175	175	186	181	177	175	175	175	175	175	175	175	
0,18	0,2000	228	215	206	201	200	200	200	200	200	221	211	205	201	200	200	200	200	200	200	215	208	204	201	200	200	200	200	200	200	
0,20	0,2254	263	247	236	229	226	225	225	225	225	253	242	234	228	226	225	225	225	225	225	245	237	231	227	226	225	225	225	225	225	
0,22	0,2517	302	282	268	259	253	251	252	252	252	288	274	264	257	253	251	252	252	252	252	277	268	261	256	253	252	252	252	252	252	
0,24	0,2789	345	321	303	291	283	279	279	279	279	326	310	297	288	282	279	279	279	279	279	311	301	292	286	281	279	279	279	279	279	
0,26	0,3072	395	365	343	326	316	309	307	307	307	369	349	333	322	314	309	307	307	307	307	349	336	326	318	312	308	307	307	307	307	
0,28	0,3367	455	416	387	366	352	342	337	337	337	417	392	373	359	348	341	337	337	337	337	389	374	362	352	345	340	337	337	337	337	
0,30	0,3675	532	477	439	412	392	379	371	367	368	472	442	418	400	386	376	370	367	368	368	434	416	402	390	381	374	369	367	368	368	
0,32	0,4000		558	503	465	439	420	408	402	400	540	500	470	446	428	415	406	401	400	400	485	464	446	431	420	411	405	401	400	400	
0,34	0,4343			588	532	495	469	451	440	435	434			500	477	460	447	439	435	434	545	518	496	478	463	452	443	438	435	434	
0,36	0,4708					566	528	502	485	475	471			610	567	535	511	494	482	474	471		582	554	531	513	498	487	479	473	471
0,38	0,5101						606	566	540	523	513					608	574	550	532	520	512				596	571	552	537	525	517	512
0,40	0,5528																														
0,42	0,6000																														
		b ₁ / b =0,00										b ₁ / b =0,20										b ₁ / b =0,40									

A_0	$h_1 / h_0 =$										$h_1 / h_0 =$										$h_1 / h_0 =$									
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
0,01	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
0,02	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
0,04	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0,06	63	62	62	62	62	62	62	62	62	62	63	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
0,08	85	84	83	83	83	83	83	83	83	83	85	84	83	83	83	83	83	83	83	83	84	84	83	83	83	83	83	83	83	83
0,10	108	105	105	106	106	106	106	106	106	106	107	105	105	106	106	106	106	106	106	106	106	105	105	106	106	106	106	106	106	106
0,12	133	130	128	128	128	128	128	128	128	128	132	129	128	128	128	128	128	128	128	128	130	129	128	128	128	128	128	128	128	128
0,14	158	154	152	151	151	151	151	151	151	151	157	154	152	151	151	151	151	151	151	151	154	153	152	151	151	151	151	151	151	151
0,16	184	180	177	175	175	175	175	175	175	175	182	179	177	175	175	175	175	175	175	175	179	177	176	175	175	175	175	175	175	175
0,18	212	207	203	201	200	200	200	200	200	200	209	205	202	200	200	200	200	200	200	200	204	202	201	200	200	200	200	200	200	200
0,20	241	235	230	227	225	225	225	225	225	225	238	233	229	227	225	225	225	225	225	225	231	229	227	226	225	225	225	225	225	225
0,22	272	265	259	255	252	252	252	252	252	252	267	262	257	254	252	252	252	252	252	252	259	256	254	253	252	252	252	252	252	252
0,24	305	296	289	284	281	279	279	279	279	279	299	292	287	283	280	279	279	279	279	279	288	285	283	281	280	279	279	279	279	279
0,26	340	330	322	316	311	308	307	307	307	307	332	325	319	314	310	308	307	307	307	307	319	315	313	310	309	307	307	307	307	307
0,28	378	366	357	349	343	339	337	337	337	337	368	359	352	346	342	339	337	337	337	337	351	347	344	341	339	338	337	337	337	337
0,30	419	406	395	385	378	373	369	367	368	368	407	397	388	381	376	371	369	367	368	368	385	381	377	374	371	369	368	367	368	368
0,32	465	450	436	425	416	409	404	401	400	400	449	437	427	419	412	407	403	401	400	400	421	417	412	409	406	403	401	400	400	400
0,34	517	498	482	469	457	448	442	437	435	434	495	482	470	460	452	445	440	436	434	434	461	455	450	446	442	439	437	435	434	434
0,36	578	554	535	518	504	493	484	477	473	471	548	532	518	506	496	488	481	476	472	471	503	497	491	487	482	478	475	473	471	471
0,38											609	590	573	558	546	535	526	519	514	511	550	543	537	531	526	521	517	514	512	510
0,40																					604	595	587	581	574	569	564	560	557	554
0,42																														
0,44																														
																			</											

Из табл. 2 считываем процент увеличения армирования $k_s = 1$. Тогда

$$\rho_s = 1 + \frac{k_s}{100} = 1,01; \text{ коэффициент для прямоугольного сечения } \eta = 0,832.$$

Требуемая площадь арматуры, см^2 , равна:

$$A_s = 1,01 \cdot \frac{940 \cdot 100}{43,5 \cdot 0,832 \cdot 50} = 52,46.$$

Расчет согласно немецким нормам DIN 1045-1. Расчетный момент относительно центра тяжести арматуры $M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}$; входной коэффициент для таблицы [2] $\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$; где M_{Eds} — расчетный изгибающий

момент, действующий на сечение; b — ширина сечения на уровне растянутой арматуры; d — рабочая высота сечения; f_{cd} — расчетное сопротивление бетона сжатию.

В соответствии с соотношениями размеров сечения считываем из таблиц [3] коэффициент для армирования ω_1 и процент прироста арматуры по сравнению с прямоугольным сечением k_s .

Тогда требуемая площадь арматуры равна

$$A_{s1} = \rho_s \cdot \omega_1 \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}.$$

Пример 2

Размеры сечения и нагрузка как в прим. 1.

Дано: материал конструкции — бетон класса C40/50 $f_{cd} = \frac{40 \cdot 0,85}{1,5} =$

$= 22,67$ МПа, арматура класса S500, $f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435$ МПа, $M_{Eds} = 940$ кН м,

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{0,940}{0,6 \cdot 0,5^2 \cdot 22,67} = 0,28.$$

По табл. 2 [4] $k_s = 1$ и $\omega_1 = 0,3368$. Согласно [2] значение граничной относительной сжатой зоны принято равным $k_x^{zul} = 0,45$, что учтено в табл. 2 [3].

$$A_{s1} = \rho_s \cdot \omega_1 \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 1,01 \cdot 0,3368 \cdot 60 \cdot 50 \cdot \frac{22,67}{435} = 53,18.$$

Сравнив результаты расчета, получим, что по немецким нормам необходимо на 1,4 % больше арматуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения. М. : ФГУП ЦПП, 2005.
2. DIN 1045-1. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Berlin, 2001.
3. Koch Th. Tafeln fuer die Bemessung von Querschnitten mit trapez- und dreieckfoerniger Druckzone nach DIN 1045-1 / Th. Koch, W. Krings // Bautechnik 83. 2006.

© Журбина Е.И., Крингс В., 2006

УДК 624.011.2

М.В. Грязнов, С.И. Рощина

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСКОВЫХ ФЕРМ

Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния новой конструкции дисковых ферм, разработанной на основе клефанерных балок и раскосных дощатых ферм. Проведено экспериментальное исследование моделей ферм при кратковременной и длительнодействующей нагрузке.

The Modern development of the building science leads to improvement existing and creation new building designs. Industrialness, small erection mass, cost-performance and attractive type of designs become the main criterions of their choice for construction. The given article is about research of tense - deformed conditions of new construction of the disc farms designed on base glueveneer beams and slanting board farms. The results of the experimental research of the models of the farms under short and longacted load are given there too.

Первые исследования дисковых ферм проводились в 1972 г. в Хабаровском политехническом институте В.М. Чеботарем, П.П. Рожко, В.И. Кулишем. Ими же были разработаны дисковые фермы для моста пролетом 12 м.

Позднее в политехническом институте также велись исследования и разработки дисковых ферм. В 1983 г. В.Ю. Щуко и Л.А. Еропов разработали и произвели испытания брусчатых дисковых ферм марки БДФ-12-2.25, пролетом 12 м под нагрузку 2,25 кН/м.

На основании полученных ранее экспериментально-теоретических исследований предложена новая конструкция дисковой фермы, которая применяется для покрытий жилых и общественных зданий с кровлей из штучных и рулонных материалов.

Дисковые фермы имеют треугольное очертание и выполнены из панелей (дисков) трапецевидной формы, расставленных по длине фермы с определенным шагом, и поясов из обрезного пиломатериала (рис. 1). В качестве дисков могут применяться фанера, цементно-стружечные плиты и асбестоцементные листы. Данная конструкция позволяет заменить стоечно-раскосную систему бесфасоночных ферм на диски и сократить материалоемкость и трудоемкость изготовления.

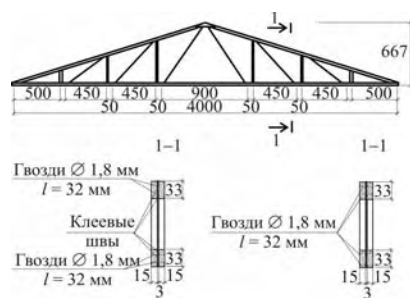


Рис. 1. Конструкция моделей ферм с клеегвоздевыми и гвоздевыми соединениями

Поперечное сечение ферм двутавровое, пояса изготавливаются из пиломатериалов хвойных пород древесины 2-го сорта [1], что позволяет уменьшить стоимость конструкций на 10...15 %. Фермы рекомендуется применять для пролетов 6...15 м при шаге 1...3 м под расчетную нагрузку 1...6 кН/м. Высота ферм назначается из условия обеспечения необходимой жесткости и уклона кровли и составляет 1/5...1/8 части пролета [5, 6].

Для определения фактической несущей способности и деформативности ферм были проведены экспериментальные исследования кратковременной нагрузкой, цель которого:

- 1) исследовать напряженно-деформированное состояние на всех стадиях работы материала в фермах;
- 2) выявить особенности перехода в предельное состояние и характер разрушения;
- 3) оценить устойчивость дисков и определить их оптимальные параметры;
- 4) определить величину разрушающей нагрузки;
- 5) сравнить результаты экспериментальных и теоретических исследований.

Экспериментальные исследования проводились на моделях ферм.

Для обеспечения соответствия между моделью, имитирующей работу натурной фермы до разрушения, и ее прототипом соблюдалось требование простого подобия [2, 3, 4].

С учетом при проектировании моделей рекомендации [2, 3, 4] принят масштабный множитель $m_l=1/3$, а за основу приняты натурные конструкции пролетом 12 м. Таким образом, на основании полного геометрического подобия расчетный пролет принят равным 4,0 м. Высота ферм в осях 667 мм.

Для анализа работы фермы с клеегвоздевыми и гвоздевыми соединениями поясов с дисками запроектировано по три конструкции в каждой серии опытных ферм (см. рис. 1):

1-я серия ферм (ДФ1.1, ДФ1.2, ДФ1.3) — с клеегвоздевыми соединениями.

2-я серия ферм (ДФ2.1, ДФ2.2, ДФ2.3) — с гвоздевыми соединениями.

Первая и вторая серии моделей состояли из двухветвевых дисковых ферм треугольного очертания пролетом 4 м с размерами сечений поясов $2 \times 33 \times 15$ мм и дисков из фанеры толщиной 3 мм. Устойчивость дисков из плоскости обеспечивается ребрами жесткости с размером сечений $2 \times 16,5 \times 15$ мм, установленными только на вертикальных кромках дисков. В середине пролета ферм по нижнему поясу и коньковому узлу устраивались монтажные стыки на деревянных накладках с нагельными соединениями.

Для изучения напряженно-деформированного состояния ферм пролетом 4 м была принята восьмиточечная схема нагружения, которая с достаточной точностью имитирует эксплуатационную нагрузку, равномерно-распределенную по всему пролету.

Размеры сечений элементов моделей определялись на основе проведенных расчетов с помощью ПК «ЛИРА-9» под расчетную нагрузку 3 кН/м. Размеры накладок, площади соединения дисков по нижнему поясу и других соединительных элементов (гвозди, нагели) принимались из расчетов узловых соединений. Пояса ферм изготавливались из древесины второго сорта. Из этого же материала были изготовлены ребра жесткости и накладки монтажных стыков. Диски изготовлены из фанеры марки ФСФ толщиной 3 мм. Склеивание поясов с дисками осуществлялось на клее ПВА с отвердителем.

Модели ферм собирали по частям (полуфермам). Укрупнительная сборка этих ферм производилась после необходимой технологической выдержки.

Испытания ферм проходили до разрушения. Работа исследуемых конструкций при нагружениях до расчетной нагрузки происходила в условно-упругой стадии. Деформативность моделей при расчетной нагрузке была сравнительно мала по отношению к допустимой (1/250). Максимальные про-

гибы при расчетной нагрузке для моделей первой серии составили 5,35 мм или $(1/770)L$, для моделей второй серии — 6,8 мм или $(1/588)L$.

Нормальные напряжения при расчетной нагрузке в наиболее нагруженных элементах ферм первой серии составили: в верхнем поясе 10,5...12,5; в нижнем 5,85...6,75 МПа; в моделях второй серии — соответственно 11,5...13,0 и 5,0...6,0 МПа.

Касательные напряжения в опорном диске при расчетной нагрузке составили: в модели первой серии 4,9...5,7, второй серии — 5,3...5,8 МПа.

Конструкции моделей первой серии с клеегвоздевыми соединениями дисков исчерпали свою несущую способность при нагрузке 2,405 кН/м, которая в 2,4 раза превышает расчетную. Конструкции моделей второй серии исчерпали несущую способность при нагрузке 2,1 кН/м. Полные прогибы составили 21,1 и 22,8 мм для моделей первой и второй серий соответственно. Расхождение расчетных усилий с экспериментальными составляет 3...5 %. График изменения прогибов ферм при загрузении кратковременной нагрузкой представлен на рис. 2.

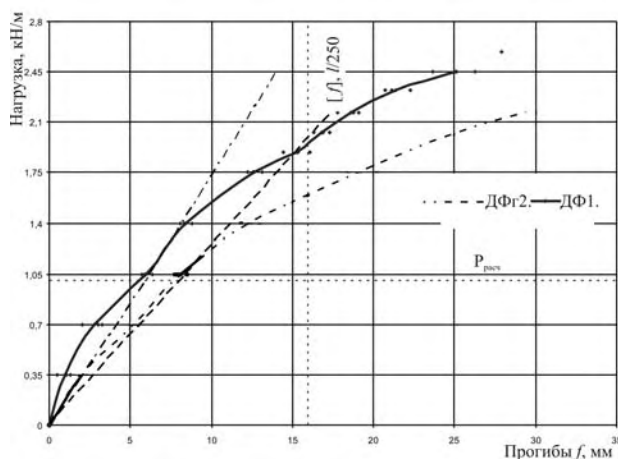


Рис. 2. График «нагрузка — прогибы» ферм при кратковременной нагрузке: ДФ1 — ферма с клеегвоздевыми соединениями дисков; ДФг2 — ферма с гвоздевыми соединениями дисков

Требуемый коэффициент безопасности для проведенных испытаний определялся в соответствии с рекомендациями [7]: $K_{тр.}$ для ферм первой серии составляет 2,28, второй серии — 2,0.

Коэффициент безопасности при испытании, определенный отношением величины разрушающей нагрузки к расчетной, составил 2,4 и 2,1 для первой и второй серии соответственно.

Разрушение моделей ферм первой серии начиналось с разрыва шпонов фанеры в приопорной зоне (первая панель) на уровне грани нижнего пояса. Полное разрушение ферм происходило от разрыва волокон обоих поясов. Максимальные нормальные напряжения в верхнем поясе достигли значений 24...31, в нижнем — 13,5...17,5 МПа. Касательные напряжения в диске составили 10,5 МПа.

Модели второй серии с гвоздевыми соединениями дисков имели хрупкий характер разрушения. За счет вязкой работы гвоздевого соединения дисков с поясами разрушение ферм 2-й серии происходит от растяжения с изгибом

нижнего пояса в первой панели (хрупкий характер). Напряжения в верхнем поясе составили 24,5...33,0, в нижнем — 11,0...16,5 МПа. Касательные напряжения в диске 10,75 МПа.

Анализ результатов экспериментальных исследований кратковременной нагрузкой показал:

- 1) конструкции моделей ферм с клеегвоздевыми и гвоздевыми соединениями обладают необходимой прочностью и имеют низкую деформативность при расчетной нагрузке по сравнению с нормируемой;
- 2) деформативность моделей ферм с клеегвоздевыми соединениями на 20 % меньше, чем у ферм с гвоздевыми соединениями;
- 3) разрушающая нагрузка для ферм с клеегвоздевыми соединениями на 15 % выше, чем у ферм с гвоздевыми соединениями дисков;
- 4) полученные экспериментальные данные подтверждают надежность конструкций при эксплуатации при обоих видах соединений дисков.

Для оценки деформативности конструкции во времени проведены испытания длительно действующей нагрузкой. Под длительно действующей расчетной нагрузкой выдерживались две фермы с клеегвоздевыми (ДФкл.г) соединениями в течении 304 суток.

Испытания проводились на стационарном стенде в лабораторных условиях. За время испытания прогибы увеличились у фермы с клеегвоздевыми соединениями на 41 %. Относительные краевые деформации волокон древесины и фанеры увеличились у ферм на 33 %.

Изменение деформации во времени вызвано колебаниями относительной влажности воздуха (рис. 3).

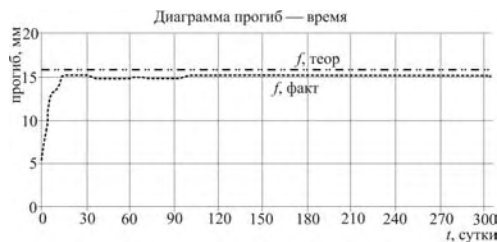


Рис. 3. Изменение прогибов ферм во времени от расчетной нагрузки

Сопоставление фактических данных испытаний с расчетными показали, что ошибка в определении напряжений в фанере составляет 10,2 %, в древесине — 12,1 %, что говорит о достаточной сходимости теоретических расчетов с экспериментальными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. М. : Стройиздат, 1983. 31с.
2. Долидзе Д.Е. Испытание конструкций и сооружений. М. : Высшая школа, 1975. 252 с.
3. Поляков Л.П. Моделирование строительных конструкций / Л.П. Поляков, В.М. Файнбурд. Киев : Будивельник, 1975. 160 с.
4. Мастаченко В.Н. Надежность моделирования строительных конструкций М. : Стройиздат, 1974. 84 с.
5. Конструкции из дерева и пластмасс : учеб. для вузов / Ю.В. Слишкоухов, В.Д. Буданов и др. ; под ред. Г.Г. Карлсена и Ю. В. Слишкоухова. 5-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1986. 543 с., ил.
6. Несущие дощатые конструкции в сельскохозяйственном строительстве : обзор / Д.К. Арленинов, В.Ю. Щуко. М. : ВНИИС, 1983.
7. Иванов Ю.М. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко. М. : Стройиздат, 1981. 41 с.

© Грязнов М.В., Рощина С.И., 2006

УДК 624.011.2

Т.Н. Христофорова, С.И. Рощина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРМИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОСЛАБЛЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ, В ЗОНЕ ЧИСТОГО ИЗГИБА

Описаны армированные деревянные балки с ослабленным сечением: их размеры и основные параметры поперечного сечения; экспериментальная установка, а также приведены основные этапы изучения напряженно-деформированного состояния таких балок. В виде таблиц и графиков изложены результаты эксперимента, а также сделаны выводы о влиянии процента армирования деревянных балок на прочность и надежность при эксплуатации армированных деревянных балок с ослаблениями.

In connection with increasing requirements to designs and constantly decreasing quality of sawtimbers there is a necessity for studying influence of defects of wood of 3 grades for work of the reinforced designs. In clause investigated beams with the weakened section are described: their sizes and key parameters of cross-section section; experimental installation, and also the basic stages of studying of the is intense-deformed condition of such beams are resulted. In the form of tables and schedules results of experiment are stated and also drawn conclusions on influence of percent of reinforcing of wooden beams on durability and reliability at operation of the reinforced wooden beams with easings.

Качество клееных деревянных конструкций определяется в основном их надежностью при эксплуатации и долговечностью. Эти показатели повышаются при армировании конструкций, благодаря уменьшению влияния естественных пороков, а также разгрузке наиболее напряженных зон в результате длительной эксплуатации, вследствие перераспределения усилий между арматурой и древесиной.

Влияние пороков древесины на работу армированных деревянных конструкций изучено недостаточно. С целью выявления напряженно-деформированного состояния армированных деревянных балок из древесины 3-го сорта с ослаблением поперечного сечения в зоне чистого изгиба в виде сучка (естественное ослабление) были проведены экспериментальные исследования на кафедре строительных конструкций Владимирского государственного университета.

Технико-экономические соображения, приведенные в [1], показывают, что для решения поставленной выше задачи исследования целесообразно выполнить на моделях армированных балок, запроектированных по принципу полного геометрического подобия. При этом материалы моделей и реальных конструкций следует принимать одинаковыми, что позволяет получить подобия по жесткостям в деревянных армированных балках автомодельными, а принятый вид моделирования дает возможность сохранить в модели физические явления, происходящие в натурных конструкциях при нагружении.

Было изготовлено и испытано три серии балок, балки изготавливались из древесины сосны 1—3-го сортов [2]. Первая серия балок была без арматуры, в двух других сериях балок армирование осуществлялось арматурными стержнями класса АIII, которые вклеивались в пазы прямоугольного сечения с помощью эпоксидно-песчаного компанауда.

I серия: неармированные балки, изготовленные из древесины 1, 2, 3-го сорта, с высотой сечения 115, 105, 95 мм, что составляет 1/16, 1/17 и 1/19 от L , где L — пролет балки.

II серия: армированные балки ($\mu = 0,027$), изготовленные также из древесины 1, 2, 3-го сорта, с высотой сечения 115, 105, 95 мм.

III серия: армированные балки ($\mu = 0,042$) из древесины 1, 2 и 3-го сорта, с высотой сечения 115, 105, 95 мм (где $\mu = F_a/bh$ — коэффициент армирования; F_a — площадь арматуры; b и h — соответственно ширина и высота сечения балки).

В соответствии с [3] изучение работы балок выполнялось в два этапа: на первом этапе исследовалось напряженно-деформированное состояние армированных и неармированных балок с естественным ослаблением, определялся характер разрушения в зависимости от конструктивных параметров и характера размещения ослабления в деревянных балках.

На втором этапе определялся интегральный модуль упругости балки без арматуры, который в отличие от расчетного модуля упругости учитывает неоднородность древесины, пороки, на этом этапе выполнена подборка заготовок балок по сходным показателям.

Нагрузка прикладывалась в третях пролета, такое решение принято для того, чтобы получить чистый изгиб.

Экспериментальные исследования конструкций пролетом 1,80 м проводились на испытательном стенде (рис. 1). Распределительная траверса в полной мере обеспечивала корректное разделение нагрузки пополам и передачу ее на испытываемую конструкцию. Устойчивость балок из плоскости обеспечивали вплоть до разрушения вертикальные стойки, прикрепленные к реактивной балке.

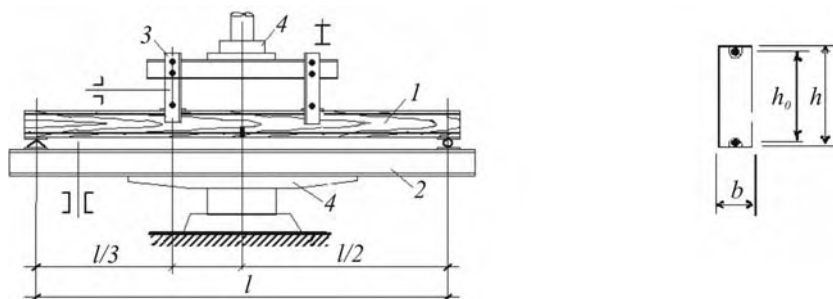


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для испытания балок пролетом 1,8 м: 1 — армированная деревянная балка; 2 — реактивная балка [14; 3 — распределительная траверса I № 10; 4 — гидравлический пресс

В табл. 1 приведено сравнение расчетных, разрушающих нагрузок и прогибов армированных балок с d_a , равным 8 и 10 мм.

Из табл. 1 видно, что в армированных балках с $d_a = 10$ мм значения расчетной и разрушающей нагрузки увеличиваются в 1,01...1,82 раза, значения прогибов в 0,52...0,91 раза ниже, чем в армированных балках с $d_a = 8$ мм. Таким образом, при увеличении коэффициента армирования до 0,040...0,045 влияние ослаблений древесины снижается.

Были проведены и численные исследования балок с ослабленным сечением с использованием ПК «COSMOS/M», результаты сравнения работы трех серий балок показали достаточно хорошую сходимость с экспериментальными результатами и инженерными методами расчета, в пределах 5 % (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Основные результаты экспериментально-теоретических исследований балок

Серии балок	Расчетная нагрузка $\frac{P_{\text{разр}}^{\min} - P_{\text{расч}}^{\max}}{P_{\text{расч}}^{\text{ср}}}$, кН	Разрушающая нагрузка $\frac{P_{\text{разр}}^{\min} - P_{\text{разр}}^{\max}}{P_{\text{разр}}^{\text{ср}}}$, кН	Прогибы (теоретические) $\frac{f_{\text{теор}}^{\min} - f_{\text{теор}}^{\max}}{f_{\text{теор}}^{\text{ср}}}$, мм	Прогибы $\frac{f^{\min} - f^{\max}}{f^{\text{ср}}}$, мм
1. Неармированные	$\frac{1,64 - 2,98}{2,29}$	$\frac{5,2 - 8,0}{6,3}$	$\frac{0,4091 - 0,7397}{0,5989}$	$\frac{0,2935 - 0,6378}{0,5052}$
2. Армированные, $d_a=8$ мм	$\frac{3,89 - 7,05}{5,74}$	$\frac{13,0 - 16,0}{14,9}$	$\frac{0,5482 - 0,7222}{0,6494}$	$\frac{0,9558 - 1,8081}{1,2635}$
3. Армированные, $d_a=10$ мм	$\frac{5,75 - 7,18}{6,51}$	$\frac{15,0 - 21,0}{17,3}$	$\frac{0,4641 - 0,6061}{0,5398}$	$\frac{0,8770 - 1,1562}{0,9902}$

Т а б л и ц а 2

Сравнение результатов исследований балок

Балки	Показатели	Прогибы, мм	Модуль упругости $E \times 10^9$
1. Неармированные	Теория	0,5442	1,0
	ПК COSMOS	0,5477	1,0
	Эксперимент	0,5052	0,997
2. Армированные, $d_a=8$ мм	Теория	0,578	1,0
	ПК COSMOS	1,1876	1,0
	Эксперимент	1,2635	0,971
3. Армированные, $d_a=10$ мм	Теория	0,5436	1,0
	ПК COSMOS	1,0863	1,0
	Эксперимент	0,9902	0,987

На рис. 2 приведена зависимость прогибов балок с ослабленным сечением от изменения нагрузки.

Сравнивая прогибы балок без армирования и с армированием, заметим:

прогибы армированной балки из древесины 2-го сорта, высотой сечения 115 см Б II—1(2) при нагрузке, равной 300 кг меньше на 6 %, чем прогибы неармированной балки из древесины 3-го сорта, высотой сечения 105 см Б I—2(3) и на 10 % меньше, чем прогибы неармированной балки из древесины 1-го сорта, с высотой сечения 115 см Б I—1(1). А при нагрузке 600 кг эта разница возрастает до 31 % при сравнении с балкой Б I—2(3) и до 38 % при сравнении с балкой Б I—1(1);

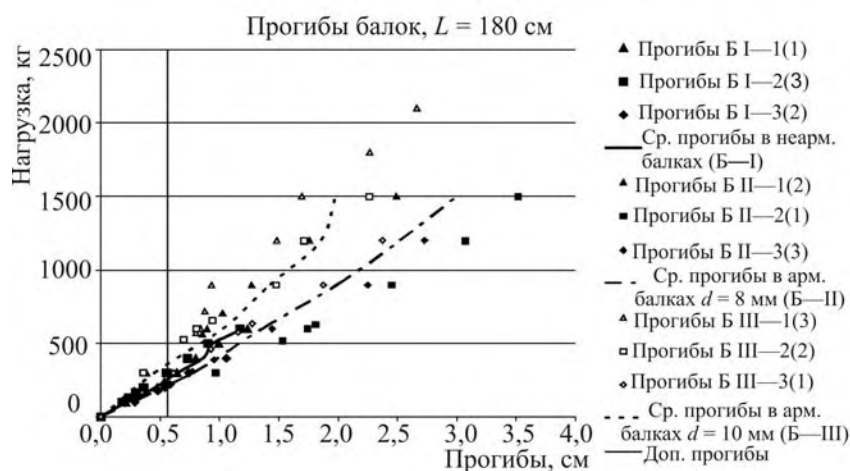


Рис. 2. Зависимость прогибов армированных и неармированных балок

прогибы другой армированной балки из древесины 3-го сорта и высотой сечения 95 см Б II—3(3) совпадают с прогибами неармированной балки из древесины 2-го сорта и высотой сечения $h = 95$ см Б I—3(2), причем вплоть до разрушения Б I—3(2);

в результате испытаний III серии армированных балок с коэффициентом армирования, равным 0,042, при нагрузке 300 кг прогибы балки из древесины 3-го сорта и высотой сечения 115 см Б III—1(3) значительно меньше, чем прогибы в неармированных балках: на 90 % меньше, чем у Б I—3(2), и на 65 % — чем у Б I—1(1). Прогибы балки из древесины 2-го сорта и высотой сечения 105 см Б III—2(2) при нагрузке 300 кг на 80 % меньше, чем у Б I—1(1) и на 107 % — чем у Б I—3(2), а при нагрузке 600 кг разница с прогибами Б I—1(1) составляет 54 %.

На рис. 3 представлены результаты эксперимента в относительных величинах.

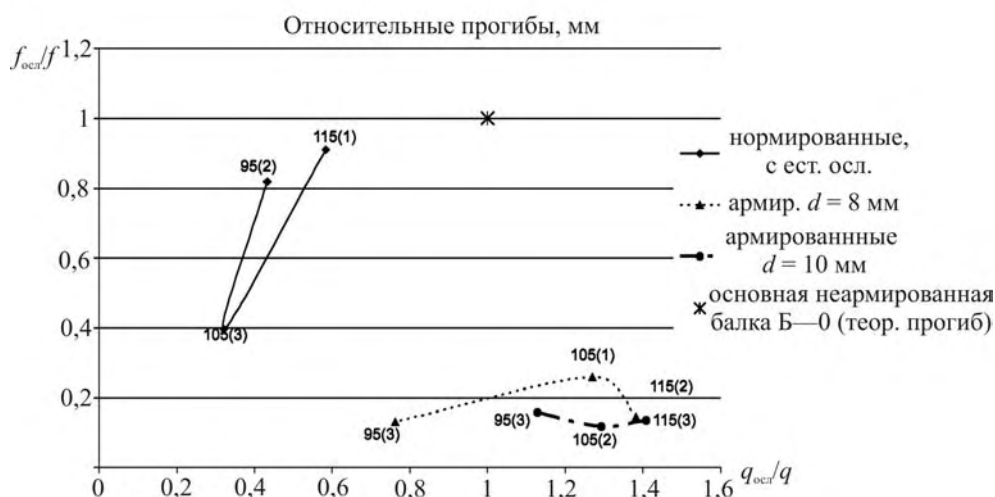


Рис. 3. Зависимость прогибов от нагрузки в относительных величинах

За основу была принята неармированная балка Б—0, с $h = 125$ мм значение прогиба и нормативной нагрузки принято по теоретическим расчетам, данная балка в эксперименте не участвовала. При сравнении прогибов и расчетных нагрузок армированных и неармированных балок необходимо отметить, что значения расчетных нагрузок в среднем больше на 50...55 %, а значения прогибов меньше в 2...2,5 раза.

Экспериментально подтверждено, что при увеличении коэффициента армирования до 0,040...0,045 влияние естественных пороков и ослаблений древесины снижается, а также возможно использование древесины 3-го сорта без увеличения поперечного сечения и снижения нагрузок на конструкцию. Армирование позволяет компенсировать влияние ослабления поперечного сечения конструкции на ее прочность и деформативность. Этот факт позволяет эффективно использовать армированные цельнодеревянные конструкции из древесины 3-го сорта (прогоны и ребра плит покрытий) в строительстве взамен существующих конструкций из пиломатериалов 2-го сорта и дает возможность не только сократить расход древесины, но и снизить стоимость самих конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мастаченко В.Н.* Надежность моделирования строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1974. С. 84.
2. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. М. : Стройиздат, 1983.
3. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций. М. : Стройиздат, 1976. С. 32.

© Христофорова Т.Н., Рощина С.И., 2006

УДК 539.3:539.4

В.В. Кабанин, О.В. Канаева, И.И. Овчинников**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА КИНЕТИКУ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА КРУГЛЫХ ПЛАСТИНОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММАХ НАГРУЖЕНИЯ**

Приведены описание установки, методика проведения и результаты испытаний по исследованию влияния программы нагружения и напряженного состояния на кинетику коррозионного износа круглых пластинок.

The description of installation, technique of experimental investigation and results of tests on researches of influence of the loading program and stressed state on corrosion deterioration of round plates is resulted.

Несмотря на наличие определенного количества экспериментальных данных, нет еще достаточной ясности по вопросу влияния статического плоского и объемного напряженного состояния на скорость коррозии металлов. Для разработки расчетных схем, моделирующих поведение тонкостенных конструкций в коррозионных средах, для их идентификации нужны надежные экспериментальные данные о влиянии вида, уровня, программы изменения напряженного состояния на скорость коррозии. В связи с этим было организовано экспериментальное исследование влияния величины напряжений при плоском напряженном состоянии при упругих и упруго-пластических деформациях на скорость общей коррозии металлов. Для проведения испытаний использовались экспериментальные установки, разработанные в НИИхиммаше, позволяющие испытывать круглые пластинок на чистый изгиб в условиях одностороннего воздействия агрессивной среды. Конструкция установки близка к конструкции, разработанной ранее [1], но более проста и позволяет контролировать напряжения. На рис. 1 представлены схема и общий вид установки. Нагружение осуществляется с помощью винта 1, укрепленного в верхней плите 2, и нажимной втулки 3, опирающейся на пластину 4 и создающей распределенное по ее контуру усилие P . Нагрузка создается вращением винта с помощью гаечного ключа, ее величина контролируется с помощью тензометрической мессдозы вторичным прибором (измерителем статических деформаций ИСД-3). Погонное усилие P определяется выражением $P = F/(2\pi b)$, где F — усилие затяжки болта; b — радиус пластинки.

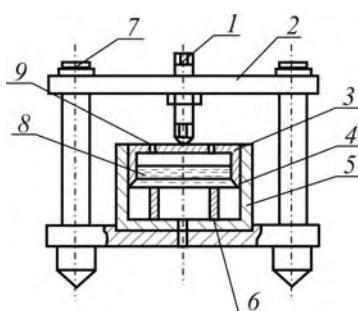


Рис. 1

Образцы, имеющие форму круглых пластин диаметром 150 мм и толщиной 4 мм, изготавливались из стали ВСтЗ и испытывались на чистый изгиб, их растянутая поверхность соприкасалась с коррозионной средой — 6%-ным раствором HNO_3 при 20 °С. Прогиб в центре пластины замерялся с помощью индикатора, напряжения в образцах контролировались с помощью тензорезисторов, наклеенных на неконтактирующую со средой поверхность пластины. Толщина пластины, изменяющаяся в процессе коррозионного износа, контролировалась как методом непосредственного измерения, так и расчетным путем по известным значениям нагрузки $P(t)$ и прогиба $W(t)$.

Установка позволяла исследовать кинетику коррозионного износа при постоянном, а также при изменяющемся во времени по заданной программе уровне напряжения.

При исследовании кинетики коррозионного износа при постоянном уровне напряжений использовалось выражение для прогиба в центре пластины [2]:

$$W = 1,5 \frac{P}{E} \left(\frac{a}{h} \right)^3 \left[(1-\nu)^2 (1-\beta^2) - 2(1-\nu^2) \ln \beta \right] \beta^2,$$

откуда:

$$h = \left\{ 1,5 \frac{P(t)}{W(t)} \frac{a^3}{h} \left[(1-\nu)^2 (1-\beta^2) - 2(1-\nu^2) \ln \beta \right] \beta^2 \right\}^{1/3}, \quad (1)$$

где $P(t), W(t)$ — экспериментально измеренные программы изменения усилия и прогиба; a — радиус опорного контура пластины; h — толщина пластины; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; $\beta = \frac{b}{a}$.

В образцах-пластинах создавались различные по уровню напряжения: 110; 150; 200; 220 и 300 МПа, то есть как ниже, так и выше предела текучести $\sigma_T = 268$ МПа. Постоянство напряжений во времени поддерживалось за счет регулярного изменения нагрузки. Параллельно с напряженными образцами испытывались ненапряженные.

Скорость коррозии определялась весовым методом: по завершении опыта перед определением весовых потерь с образцов удаляли продукты коррозии, измеряли толщину и вес пластин. Продолжительность испытаний — 750 ч. Для оценки степени влияния коррозионной среды на прочностные характеристики материала пластинки проводились дополнительные испытания на разрывной машине.

При испытаниях рассмотрены программы нагружения [3]: а) нагружение до постоянного уровня напряжений ниже предела текучести; б) нагружение до напряжений выше предела текучести (пластины, предварительно нагруженные усилием P_{II} , большим, чем начальное рабочее усилие $P_{\text{раб}}$, разгружались, на них наклеивались тензорезисторы, и затем загружались начальным рабочим усилием); в) так как в процессе изготовления в элементах конструкций могут возникать остаточные деформации, то для выяснения их влияния (точнее влияния наклепа) на скорость коррозии проводили эксперименты, в которых образцы, нагруженные до одинакового уровня напряжений,

имели различную степень наклепа; г) с целью выяснения влияния переменного нагружения на скорость коррозии были поставлены опыты, в которых часть образцов находилась в условия постоянного нагружения, когда напряжения постоянны во времени, а другая часть находилась в условиях переменного нагружения, программа которого представлена на рис. 2.



Рис. 2

Результаты экспериментов сведены в таблицу.

$$\text{Скорость коррозии } V = \frac{\Delta m}{\tau}, \frac{\text{г}}{\text{ч}}$$

$P_n, \text{Н}$	$P_{\text{раб}}, \text{Н}$				
	0	5300	10500	14500	18000
0	0,0116				
6000		0,0242			
11000			0,0265		
15000				0,0265	
19000	0,0175	0,0313	0,0343	0,0349	0,04

Здесь P_n — предварительная нагрузка на образец (с целью его наклепа); $P_{\text{раб}}$ — начальная нагрузка на образец.

Анализ результатов экспериментов показывает:

$$\text{при } \sigma = 0 \quad V = \frac{\Delta m}{\tau} = 8,75 \frac{\text{г}}{\text{мес}} = 0,0116 \frac{\text{г}}{\text{ч}}; ,$$

$$\text{при } \sigma = 110 \text{ МПа } V = \frac{\Delta m}{\tau} = 1,815 \frac{\text{г}}{\text{мес}} = 0,0242 \frac{\text{г}}{\text{ч}}; ,$$

где σ — напряжение в пластинке в зоне чистого изгиба; V — скорость коррозии; Δm — изменение массы пластинки; τ — время опыта ($\tau = 750 \text{ ч}$). Видно, что напряженное состояние заметно влияет на скорость коррозии.

Внутренние микронапряжения распределяются по поверхности пластинки неравномерно. Они концентрируются на границах зерен, скоплениях дислокаций и т.п. Результаты эксперимента свидетельствуют, что наиболее интенсивно коррозия развивается в местах микроконцентраторов напряжений. Это видно на фотографиях: на ненагруженном образце общая коррозия более равномерная (рис. 3), чем на нагруженном (рис. 4).

Скорость коррозии, как показали эксперименты, существенно зависит от величины напряжений I рода:

$$\text{при } \sigma = 1534 \text{ МПа } V = 26,2 \frac{\text{г}}{\text{мес}} = 0,0349 \frac{\text{г}}{\text{ч}};$$

$$\text{при } \sigma = 2200 \text{ МПа } V = 30,1 \frac{\text{г}}{\text{мес}} = 0,04 \frac{\text{г}}{\text{ч}}.$$



Рис. 3



Рис. 4

Эксперименты показали, что скорость коррозии зависит от наклепа образцов: при начальном рабочем усилии $P_{\text{раб}} = 1450$ кГ у образца 1, нагруженного предварительно усилием $P_{\text{п}} = 1500$ кГ, скорость коррозии $V = 0,0265$ г/час, а у образца 2, нагруженного предварительно усилием $P_{\text{п}} = 1900$ кГ, $V = \left(26,2 \frac{\text{г}}{\text{мес}}\right) = 0,0349 \frac{\text{г}}{\text{ч}}$. Также установлено, что скорость коррозии при переменном нагружении больше, чем при одноразовом постоянном нагружении (рис. 5), из-за того что изменяются условия разрушения защитного слоя из продуктов коррозии на поверхности металла.

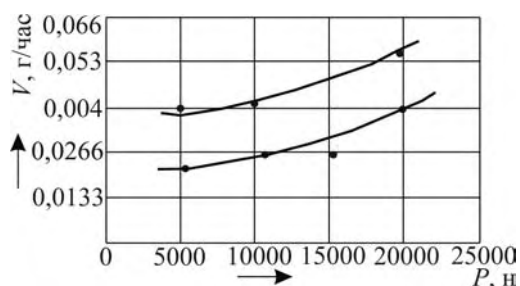


Рис. 5. Влияние величины приложенного начального усилия на скорость коррозии при постоянном нагружении (1) и при переменном нагружении (2)

Выводы. В результате исследований коррозионного износа пластин из стали ВСтЗ при действии 6%-ного раствора азотной кислоты установлено: а) напряженное состояние влияет на скорость коррозии: скорость коррозии в нагруженном образце более чем в 2 раза выше, чем в ненагруженном; б) скорость коррозии зависит от наклепа: с увеличением наклепа увеличивается скорость коррозии; в) скорость коррозии у пластин при малоцикловом нагружении выше, чем у пластин при постоянном нагружении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гутман Э.М. Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа. М. : Недра, 1984. 75 с.
2. Вайнберг Д.В. Расчет пластин / Д.В. Вайнберг, Е.Д. Вайнберг. Киев : Будивельник, 1970. 435 с.
3. Мягова О.В. Экспериментальное исследование влияния коррозии под напряжением на напряженно-деформированное состояние и долговечность конструкций / О.В. Мягова, С.М. Кутепов, И.Г. Овчинников // Экспериментальные методы исследований инженерных сооружений (методы, приборы, оборудование, метрологическое обеспечение): тезисы докл. конф. Новополюк, 1986. С. 156.

© Кабанин В., Канаева О.В., Овчинников И.И., 2006

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 656.11

М.М. Девятов, И.М. Вилкова

О КРИТЕРИЯХ ОЦЕНКИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ КАЧЕСТВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Предложен уточненный систематизированный перечень показателей для оценки потребительских качеств автомобильных дорог с целью обоснования их модернизации.

The authors suggest a more precise, systematic list of criteria of evaluating the consumer quality of highways in order to substantiate their modernization.

Сеть автомобильных дорог нашей страны конструктивно не рассчитана ни на безопасное пользование легковыми автомобилями при существующих и все более возрастающих объемах движения, ни на обеспечение безопасности пешеходов. В целом нормы и правила инженерного обеспечения безопасности движения в отношении всей иерархии дорожной сети низки, лишены четкой детализации и плохо соблюдаются [1].

Значительное отставание уровня развития сети автомобильных дорог от потребностей экономики и населения страны, а также их неудовлетворительное состояние, не отвечающее современным требованиям потребителей транспортных услуг, вызвали необходимость вести речь о модернизации автомобильных дорог. При этом безопасность дорожного движения должна стать центральным элементом модернизации дорожной сети, включающим целый спектр стратегий и мер.

Одним из мероприятий, необходимых для повышения безопасности движения в России, по мнению ЕКМТ [1], является изменение классификации дорожной сети, которое предлагается включить в разрабатываемую в России программу инженерного обеспечения безопасности дорожного движения. Для обеспечения реализации изменений, введенных постановлением Правительства РФ от 11 апреля 2006 г. № 209 [2], на инженерном уровне представляется целесообразным предложить уточненную систему потребительских качеств для обоснования модернизации автодорог.

Модернизация автомобильных дорог, по мнению автора [3], это приспособление сети, отдельных участков или элементов дорог на основании результатов мониторинга к современным условиям эксплуатации, связанным с

изменением функционального назначения дорог, их участков, элементов, или прилегающей зоны, путем проведения комплекса соответствующих мероприятий, корректирующих потребительские качества дорог.

Роль автомобильных дорог, по мнению авторов [4], кроется в многообразии их функций, являющихся основой национального развития страны. При конкретизации их роли, в зависимости от разнообразия функций прилегающих к дороге территорий, можно выделить две ролевые области, которые, с одной стороны, имеют противоречивые функциональные свойства, а с другой — накладываются друг на друга: это транспортная роль и роль дорог как мест общественного пользования. Противоречивость заключается в разной оценке их значения непосредственными активными пользователями дорог и пассивными пользователями — теми, кто проживает в зоне их негативного воздействия на окружающую среду, но вместе с тем пользуется и благами от близкого расположения транспортных артерий. В свою очередь противоречивая роль дорог порождает многообразие их непосредственных функций и потребительских качеств, необходимых для их оценки, что требует их детальной проработки.

Потребительские качества формируются исходя из формулирования определенных целевых установок, исходящих из интересов потребителей. При этом все потребители, как уже отмечалось ранее, могут быть представлены [3] определенными группами, с учетом их мнения должны формулироваться целевые условия (целевой уровень требований к потребительским качествам), т. е. то, какие цели должны достигаться через систему потребительских качеств. Причем эта система потребительских качеств должна иметь конкретный критериальный уровень (перечень критериев) и оценочный (измерительный) уровень (перечень конкретных измерителей (показателей) для оценки критериев потребительских качеств).

Из предложенного понятия и сути процесса модернизации следует, что он может проводиться последовательно на основе постоянно ведущегося мониторинга состояния автомобильных дорог, транспортных условий, безопасности движения, окружающей среды и с учетом общественного мнения. В складывающихся сложных условиях эксплуатации автомобильных дорог под воздействием многообразных факторов и разнообразного влияния дороги на транспортные, экономические и социальные процессы представляется целесообразным разностороннее системное рассмотрение этого вопроса.

Таким образом, должна быть создана четкая система реализации и коррекции потребительских качеств (реализационно-коррекционная система воздействия потребительских качеств) через дорожные условия. Данная система, исходя из описанных принципиальных подходов к ее выбору, должна включать в себя следующие блоки:

- транспортные условия (рис. 1);
- воздействие на окружающую среду (прилегающая зона) (рис. 2);
- экономические условия (экономичность) (рис. 3);
- информационно-эстетические условия (вид уличного пространства) (рис. 4);
- оценку общественного мнения.

В оценочный уровень транспортных потребительских качеств предлагается включать показатели, посредством которых можно оценить: безопасность дорожного движения, качество транспортного процесса для всех его участников, а также возможность подъезда к прилегающим к дороге объектам.



Рис. 1. Оценка транспортных условий движения



Рис. 2. Оценка воздействия транспортного процесса на окружающую среду



Рис. 3. Оценка экономического эффекта



Рис. 4. Оценка воздействия транспортного процесса на вид и состояние улично-го пространства

Оценку безопасности движения на автомобильных дорогах предлагается производить посредством следующих показателей:

- частота возникновения ДТП;
- плотность ДТП;

доля ДТП;
 потери от ДТП;
 участие велосипедистов и пешеходов;
 доля ДТП с участием пешеходов;
 характер изменения скоростей;
 распределение интервалов времени между автомобилями в движении грузового транспорта;
 маршруты движения;
 маневры транспортных средств;
 нарушения правил движения;
 конфликты между транспортными средствами;
 интервалы между транспортными средствами.

Оценка качества транспортного процесса для всех его участников должна проводиться с учетом определения необходимого количества остановок общественного транспорта, качества и комфортности перевозок, поездок и пересадок, а также качества пересечений транспортных потоков.

Достаточность остановок *общественного транспорта* можно оценить с помощью таких показателей, как среднее время ожидания общественного транспорта, с, и зона влияния остановки.

Качество перевозок, совершаемых общественным транспортом, предлагается оценивать посредством следующих показателей:

средняя скорость транспортирования, км/ч;
 средняя коммерческая скорость, км/ч;
 среднее отклонение расписания в часы пик, с;
 частота обслуживания.

Качество пересадок предлагается оценивать средним временем ожидания и качеством парковок и пересадочных пунктов.

Оценить качество транспортного процесса *для грузового транспорта* можно следующим образом: качество поездки оценивается посредством таких показателей, как средняя коммерческая скорость, км/ч, количество остановок, характер изменения скоростей, км/ч на участке пути, и степень загрузки пересечений дорог, %, а качество пересечений транспортных потоков оценивается средним временем ожидания, с, в часы пик.

Качество транспортного процесса *для велосипедного движения* предлагается оценивать с использованием следующих показателей:

качество поездок оценивается средней коммерческой скоростью, км/ч, средним временем ожидания в часы пик, с, и длиной объезда, м;

комфортность поездок оценивается наличием отдельной полосы движения, шириной велосипедной дорожки и соответственно полезной шириной проезжей части, м, а также долей подходящих остановок для велосипедистов на километр;

качество пересечений транспортных потоков — средним временем ожидания в часы пик, с.

Качество транспортного процесса *для пешеходного движения* можно оценить следующим образом:

оценка возможности перехода улицы должна производиться с помощью таких показателей, как количество вспомогательных средств для пересечения дороги, ширина проезжей части, м, а также среднее время ожидания в часы пик, с, и длина обхода, м;

качество движения пешеходов предлагается оценивать посредством оценки полезной ширины тротуара и видов вспомогательных средств для пересечения дорог.

Оценка *возможности подъезда к прилегающим к дороге объектам* может быть проведена с использованием следующих показателей:

перекрытие подъездов к земельным участкам, % в единицу времени;

длина объезда при отсутствии непосредственного подъезда для движения грузового транспорта и соответственно при отсутствии возможности непосредственного пересечения для пешеходов и велосипедистов;

среднее удаление пешеходного перехода от парковки и соответственно места для стоянки автомобилей;

количество и степень загрузки парковок и мест для стоянки: для жителей, кратковременной парковки, долговременной парковки;

количество и степень загрузки мест для стоянки велосипедов;

размеры и степень загрузки погрузо-разгрузочных территорий.

Уровень шумового воздействия можно оценить с использованием следующих предлагаемых показателей:

уровень шума на расстоянии 7,5 м от оси ближайшей полосы движения транспортного потока;

уровень шума в зоне придорожной полосы;

частота звука.

Эти показатели измеряются как для дневных, так и для ночных условий в соответствии с ГОСТ. На уровень шума влияют скорость, интенсивность и состав движения, качество покрытия и уровень организации движения, определяющий режим движения транспортных потоков. Шумовую нагрузку можно снизить, предусматривая при модернизации дорог лучшую организацию движения, направленную на обеспечение равномерного движения транспортного потока, предотвращающую работу двигателей с высокой частотой вращения. Эти потребительские качества могут быть улучшены также путем создания соответствующих шумовых экранов и оформления придорожной полосы.

Уровень загрязнения воздушной среды предлагается оценивать при помощи:

среднесуточной концентрации в воздухе загрязняющих веществ, мг/м^3 ;

максимальной разовой концентрации в воздухе, мг/м^3 ;

интенсивности воздействия, мг/м^3 в единицу времени.

Эти показатели используются для оценки в воздушной среде количества наиболее вредных составляющих выхлопных газов: оксида углерода (CO), оксида азота (NO_x), двуокиси углерода (CO_2), углеводорода (HC), соединений свинца. Кроме того, по этому же показателю оценивается количество пыли в воздушной среде (С).

Уровень загрязнения почвы и уровень вибрации оцениваются посредством следующих показателей:

концентрация вредных веществ в почве (верхний слой толщиной 10...20 см), мг/кг ;

интенсивность накопления вредных веществ в почве, мг/кг в единицу времени. Этот показатель используется в основном для оценки количества чрезвычайно ядовитых соединений свинца;

интенсивность вибрации, характеризуемая ускорением Y , м/с^2 ;

частота вибрации S , Гц.

Эти показатели оцениваются в зоне придорожных зданий и сооружений.

Уровень закрытости прилегающей зоны предлагается оценивать:

по относительной величине территории, имеющей твердое искусственное покрытие, $F_{\text{п}}$, %;

доле инфильтрации атмосферных осадков $Q_{\text{ф}}$, %.

По этим показателям можно судить о возможности впитывания поверхностных вод и уменьшения климатически неблагоприятного разогрева поверхностей.

Уровень озеленения предлагается оценивать:

по объему зеленых насаждений G_v , м^3 , м^2 ;

доля испарения атмосферных осадков $Q_{\text{п}}$, %;

доля озелененных фасадов $G_{\text{ф}}$, %.

Уровень озеленения влияет на микроклимат через создание затененных и защищенных пространств, коагулирования пыли.

Качество воздушной среды наряду с показателями загрязненности предлагается также оценивать:

по относительной влажности воздуха W_v , $\text{кг}/\text{м}^3$;

температуре воздуха в прилегающей зоне T , $^{\circ}\text{C}$.

Транспортные территории предлагается оценивать:

по площади $F_{\text{тр}}$, $\text{м}^2/\text{га}$;

площади территорий по видам движения F_i , $\text{м}^2/\text{вид движения}$.

Проектируя мероприятия по модернизации с расширением занимаемых транспортом территорий необходимо делать сравнительную оценку эффективности использования этих территорий до и после модернизации.

Функциональное распределение и возможности использования территорий под транспортными сооружениями предлагается оценивать:

по поперечному профилю дороги;

скорости движения V , $\text{км}/\text{ч}$;

интенсивности движения N , $\text{авт}/\text{ч}$;

виду и числу пересечений на единицу времени;

уровню социальной направленности.

Для обеспечения социальной направленности транспортных территорий в поперечном профиле дорог высоких категорий должно быть разделение территорий для движения автомобильного транспорта, общественного транспорта, пешеходов, велосипедистов, инвалидов и детских колясок. Пешеходные переходы должны также размечаться с учетом категории дороги (скорость и интенсивность движения) таким образом, чтобы время перехода и время ожидания возможности перехода были минимальными и безопасными.

Уровень качества прилегающей зоны можно оценить:

по размеру, форме и оснащению площадей (территорий) пребывания, м^2 , %;

объему, длительности и многообразию зон пребывания (перед витринами, местами на скамейках и т.д.).

Эти показатели должны характеризовать удобство использования для работающих, находящихся и проживающих в прилегающей к дороге зоне. Например, если прилегающая зона торговая, то она должна обеспечить возможность доставки и разгрузки товаров, удобство подъезда и остановки для покупателей. Если прилегающая зона жилая и домовая, то необходимо иметь ввиду, что транспортная зона — это не только зона для передвижения, но и зона постоянного пребывания людей.

Оценку экономического эффекта предлагается проводить не только на стадии планирования и проектирования дорожного объекта, но и на стадиях строительства новых и функционирования существующих объектов дорожного хозяйства.

При проведении анализа воздействия транспортного процесса на вид и состояние уличного пространства должно учитываться мнение жителей прилегающих территорий и пользователей дорог. Качество информационно-эстетического воздействия транспортного процесса напрямую зависит от своеобразия прилегающей местности, визуально-информационного воздействия и привлекательности дороги.

Здесь речь идет, прежде всего, о возможности ориентирования в пространстве при помощи легко запоминающихся и типичных для данной местности признаков, а также сохранении исторических взаимосвязей посредством выделения определенных элементов обстановки. Исходя из этого важно получить характеристики прилегающей местности и способствовать более четкому ориентированию. Пространственное ориентирование и зонирование дороги должно выполняться в соответствии с застройкой; творческая связь обеих сторон улицы должна быть отчетливой. При проектировании необходимо четкое разделение главных и второстепенных дорог, причем значение главных магистралей в уличной иерархии должно четко выделяться отличными от остальной дорожной сети элементами.

Эффективное проектирование включает самоочевидную, легко понятную пользователям планировку дорог, снижение скорости на определенных территориях и обеспечение равномерности движения, использование противоточных придорожных объектов и внедрение аудита безопасности.

Выбираемые показатели для системы потребительских качеств должны отвечать достижению определенных целей, быть достаточно конкретными, должны описываться четкими значениями или зависимостями, обладать возможностью для мониторингования, иметь определенную направленность на реализацию через конкретные инженерные решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Состояние безопасности движения. Партнерский обзор по стране: Российская Федерация // <http://www.cemt.org/>.
2. О классификации автомобильных дорог в Российской Федерации : постановление правительства РСФСР от 24 декабря 1991 года № 61 (в редакции постановления Правительства РФ от 11 апреля 2006 г. № 209).
3. *Девятков М.М.* О методологических основах проектирования модернизации автомобильных дорог // Проблемы строительства, ремонта, содержания автомобильных дорог Юга РФ и пути их решения : науч.-практ. конф., Волгоградский выставочный центр «Регион», сентябрь 2005. С. 3—9.
4. *Девятков М.М.* О принципах выбора потребительских качеств для обоснования модернизации автомобильных дорог // Вестник ВолгГАСА. Сер. : Стр-во и архит. 2004. Вып. 4(13). С. 45—51.

УДК 625.7

С.В. Алексиков**ОПТИМИЗАЦИЯ СВОДНОГО ГРАФИКА ПОСТАВКИ РЕСУРСОВ
В УСЛОВИЯХ МНОГООБЪЕКТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Предложена математическая модель оптимизации сводного графика поставки ресурсов на строительные объекты в условиях одновременного производства работ.

Development of mathematic model of optimization graph of resource supplement for the construction sites during construction.

Отличительной особенностью практически всех дорожно-строительных работ является их протяженность во времени. Это предъявляет особые требования к эндогенным и экзогенным переменным математической модели, а также параметрам, величина которых переменна во времени. Суммарные затраты в дорожно-строительные материалы, поступающие на строительный объект, формируются в результате взаимодействия внешних и внутренних технико-экономических факторов.

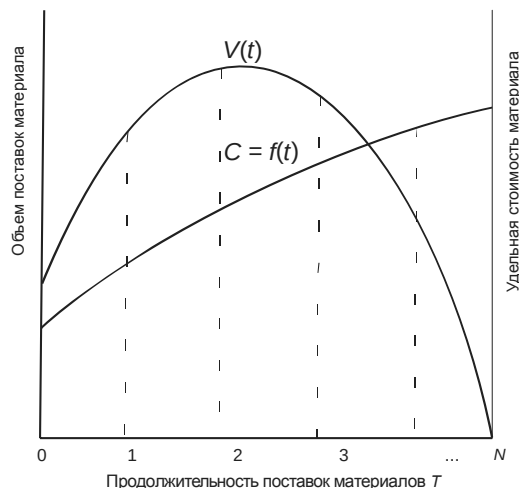
К внешним факторам можно условно отнести стоимость строительных материалов, полуфабрикатов, энергоресурсов, эксплуатации автотранспорта и дорожно-строительных машин, которая носит вероятностный характер и имеет тенденцию роста в течение года. К внутренним факторам можно отнести последовательность и интенсивность потребления производственных ресурсов, которые неустойчивы во времени и претерпевают сезонные изменения вследствие комплексного воздействия природно-климатических условий района строительства, физико-механических свойств перерабатываемых материалов, организации и технологии строительства.

Из сказанного выше следует: модель сводного графика поставки строительных материалов и энергоресурсов на строительный объект должна быть динамической. С другой стороны, она не должна быть слишком сложной, так как это затруднит ее применение на практике и едва ли увеличит точность (учитывая вероятностный характер используемой информации). В качестве целевой функции при оптимизации графика поставки производственных ресурсов на строительный объект следует использовать суммарные затраты на закупку и поставку материалов. Допустим, что информационная матрица, полученная в результате расчета, должна быть составлена с учетом уже имеющегося опыта в соответствующей области. Если обнаруживается «нестыковка», то следует пересмотреть используемую информацию, приблизив ее к реальным условиям.

Рассмотрим математическую модель формирования сводного графика поставки ресурсов на объект на основе графиков поставки всей номенклатуры используемых материалов (рис.).

Пусть X_{ij} — объем поставок i -го материала в j -й период времени, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$; W_j — транспортные ограничения по периодам, определяемые провозной возможностью автотранспорта; $V_i (i = \overline{1, m})$ — плановые суммарные

объемы поставок i -го материала; a_{ij} — ограничения на X_{ij} , связанные с конкретными условиями поставок i -го материала в j -й период времени, определяемые условиями хранения материала на строительном объекте (предприятии) или производственными потребностями технологических процессов.



Расчетная схема оптимизации сводного графика поставок ресурсов

Определение параметров линейной целевой функции (удельная стоимость материалов с учетом транспортных расходов в различные временные периоды t) следует выполнять на основе прогноза стоимости строительных материалов и транспортных услуг на период строительства $C(t)$, что увеличит точность получаемых результатов.

Провозная возможность автотранспорта одинаковой грузоподъемности q за период времени Δt_j определяется по формуле

$$W_j = \Delta t_j A_c q \gamma_c \beta_e V_T / [(L_{ег} + t_{пр} V_T \beta_e) (1 + L_{сс} d_n)], \quad (1)$$

где A_c — число автомобилей, участвующих в транспортном процессе в период Δt_j ; γ_c — коэффициент использования грузоподъемности; β_e — коэффициент использования пробега; V_T — техническая скорость автомобиля, км/ч; $L_{ег}$ — длина ездки с грузом, км; $t_{пр}$ — время на маневрирование, погрузку и разгрузку автомобиля за один цикл, ч; $L_{сс}$ — среднесуточный пробег автомобиля, км; d_n — удельный простой автомобиля в ремонте, обслуживании и по организационным причинам.

Опишем систему ограничений:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n X_{ij} &= V_i, \quad i = \overline{1, m}, \\ a'_{ij} &\leq X_{ij} \leq a''_{ij}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, \\ \sum_{i=1}^m X_{ij} &\leq W_j, \quad j = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (2)$$

Условие $a'_{ij} \leq X_{ij} \leq a''_{ij}$ описывает достаточность поставляемого i -го материала в j -й период времени. Величина $a'_{i,j}$ определяется величиной страхового запаса между очередными поставками материала, $a''_{i,j}$ определяется интенсивностью потребления i -го материала $I_{i,j}$ за расчетный интервал времени Δt_j , рассчитывается по формуле

$$a''_{i,j} = a'_{i,j} + I_{i,j} \Delta t_j. \quad (3)$$

Так как интенсивность потребления ресурсов определяется производительностью ведущих машин, составом и коэффициентом их использования в составе дорожно-строительных отрядов, ограничения $a'_{i,j}$ и $a''_{i,j}$ на $X_{i,j}$ переменны во времени.

Целевой функцией при поиске оптимального решения является минимум затрат в производственные ресурсы, поставляемые на строительный объект в различные моменты времени:

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} X_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\beta'_{ij} \beta''_{ij}} \int_{\beta'_{ij}}^{\beta''_{ij}} f_i^*(t) dt \right) X_{ij} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $\beta'_{i,j}; \beta''_{i,j}$ — пределы интегрирования в j -й период времени; $f_i^*(t)$ — функция общей стоимости i -го материала с учетом затрат на его закупку, транспортировку и хранение.

Решение отыскивается симплекс-методом с помощью электронных таблиц Excel. В результате расчетов формируется двухмерная матрица, состоящая из объемов поставки материалов X_{ij} за дискретный интервал времени Δt_j (табл.).

Матрица сводного графика поставок ресурсов на строительные объекты

	Материалы, поставляемые на строительные объекты X_{ij} , $1 < i < m$					
Сроки поставки материалов на объект с шагом Δt_j , $1 < j < n$	$X_{1,1}$	...	$X_{1,m}$	$\sum X_{1,m}$	W_1	Провозная способность автотранспорта W_j
	$X_{2,1}$	...	$X_{2,m}$	$\sum X_{2,m}$	W_2	
	$X_{3,1}$	...	$X_{3,m}$	$\sum X_{3,m}$	W_3	
	...	...	...	...	...	
	$X_{n,1}$	...	$X_{n,m}$	$\sum X_{n,m}$	W_j	
	$V_{n,1}$	...	$V_{n,m}$	$\sum Q$	$\sum W_j$	

Выполнение условия возможности перевозки всех материалов за весь период времени определяется выражением $\sum Q \leq \sum W_j$.

Предложенная математическая модель оптимизации сводного графика поставки производственных ресурсов позволяет создать предпосылки для минимизации суммарных затрат на поставку строительных материалов, полуфабрикатов и энергоносителей в условиях многообъектного строительства, основана на прогнозе изменения стоимости материалов и услуг в период производства дорожно-строительных работ, провозной способности транспортного звена и интенсивности потребления ресурсов в период строительства.

УДК 624.21.095.3

А.В. Ефанов, И.Г. Овчинников

СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Рассмотрены требования к составу расчета деформационных швов мостов на статические и динамические нагрузки.

In article requirements to static and dynamic designing of expansion joints of bridges are considered.

Деформационные швы (ДШ) автодорожных мостов являются важными элементами мостового полотна, и от их надежности и долговечности зависит надежность и долговечность подавляющего большинства других конструктивных элементов мостового сооружения. Состояние ДШ оказывает большое влияние также на безопасность дорожного движения по мосту.

Такое положение объясняется тем, что в случае повреждения деформационных швов мостов в зоне воздействия агрессивных вод, протекающих с проезжей части сквозь поврежденный ДШ, оказываются и конструкции пролетных строений (а именно, торцы, являющиеся наиболее уязвимой зоной предварительно напряженных железобетонных пролетных строений) и опорные части и опоры, и даже фундаменты опор мостов. Повреждения ДШ вызывают резкое повышение динамических воздействий на конструктивные элементы моста, из которых в наибольшей степени страдает от этого дорожная одежда мостового полотна в зоне примыкания к конструкции ДШ. Разрушения элементов ДШ нередко приводят к авариям, в т.ч. и с тяжелыми последствиями.

Среди причин недостаточной надежности работы ДШ выделяются три группы, связанные:

1) с недостаточным развитием методов расчета ДШ и их конструктивных элементов;

2) неправильной эксплуатацией ДШ;

3) неправильным определением перемещений пролетных строений от действия различных факторов, возникающих на стадии эксплуатации и применением конструкций ДШ, не отвечающим фактическим перемещениям пролетных строений.

Учитывая, что последняя группа причин не связана с самими конструкциями ДШ и является следствием недостаточного понимания специфики пространственной работы пролетных строений [1, 2], а влияние второй может быть снижено с применением конструкций ДШ, не требующих обслуживания [2], обратимся к рассмотрению первой группы причин.

Исследованиями работы ДШ занимался ряд специалистов, из которых наиболее известны труды таких ученых, как W. Köster, F. Tschemmerneegg, D.J. Lee, R.J. Dexter, G. Ramberger и A.R. Price. Среди последних работ можно также отметить исследования группы ученых из Университета штата Вайоминг (В.К. Bramel и другие), посвященные щебеночно-мастичным ДШ, развитие методов расчета которых является на сегодняшний день одним из самых перспективных направлений.

В нашей стране преимущественно развивались направления конструирования различных ДШ, к сожалению, слабо подкрепленные обоснованным расчетом. Наибольшее влияние на развитие отечественных подходов к расчету ДШ оказал В.И. Шестериков. Нельзя не отметить и вклад И.Д. Сахаровой, при участии которой и В.И. Шестерикова был подготовлен единственный в нашей стране документ, описывающий порядок проектирования ДШ мостов [3].

Действующие в настоящее время методические рекомендации по проектированию ДШ [3] вряд ли можно назвать достаточными. Во-первых, подходы к проектированию, использованные в упомянутом документе, морально устарели, они не учитывают наличие новых современных материалов и конструкций, изменившиеся нагрузки и воздействия, а также, по понятным причинам, никак не учитывают огромный опыт эксплуатации ДШ на мостовых сооружениях, накопленный за 26 лет, прошедших с момента выхода данных методических рекомендаций в свет. Такая ситуация сложилась из-за отсутствия должного внимания к ДШ как к ответственному элементу моста, поскольку в нашей стране традиционно бытовало мнение, что ДШ относятся к вспомогательным конструкциям.

Таким образом, возникла необходимость в разработке новых методов расчета ДШ, без чего надежная эксплуатация ДШ и мостовых сооружений в целом не представляется возможной.

Анализируя опыт применения ДШ на отечественных и зарубежных мостовых сооружениях, а также принимая во внимание подходы, используемые за рубежом, можно сформулировать следующие общие принципы. Так, при проектировании ДШ необходимо:

- учитывать усталостную нагрузку на элементы ДШ. Крайне желательно испытывать ДШ на выносливость;

- производить расчет на динамические воздействия. Хорошие результаты могут быть получены с применением математического моделирования поведения ДШ под динамической нагрузкой;

- учитывать возможность механических воздействий на элементы ДШ от снегоуборочных машин, от транспортных средств при их разгоне и торможении на ДШ, от попадающего в зазоры ДШ с поверхности проезжей части (и заклинивающегося там) крупного мусора, а также принимать во внимание нагрузку, возникающую из-за смерзания элементов ДШ;

- иметь в виду возможность деградации материалов под действием солнечного излучения (ультрафиолета), а также бензина, масел и химических средств удаления льда (антиобледенителей), а в случае металлических элементов — учитывать влияние коррозионных процессов;

- учитывать при необходимости сейсмическую нагрузку;

- принимать во внимание при расчетах зависимость механических характеристик материалов от температуры окружающей среды;

- производить расчет продольных элементов ДШ на восприятие температурных напряжений, особенно в мостах большого габарита;

- предусмотреть возможный случай укладки на мостовом полотне дополнительного слоя асфальтобетона, что повлечет за собой появление перепада высот между дорожной одеждой и поверхностью ДШ и приведет к увеличению динамического воздействия на ДШ;

- предусматривать возможность увеличения грузонапряженности и массы транспортных средств в процессе эксплуатации;

предусматривать неизбежный рост колеи на прилегающей дорожной одежде мостового полотна с течением времени, особенно при эксплуатации в условиях высоких интенсивностей движения;

рассчитывать ДШ на монтажные нагрузки.

Кроме отмеченных положений, справедливых в большинстве случаев, необходимо учитывать специфику каждого типа ДШ. Для этого следует предварительно разделить ДШ на группы для того, чтобы в пределах одной группы можно было обоснованно применять те или иные подходы к проектированию. В нашей стране в основу классификации ДШ мостовых сооружений были положены конструктивные особенности этих изделий, и традиционно деление ДШ на группы производилось следующим образом: выделялись группы ДШ, схожие по принципу перекрытия деформационного зазора.

Соответственно группы объединяли [4]: а) ДШ закрытого типа; б) ДШ открытого типа; в) ДШ перекрытого типа; г) ДШ заполненного типа.

В некоторых случаях группу «б» вообще не выделяли, ограничиваясь делением на три группы [3].

Однако к настоящему времени можно выделить несколько в определенной степени независимых групп, объединяющих ДШ, в основу работы которых заложены одни и те же принципы: а) ДШ закрытого типа; б) щебеночно-мастичные ДШ; в) ДШ заполненного типа; г) ДШ перекрытого типа; д) ДШ с упругим компенсатором.

Обоснование приведенной этой классификации дано в [2].

ДШ закрытого типа и щебеночно-мастичные характеризуются тем, что в этих конструкциях перемещения воспринимаются за счет деформирования асфальтобетона или специального материала (щебеночно-мастичной смеси), которым заменяется асфальтобетон над деформационным зазором.

В общем случае расчет массы заполнения щебеночно-мастичного ДШ или участка асфальтобетонного покрытия должен включать решение пространственной задачи с учетом ползучести, проявляемой воспринимающим деформации материалом при положительных температурах и хрупкости — при отрицательных [5]. Однако расчет массы заполнения (асфальтобетона) в части рабочего диапазона температур, в котором данный материал проявляет упругие свойства, можно свести к решению плоской задачи теории упругости. Это становится возможным если принять, что материал является сплошным и однородным. Кроме того, длина щебеночно-мастичного ДШ значительно, в 10 и более раз, превышает другие его габаритные размеры, причем все сечения ДШ по длине, за исключением приближенных к торцам ДШ, находятся в приблизительно одинаковых условиях. Соответственно при температурах, при которых материал становится вязкоупругим, главной целью расчета должен быть учет ползучести материала.

При расчете ДШ закрытого типа и щебеночно-мастичных обязательным условием является учет неоднородности свойств воспринимающего деформации материала, меняющихся по рабочему диапазону температур в зависимости от температуры материала. Зависящим от температуры следует принимать модуль упругости материала (определенный как для однородного материала), а при расчете учитывать, что такие характеристики, как напряжение текучести, предел прочности материала и относительная деформация, соответствующая данным напряжениям, также зависят от его температуры.

Специфичным для щебеночно-мастичных ДШ является то, что в данной конструкции имеется граница раздела щебеночно-мастичной смеси и прилегающего асфальтобетонного покрытия (чего нет в ДШ закрытого типа). Это обстоятельство влечет за собой необходимость контроля напряжений, получаемых при расчете ДШ, на этой границе с тем, чтобы не допустить режима работы ДШ, при котором данные напряжения превысят напряжения отрыва щебеночно-мастичной смеси от поверхности асфальтобетона.

Кроме того, при температурах, близких к нижнему пределу рабочего диапазона температур, материал, воспринимающий перемещения в указанных типах ДШ, может разрушаться даже в отсутствие перемещений пролетных строений. Это происходит из-за значительных температурных напряжений, возникающих в заземленном материале при его охлаждении. Этот расчетный случай имеет место преимущественно при медленном охлаждении материала, когда неравномерностью распределения температур в материале и инерцией можно пренебречь, что позволяет значительно упростить данную задачу термоупругости.

Для обоснованного расчета щебеночно-мастичных ДШ и ДШ закрытого типа необходимо иметь физико-механические характеристики материала заполнения или асфальтобетонного покрытия, экспериментально определенные для различных температур внутри рабочего диапазона. Кроме того, следует определить температуру стеклования материала с целью уточнения нижнего предела рабочего диапазона температур.

ДШ заполненного типа по особенностям работы близки к щебеночно-мастичным ДШ, однако имеются и некоторые характерные моменты, которые необходимо учесть.

ДШ заполненного типа требуют расчета не только материала заполнения (включая проверку прочности зоны примыкания материала заполнения к окаймлению), но и окаймления ДШ, выполняемого из асфальтобетона или полимербетона. При этом определяющими будут динамические нагрузки (удары) колес транспорта о кромки деформационного зазора. Еще одной особенностью является то, что материал заполнения ДШ заполненного типа (в отличие от щебеночно-мастичных ДШ) не работает на восприятие и передачу нагрузок от колес транспортных средств. Однако при этом есть вероятность локального приложения нагрузки на материал заполнения вследствие попадания в зазор мелких камней и их последующего вдавливания в материал, а также локального нагружения окаймления при уменьшении деформационного зазора (при нагреве пролетных строений) с заклинившимся в нем камне.

Из ДШ перекрытого типа в настоящее время применение находят только гребенчатые ДШ. Для гребенчатых ДШ вполне справедливыми можно считать подходы к расчету, принятые в [3], поскольку, как минимум, за последние 20—30 лет, их конструкция никак не изменилась. Однако при расчете гребенчатых ДШ необходимо ориентироваться на изменившиеся нагрузки, а также особенно тщательно рассчитывать анкеровку ДШ, являющуюся, по опыту эксплуатации, одним из наиболее уязвимых элементов ДШ перекрытого типа. Кроме того, необходим расчет элементов ДШ на усталостные нагрузки.

Анкеровка ДШ с упругим компенсатором, представляющих собой наиболее обширную группу из современных ДШ, рассчитывается подобно анкеровке ДШ перекрытого типа. В остальном при расчете следует иметь в виду, что в случае

ДШ с упругим компенсатором имеет место разделение функций между отдельными элементами ДШ. Как правило, ДШ с упругим компенсатором состоят из несущих элементов (обычно стальных балок), гидроизолирующих элементов (к которым относится собственно упругий компенсатор), элементов, регулирующих перемещения модулей ДШ (применяющихся, соответственно, в модульных ДШ). Тем не менее некоторые элементы ДШ могут совмещать в себе несколько функций. В ряде конструкций, например, упругий компенсатор может быть и несущим элементом, воспринимая нагрузки от транспорта (хотя такое решение нельзя признать удачным) [2]. Таким образом, отдельные элементы ДШ следует рассчитывать на нагрузки и воздействия, определяемые в зависимости от выполняемых ДШ функций.

Также необходимо коснуться динамического расчета ДШ. Учет динамических воздействий простейших типов ДШ сводится к учету ударных воздействий либо в зоне перепадов высот, либо на кромках деформационного зазора (если он открыт). В случае сложных конструкций, к которым относятся модульные ДШ средних и больших перемещений, понятие динамического расчета существенно расширяется. В этом случае становится необходимо определять собственные частоты основных элементов (несущих балок и траверс) с целью не допустить работы ДШ в зоне возможного возникновения резонанса элементов ДШ под действием циклически прикладываемой к ним нагрузки [6].

Наконец, для ДШ, имеющих элементы анкеровки, несущие балки, элементы окаймления или регулирующие зазор элементы, необходим расчет указанных элементов на усталость материала. Необходимость такого расчета диктуется, прежде всего, опытом эксплуатации ДШ с упругим компенсатором, преимущественно модульных, на зарубежных мостовых сооружениях. При этом было выявлено, что основной причиной преждевременного выхода из строя этих ДШ является усталостное повреждение элементов ДШ. В связи с этим все сложные конструкции ДШ, производимые за рубежом, испытываются на усталость, прежде чем будут запущены в производство [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шестериков В.И. Определение перемещений концов пролетных строений при проектировании автодорожных мостов // Тр. ГП Росдорнии, НИЦ «Мосты», ОАО ЦНИИС. М. : Информавтодор, 2002. Вып. 12. С. 25—55.
2. Ефанов А.В. Деформационные швы автодорожных мостов: особенности конструкции и работы: учеб. пособие / А.В. Ефанов, И.Г. Овчинников, В.И. Шестериков, В.Н. Макаров. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. 173, [2] с.
3. Методические рекомендации по проектированию и устройству конструкций деформационных швов в автодорожных и городских мостах и путепроводах / Минтранс СССР, Союздорнии. М.: Союздорнии, 1980. 85 с.
4. Шестериков В.И. Деформационные швы в автодорожных мостах / В.И. Шестериков. М. : Транспорт, 1978. 151, [2] с.
5. Bramel, B.K. Asphalt Plug Joints — material characterization and specification / B.K. Bramel, C.W. Dolan, J.A. Puckett, K. Ksaibati; Wyoming Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming. USA, Wyoming, Laramie, 2002. 13 p.
6. Ефанов А.В. Моделирование динамического взаимодействия системы «транспортное средство — деформационный шов автодорожного моста» // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы III Всерос. конф. : в 3-х т. Волгоград : Изд-во ВолгГТУ, 2005. Т. 1. С. 78—82.
7. Köster W. The functioning and operation of the modern modular expansion joint system [Electronic resource] / W. Köster, S. Brown // Rep. on Third World Congress on Joints and Bearings, Toronto, Canada, Oct.–Nov., 1991, 2005. Режим доступа: <http://www.techstar-inc.com/artman/uploads/t1030402.pdf>.

© Ефанов А.В., Овчинников И.Г., 2006

УДК 624.046.5

И.Г. Овчинников, А.В. Межнякова, И.Н. Гришина

СЛУЧАЙНЫЙ ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВ

Рассмотрено нелинейное случайное деформирование элементов конструкций мостов. Предложен алгоритм определения статистических характеристик напряжений и деформаций, возникающих в сечении конструктивного элемента. Приведены результаты численного расчета статистических характеристик деформаций и напряжений железобетонного прямоугольного сечения, полученные с использованием предложенного алгоритма.

The article describes the casual nonlinear deformation of elements bridge constructions. The authors offer the algorithm of definition of the statistical characteristics of deformation and pressure in cross section of the element construction. The results of calculating of statistical characteristics of deformation and pressure, based on the given algorithm, are presented in the paper.

Для расчета железобетонных конструкций мостов длительное время применялся метод предельных состояний, согласно которому исследовалось поведение опасного сечения под действием предельной нагрузки. При использовании этого метода задавался характер эпюры напряжений в бетоне и арматуре, характерные точки которых определялись из одного уравнения равновесия, другое уравнение равновесия сечения (уравнение моментов) использовалось для проверки соответствия несущей способности сечения и момента в сечении от внешних нагрузок. Предельным считалось такое состояние, когда усилия от внешних нагрузок превышали несущую способность сечения. При таком подходе предполагается, что предельное состояние наступает вследствие приложения к нагружаемому элементу опасной нагрузки. Данный подход совершенно не учитывает того факта, что сооружение в большинстве случаев достигает предельного состояния не из-за увеличения нагрузки, а из-за неправильно запроектированных размеров сечения и изменения механических характеристик материалов под влиянием внешней среды. Также возможной причиной наступления предельного состояния может служить разброс механических характеристик материалов.

В методе предельных состояний деформационный расчет практически отделен от прочностного, причем если в прочностном расчете материал предполагается в пластичном состоянии, то в деформационном расчете этот же материал предполагается упругим. В последнее время для расчета железобетонных конструкций активно начинает применяться деформационный подход, согласно которому прочностная и деформационная стороны задачи взаимосвязаны. В данной статье рассматривается совместное применение деформационного подхода и метода Монте-Карло для моделирования напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных конструкций с учетом случайного характера геометрических характеристик сечения, механических характеристик материалов и действующих нагрузок. Метод Монте-Карло основан на статистической обработке реализаций выходных параметров, полученных от случайных реализаций входных параметров путем расчета по детерминированному оператору.

Рассмотрим поведение железобетонного конструктивного элемента, нагруженного произвольной нагрузкой. Модель конструктивного элемента примем в виде балки, нагруженной произвольной нагрузкой (рис. 1). Считаем, что по длине балки l ее сечение не меняется и имеет произвольную форму. От произвольной нагрузки в сечении балки возникают усилия: момент M , продольная сила N , перерезывающая сила Q .

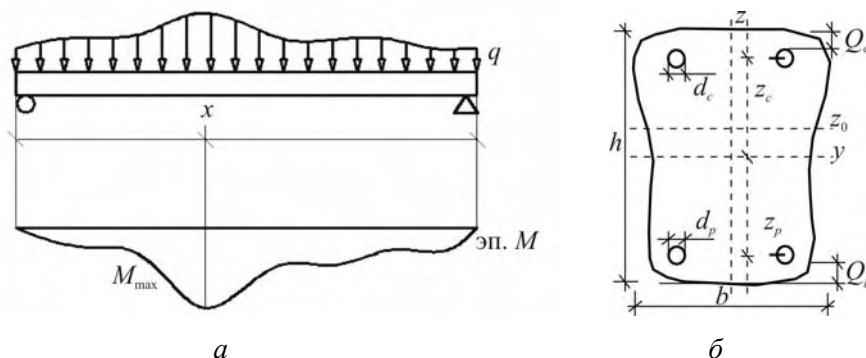


Рис. 1. Расчетная схема балки (а), поперечное сечение балки (б)

Рассмотрим произвольное сечение балки. Принимаются гипотезы об однородности, изотропности и сплошности материалов, деформация бетона равна деформации арматуры, деформирование железобетона описывается с помощью диаграмм деформирования бетона и стали.

Для бетона зависимость напряжений от деформаций принимается нелинейной, разномодульной (рис. 2, а):

$$\begin{aligned} \sigma_c &= A_c \varepsilon - B_c \varepsilon^3 & \sigma > 0, \\ \sigma_p &= A_p \varepsilon - B_p \varepsilon^3 & \sigma < 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где A_c, B_c, A_p, B_p — коэффициенты модели, определяемые по экспериментальным данным соответственно при сжатии и растяжении.

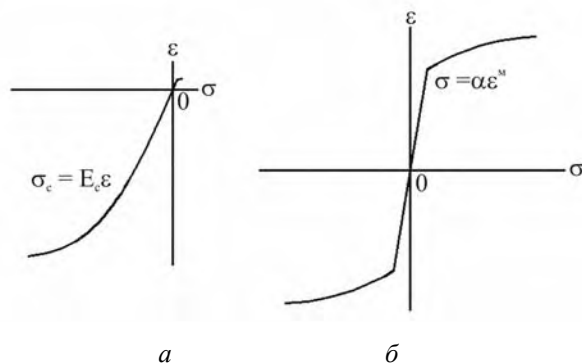


Рис. 2. Диаграммы деформирования бетона (а) и стали (б)

Зависимость напряжений от деформаций, характеризующая диаграмму деформирования стали, принимается нелинейной (рис. 2, б):

$$\sigma = \alpha \varepsilon^m, \quad (2)$$

где α, m — коэффициенты, определяемые из условия наилучшего соответствия зависимости экспериментальным данным.

Для определения напряжений и деформаций необходимо составить два уравнения равновесия сечения (сумму продольных сил (1) и сумму моментов (2)). Для поперечного сечения произвольной формы уравнения будут иметь вид:

$$N + \int_{Abc} \sigma_c^b dA + \int_{Abp} \sigma_p^b dA + \sigma_c^s A_c^s + \sigma_p^s A_p^s = 0, \quad (3)$$

$$M + \int_{Abc} \sigma_c^b z dA + \int_{Abp} \sigma_p^b z dA + \sigma_c^s A_c^s z_c + \sigma_p^s A_p^s z_p = 0, \quad (4)$$

где σ_c^b и σ_p^b — напряжения в бетоне сжатой и растянутой зон сечения; σ_c^s и σ_p^s — напряжения в сжатой и растянутой арматуре; A_c^b и A_p^b — площадь поперечного сечения сжатой и растянутой зон поперечного сечения; A_c^s и A_p^s — площадь поперечного сечения сжатой и растянутой арматуры; z_c , z_p — плечи сжатой и растянутой арматуры относительно оси y .

Для разрешения уравнений равновесия сечения (1) и (2) необходимо задать гипотезу о характере деформирования сечения, в качестве которой принимается гипотеза плоских сечений:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \phi z = \phi(z_0 - z), \quad (5)$$

где ϕ — кривизна изогнутой оси балки; z_0 — координата нейтральной оси балки.

При использовании деформационного подхода решается детерминированная задача, которая не учитывает случайного характера геометрических характеристик сечения, механических характеристик материалов и действующих нагрузок. С применением метода Монте-Карло можно составить алгоритм определения статистических характеристик деформаций и напряжений в сечении железобетонной балки с учетом случайного характера входных параметров. Алгоритм строится на основе решения детерминированной задачи, а также на основе дополнительных данных, характеризующих случайные входные параметры. Случайными принимаются геометрические размеры балки b, h, l , коэффициенты модели деформирования бетона A_c, B_c, A_p, B_p коэффициент модели деформирования арматуры α , действующие момент и продольную силу M, N , толщины защитного слоя a_p, a_c , диаметры арматуры d_p, d_c , предельные напряжения в бетоне R_c, R_p и пределы текучести арматуры на растяжение и сжатие $\sigma_{тр}, \sigma_{тс}$. Принимается, что все случайные параметры статистически независимы, и колебания размеров поперечного сечения происходят симметрично относительно его геометрического центра. Для всех случайных параметров примем нормальный закон распределения, с плотностью распределения:

$$p(x) = (1/S[X]\sqrt{2\pi}) \exp \left[-(x - M[X])^2 / 2(S[X])^2 \right]. \quad (6)$$

Как видно, нормальный закон распределения задается двумя статистическими характеристиками для каждого случайного параметра X : математическое ожидание обозначим $M[X]$, среднеквадратичное отклонение $S[X]$, они связаны между собой коэффициентом вариации:

$$V_X = S[X]/M[X]. \quad (7)$$

Дисперсия случайного параметра определяется выражением

$$D[X] = (S[X])^2. \quad (8)$$

Например, для случайного коэффициента модели деформирования арматуры α статистические характеристики будут выглядеть следующим образом: $M[\alpha]$, $S[\alpha]$, $D[\alpha]$, V_α .

Для моделирования статистических характеристик выходных параметров методом Монте-Карло [2] проводится большое количество испытаний n . Каждое испытание (i) состоит из нескольких этапов. На 1-м этапе моделируются реализации параметров, принятых случайными:

$$b_i, h_i, l_i, A_{ci}, B_{ci}, A_{pi}, B_{pi}, R_{ci}, R_{pi}, \sigma_{tpi}, \sigma_{tci}, \alpha_i, M_i, N_i, a_{pi}, a_{ci}, d_{pi}, d_{ci}, \quad (9)$$

где индекс i означает причастность к i -му испытанию.

Случайные числа параметра X с нормальным распределением реализуются с помощью модифицированного генератора случайных чисел (в пределах $[M[X] - 3S[X]; M[X] + 3S[X]]$), в который встроен стандартный генератор случайных чисел, выдающий числа с равномерным распределением.

На 2-м этапе для смоделированных реализаций данных проводят расчет по детерминированному оператору. Согласно гипотезе плоских сечений деформации в сечении балки зависят от двух неизвестных: кривизны изогнутой оси балки ϕ и координаты нейтральной оси балки z_0 , следовательно, на данном этапе необходимо сначала решить систему интегральных уравнений (3) и (4) с подстановкой (1), (2), (5) относительно этих неизвестных. В результате решения системы уравнений (3) и (4) получим параметры z_{0i}, ϕ_i , что позволяет перейти к расчету деформаций и напряжений в сечении конструктивного элемента. Для функций случайных величин $\varepsilon(z_0, \phi, z)$, и $\sigma_c(A_c, B_c, \varepsilon_c)$, $\sigma_p(A_p, B_p, \varepsilon_p)$, $\sigma_{ap}(\alpha, \varepsilon)$, описывающих эпюры деформаций и напряжений, непрерывные переменные z можно заменить на дискретные z_j с некоторым шагом s :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{0i} - \phi_i z_j = \phi_i (z_{0i} - z_j), \quad (10)$$

$$\sigma_{cij} = A_{ci} \varepsilon_{ij} - B_{ci} \varepsilon_{ij}^3, \quad (11)$$

$$\sigma_{pij} = A_{pi} \varepsilon_{ij} - B_{pi} \varepsilon_{ij}^3, \quad (12)$$

$$\sigma_{ij}^{ap} = \alpha_i \varepsilon_{ij}^m. \quad (13)$$

Вычисленные в i -м испытании случайные значения выходных параметров сохраняются в одномерные (например, для координаты нейтральной оси балки z_{0i} и кривизны изогнутой оси балки ϕ_i) или двумерные (для деформаций ε_{ij} и напряжений σ_{cij} , σ_{pij} , σ_{ij}^{ap} в сечении) массивы.

По окончании заданного количества испытаний (n), начинается статистическая обработка выходных случайных параметров — 3-й этап. В предположении нормального распределения выходных параметров для их описания достаточно знать математическое ожидание и дисперсию. Математические ожидания, дисперсии, среднеквадратичные отклонения, коэффициенты вариации случайных параметров, заключенных в одномерные массивы $X_i[1:n]$, при большом числе испытаний можно найти по формулам:

$$M[X] = \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) / n, \quad (14)$$

$$D[X] = \left(\sum_{i=1}^n M[X] - X_i \right) / (n-1), \quad (15)$$

$$S[X] = \sqrt{D[X]}, \quad (16)$$

$$V_X = S[X] / M[X]. \quad (17)$$

Массивы напряжений и деформаций будут иметь вид: $\varepsilon_{ij}[1:n; 1:k]$, $\sigma_{ij}[1:n; 1:k]$. Выражения для статистических характеристик напряжений и деформаций в произвольных сечениях эпюр $z_j[1:k]$ будут аналогичны (14) (15), (16), (17):

$$M[\varepsilon_j] = \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_{ij} \right) / n, \quad (18)$$

$$D[\varepsilon_j] = \left(\sum_{i=1}^n M[\varepsilon_j] - \varepsilon_{ij} \right) / (n-1), \quad (19)$$

$$S[\varepsilon_j] = \sqrt{D[\varepsilon_j]}, \quad (20)$$

$$V\varepsilon_j = S[\varepsilon_j] / M[\varepsilon_j], \quad (21)$$

$$M[\sigma_j] = \left(\sum_{i=1}^n \sigma_{ij} \right) / n, \quad (22)$$

$$D[\sigma_j] = \left(\sum_{i=1}^n M[\sigma_j] - \sigma_{ij} \right) / (n-1), \quad (23)$$

$$S[\sigma_j] = \sqrt{D[\sigma_j]}, \quad (24)$$

$$V\sigma_j = S[\sigma_j] / M[\sigma_j]. \quad (25)$$

Вычисленные статистические характеристики позволяют определить доверительные интервалы в любом сечении эпюр случайных деформаций и напряжений $z_j[1:k]$, а также построить доверительные интервалы предельных деформаций и напряжений. Запишем доверительные интервалы для случайных функций деформаций и напряжений:

$$[M[\varepsilon(z)] - 3S[\varepsilon(z)]; M[\varepsilon(z)] + 3S[\varepsilon(z)]], \quad (26)$$

$$\left[M[\sigma_{ap}(z)] - 3S[\sigma_{ap}(z)]; M[\sigma_{ap}(z)] + 3S[\sigma_{ap}(z)] \right], \quad (27)$$

$$\left[M[\sigma_p(z < z_0)] - 3S[\sigma_p(z < z_0)]; M[\sigma_p(z < z_0)] + 3S[\sigma_p(z < z_0)] \right], \quad (28)$$

$$\left[M[\sigma_c(z > z_0)] - 3S[\sigma_c(z > z_0)]; M[\sigma_c(z > z_0)] + 3S[\sigma_c(z > z_0)] \right]. \quad (29)$$

Таким образом, в композиции случайных эпюр напряжений от нагрузки и случайного предельного напряжения можно определить надежность железобетонного сечения в начальный момент времени, воспользовавшись известным выражением вероятности безопасной работы конструктивного элемента:

$$P(\sigma(z) - R > 0). \quad (30)$$

По описанной методике был проведен численный эксперимент по расчету статистических характеристик деформаций и напряжений в сечении железобетонной балки, загруженной равномерно распределенной нагрузкой. Поперечное сечение по длине было принято неизменным. Исходные данные приведены в табл. 1. Постоянной была принята длина балки $l = 3$ м. Деформирование бетона было принято линейным (по закону Гука) с коэффициентами деформирования бетона на растяжение и сжатие E_p, E_c , деформирование стали — нелинейное. Диаметр арматуры d и толщина защитного слоя a в растянутой и сжатой зонах были приняты одинаковыми.

Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики исходных случайных параметров

Случайный параметр X	Ед. изм. $[X]$	$M[X]$	$S[X]$	V_X
E_p	МПа	22410	2911	0,13
E_c	МПа	32820	4263	0,13
b	м	0,3	0,003	0,01
h	м	0,4	0,004	0,01
α	МПа	890	26,7	0,03
d	м	0,01	0,00001	0,001
a	м	0,03	0,0036	0,12
q	кН/м	10	1	0,1
$M_{\max}$	кН · м	11,25	1,125	0,1

Общие схемы полученных случайных эпюр деформаций и напряжений, показанные на рис. 2, дополняются табл. 2.

На рис. 2 видно, что с приближением математических ожиданий (сплошная линия) функций к нулевым значениям уменьшается доверительный интервал случайной функции (штриховые линии), как следствие увеличивается коэффициент вариации. Слева на рис. 2, a показаны некоторые сечения z_j на оси z , для которых в табл. 2 приведены значения статистических характеристик деформаций и напряжений. На рис. 2, a показана плотность вероятности деформаций $p(\varepsilon_j)$ в сечении z_j при нормальном распределении. Плотность вероятностей для напряжений в растянутой арматуре $p(\sigma_p^s)$ изображена на рис. 2, b , здесь также дополнительно показана разница доверительных интервалов на примере двух плотностей вероятностей напряжений $p(\sigma_{p,n}^b)$ и $p(\sigma_{p,m}^b)$ в сечениях z_n и z_m .

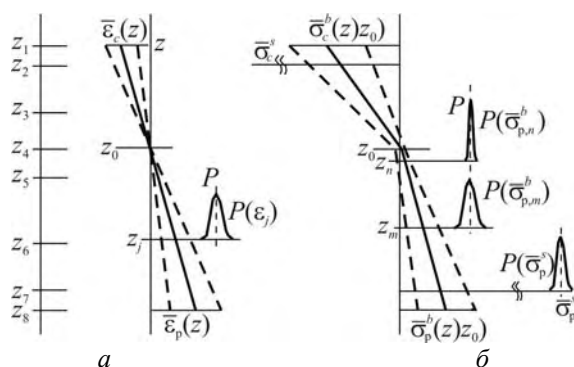


Рис. 2. Схемы случайных эпюр деформаций (а) и напряжений (б)

Т а б л и ц а 2

Статистические характеристики деформаций и напряжений в сечениях z_j

z_j	$M[\varepsilon] \cdot 10^{-3}$	$S[\varepsilon] \cdot 10^{-3}$	$V\varepsilon$	$M[\sigma], \text{ МПа}$	$S[\sigma], \text{ МПа}$	$v\sigma$
z_1	-0,0842	0,0165	0,196	-2,76	0,571	0,207
z_2	-0,0744	0,0157	0,211	-266	59,318	0,223
z_3	-0,0377	0,0089	0,237	-0,124	0,031	0,254
z_4	0	—	—	0	—	—
z_5	0,0088	0,0051	0,586	0,197	0,117	0,596
z_6	0,0553	0,0129	0,234	1,238	0,311	0,251
z_7	0,0926	0,0193	0,209	274	60,006	0,219
z_8	0,1048	0,0203	0,194	2,28	0,461	0,202

На основе полученных результатов можно сделать вывод об эффективности разработанного (на основе деформационного метода расчета строительных конструкций) метода оценки статистик параметров, характеризующих поведение конструктивного элемента. Результаты проведенного эксперимента также показали, что деформации и напряжения, возникающие в сечении конструктивного элемента от нагрузки имеют значительный разброс, и это необходимо учитывать в расчетах элементов мостовых конструкций, применяя теорию надежности. Одним из достоинств метода статистических испытаний (Монте-Карло) является то, что он позволяет использовать любые законы распределения входных случайных параметров. Этот метод особенно эффективен для нелинейных систем, например, при нелинейном описании диаграммы деформирования бетона, в то время как аналитическое решение для нелинейных систем случайных величин удастся получить только в частных случаях. Применение метода Монте-Карло в моделировании случайного деформирования элементов мостовых конструкций открывает большие перспективы для стохастического анализа деформирования конструктивных элементов и определения их характеристик надежности в зависимости от времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинников И.Г. Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред / И.Г. Овчинников, В.В. Раткин, А.А. Землянский. Саратов : Изд-во СГТУ, 2000. 232 с.
3. Межнякова А.В. Оценка надежности железобетонных элементов конструкций мостовых сооружений / А.В. Межнякова, И.Г. Овчинников, В.А. Пшеничкина. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 67 с.

© Овчинников И.Г., Межнякова А.В., Гришина И.Н., 2006

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.05:658.512.6

Г.С. Филин

ОБ ОДНОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ГРУППЫ ОБЪЕКТОВ

Предложена модель календарного плана (КП) возведения группы объектов строительства. Разработана методика расчета КП в рабочих днях с привязкой рабочих дней к календарю. Предложенное формализовано в программный комплекс «Расписание».

The paper presents a model of a schedule for the erection of a group of constructional objects. It shows a method to calculate the schedule in working days which corresponds to the current calendar. The suggested idea is realized in the software complex "Raspisanie" ("Schedule").

Большинство строительных организаций возводят сразу несколько объектов, что требует обоснованного плана подрядных работ.

Оперативность — это сегодня главное требование к процессу составления плана, и решению этой проблемы во многом поможет применение программы «Расписание».

В программе «Расписание» возможна оперативная разработка оптимального плана подрядных работ сразу до 10 объектов, которые объединяются в один календарный план производства группы (множества) объектов (КПГО). Модель такого календарного плана представлена на рис. 1.

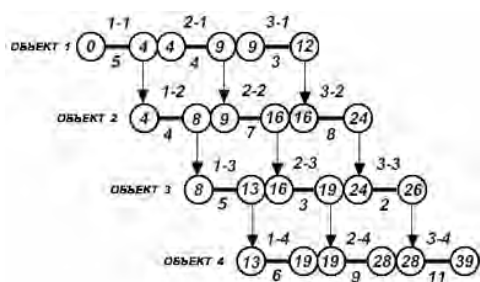


Рис. 1. Календарный план производства множества (группы) объектов (КПГО) в форме ориентированного графа

В КПГО (см. рис. 1) четыре объекта. Он напоминает сетевой график. Это вызвано тем, что и сетевой график и КПГО являются с математической точки зрения ориентированными графами. На самом деле это разные модели: сетевой график — модель производства одного объекта; КПГО — модель производства группы объектов, и она имеет свои отношения порядка и формулы расчета (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Свод правил расчета календарного плана группы (множества) объектов

Правило 1	Окончание i -го этапа K_{ij} равно началу i -го этапа N_{ij} плюс продолжительность этапа P_{ij} : $K_{ij} = N_{ij} + P_{ij}$
Правило 2	Начало последующего i -го этапа $N_{i+1,j}$ равно большему из двух окончаний предшествующих этапов: K_{ij} и $K_{i+1,j-1}$
Правило 3	Начало последующего этапа $N_{i+1,j}$ с учетом совмещения с предшествующим этапом равно окончанию предшествующего этапа K_{ij} минус совмещение $C_{i+1,j}$ последующего этапа: $N_{i+1,j} = K_{ij} - C_{i+1,j}$; если $P_{i+1,j} > P_{ij}$, то $C_{i+1,j} < P_{ij}$ или если $P_{i+1,j} < P_{ij}$, то $C_{i+1,j} < P_{i+1,j}$
Правило 4	Простои времени образуются между двумя одноименными этапами, т.е. первым, вторым, третьим и т.д. Простой этапа $R_{i,j-1}$ равен началу N_{ij} минус окончание $K_{i,j-1}$: $R_{i,j-1} = N_{ij} - K_{i,j-1}$
Правило 5	Построение КПГО в масштабе времени осуществляется по данным о началах этапа, сначала всех первых, затем всех вторых

Для изложения новой методологии календарного планирования группы объектов введем основные понятия.

Понятие «объект». Под объектом понимается предмет труда с длительным производственным циклом (превышающим 1 месяц), технология изготовления которого предполагает, что объект собирается (монтируется) из отдельных конструктивных блоков, частей, агрегатов и т.п., которые устанавливаются отдельными специализированными группами работников (бригадами).

Каждый объект имеет свою топологию, под которой понимается последовательность исполнения этапов данного объекта.

Понятие «этап». В системе оперативного календарного планирования комплекс работ, исполняемый специализированной группой, обозначен словом «Этап».

Этапы производства объекта характеризуются несколькими параметрами: временем исполнения (продолжительностью), трудоемкостью, затратами на оплату труда, стоимостью, численностью исполнителей.

Пользователь должен учитывать, что число этапов по всем объектам должно быть одинаковым. Если работы по этапу отсутствуют, то в базе данных по данному этапу данного объекта проставляются нули. Этапы могут быть совмещены во времени.

Понятие «топология объекта». Под топологией объекта (изделия) понимается тщательно разработанное технологической службой фирмы-подрядчика графическое изображение последовательности сборки по этапам объекта.

Сложность разработки топологии определяется необходимостью учитывать конструктивные, технологические и организационные условия производства.

Разработка топологии объектов — новая функция, которая, по мнению авторов, должна быть передана ПТО.

В процессе разработки КПГО должны быть обеспечены два требования:

1) последовательное исполнение этапов, принадлежащих отдельному объекту, тем самым обеспечивается соблюдение необходимой технологической последовательности;

2) последовательное исполнение одноименных (относимых к одному исполнителю) этапов, принадлежащих разным объектам, тем самым обеспечивается поточность работы исполнителей.

Топологии всех объектов объединяются в КПО вручную или с помощью ЭВМ.

Понятие «совмещение этапов». Совмещение этапов означает их параллельное или последовательно-параллельное исполнение, т.е. две-три бригады исполнителей некоторое время работают на объекте одновременно.

Практика введения совмещения этапов способствует большей адаптации КПО к реальной ситуации.

Совмещение возможно только для последующего этапа с предыдущим одного и того же объекта. Совмещение назначается специалистами и вводится в базу данных.

Совмещение процессов во времени является важнейшим фактором управления, владение которым позволяет менеджменту организации значительно сокращать продолжительность производства отдельных объектов, а, следовательно, всего множества объектов, находящихся одновременно в стадии производства.

Понятие «простой» группы (бригады). Простой возможен только по одноименным этапам разных объектов.

Простой времени образуются между одноименными этапами: между первыми, вторыми и т.д.

Понятие «ожидание» вводится для этапов, по которым ожидается задержка начала производством.

Нахождение оптимального календарного плана происходит автоматически с применением программного продукта «Программный комплекс управления производством множества объектов „Расписание“», на который Роспатентом авторам выдано свидетельство.

Программа находит оптимальное расписание (очередность) возведения группы объектов, т.е. оптимальный календарный план с указанием календарных дат начал и окончаний этапов и объектов. Получение таких данных другими методами, например, вручную, невозможно.

В ПК «Расписание» предусмотрен специальный механизм, позволяющий отключать оптимизацию КПО. Это означает, что компьютер выполняет расчет временных параметров производства объектов строительства в той очередности, которая установлена пользователем. А это может быть любая последовательность (расписание), либо та, которая с учетом заключенных договоров и существующих условий более всего устраивает руководство строительной организации.

Программный комплекс предназначен для высшего и среднего менеджмента для оперативного планирования, управления и контроля за одновременным исполнением организацией (фирмой) множества (группы) объектов.

В большинстве случаев ПК «Расписание», являясь более автоматизированной системой, может быть применен для получения оптимальных показателей и их использования в системе технико-экономического планирования как базовых.

Таким образом, применение компьютерного моделирования, в частности ПК «Расписание» создает основу для организации планирования, управления

и контроля поточной сборки объектов на новой методологической и методической основе и получения пользователем значимой экономической выгоды без привлечения дополнительных ресурсов.

Применение ПК «Расписание» для планирования подрядной деятельности позволяет:

а) оперативное составление проекта месячного плана работ и соответствующих заданий бригадам и подразделениям за несколько дней (2...4 дня) до наступления очередного календарного месяца. Моделируя ситуацию, можно получить вариант календарного плана на каждую группу объектов, объединенных в соответствии с интересами и задачами организации;

б) ПК может применяться параллельно с действующей в организации системой планирования, дополняя ее.

в) ПК ведет расчет, начиная с любой даты календаря, и выдает на печать даты начал и окончаний отдельных этапов (комплексов работ, выполняемых отдельной бригадой); даты начал и окончаний отдельных объектов;

г) готовые объекты исключаются из расчета, одновременно в расчет вводятся новые объекты, процесс планирования становится непрерывным, опережающим по времени и научно-обоснованным;

з) применение ПК «Расписание» позволит поднять методику планирования подрядной деятельности на новый уровень, отвечающий современным требованиям, что для пользователя предотвратит ошибочные действия и уменьшит число неиспользованных возможностей.

В настоящее время разработано три версии программного продукта «Расписание»: демонстрационная, учебная, производственная.

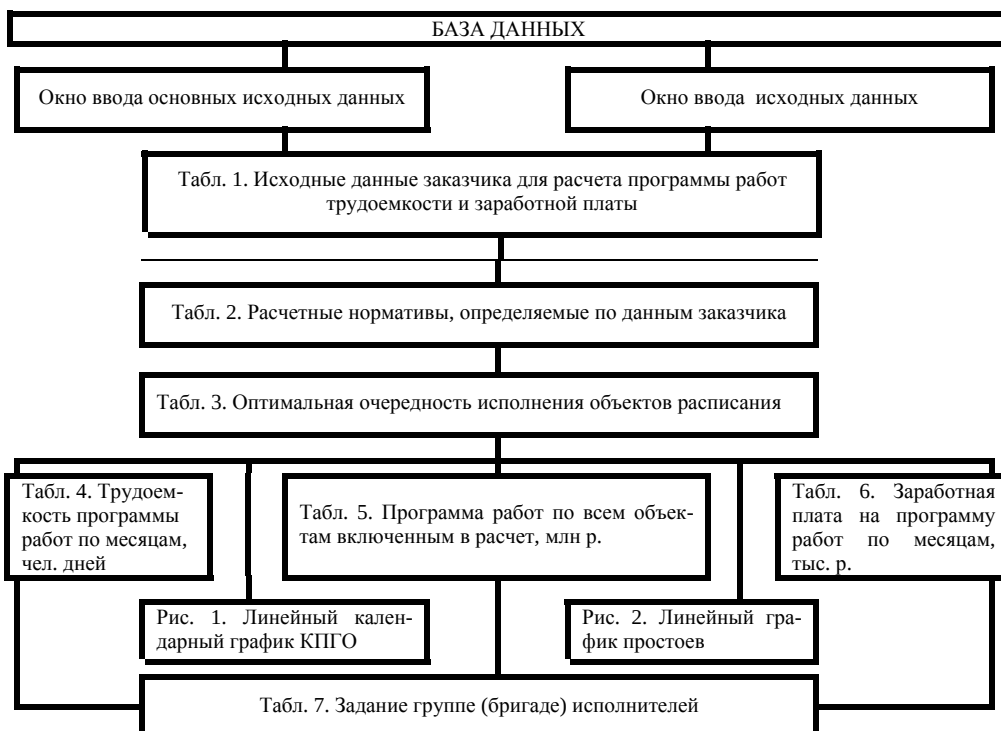


Рис. 2. Принципиальная схема системы календарного планирования (СКП)

Главное достоинство программного комплекса в том, что он позволяет учесть фактическое состояние исполнения объектов, т.е. фактически выполненный объем работ по этапам и по объектам в любой текущий момент времени.

Так происходит постоянно: объект с большей степенью готовности как бы «всплывает» (в результате последовательных расчетов) к первой строке — в зависимости от уровня готовности объекты в очередности могут меняться.

Поскольку расчет и выдача нового КПО (с учетом данных о выполнении) происходит мгновенно, то КПО могут быть предложены «к столу» оперативного совещания, и быть той важнейшей информацией, которая послужит для принятия на совещании оперативных и тактических решений.

Таким образом, процесс учета фактического исполнения этапов с применением ЭВМ и автоматизации расчетов КПО становится непрерывным, а значит и управление производством множества объектов также становится непрерывным. По мере выполнения объекты продвигаются к первой строке и будучи выполненными исключаются из КПО, а снизу в это время в состав КПО включаются новые объекты.

В программном комплексе «Расписание» используются показатели: стоимости и трудоемкости, определяемые при составлении локальных смет, т.е., которые всегда имеются в строительной организации. Показатели дневной заработной платы устанавливаются строительной организацией самостоятельно.

Программа выдает 7 таблиц и 2 графика с данными, для получения которых на сегодня иных методов не существует.

Приведем в качестве иллюстрации графики (рис. 3 и 4). Наглядность изображения процесса календарного планирования позволяет их обзирать на оперативном совещании и в оперативном порядке определять плановые задания менеджменту строительной организации.

Т а б л и ц а 2

Исходные данные заказчика для расчета программы работ, трудоемкости и заработной платы

№ объекта	Описание этапа	№ этапа	Стоимость работ млн. руб.	Остаток стоимости работ		Загрты труда Чел.-дн.	Дневная заработан- ная плата руб./чел.-день	Заработанная плата тыс. руб.	Фамилия бригадира	Число рабочих в бри- гаде человек	Совмещение дни
				%	млн. руб.						
1	Школа										
	Подзем. часть	1	1.64	100	1.64	230	400.00	92.00	А	10	0
	Надзем. часть	2	4.81	100	4.81	382	400.00	152.80	Б	25	0
	Кров. работы	3	3.03	100	3.03	370	400.00	148.00	В	8	0
	Сантехработы	4	2.54	100	2.54	146	400.00	58.40	Г	7	0
2	Отдел. работы	5	2.87	100	2.87	498	400.00	199.20	Д	20	0
	Общежитие										
	Подзем. часть	1	2.11	100	2.12 1	186	400.00	74.40	А	10	0
	Надзем. часть	2	6.20	100	6.20	488	400.00	195.20	Б	25	0
	Кров. работы	3	0.90	100	0.90	215	400.00	86.00	В	8	0
	Сантехработы	4	1.84	100	1.84	257	400.00	102.80	Г	7	0
	Отдел. работы	5	3.89	100	3.89	680	400.00	272.00	Д	20	0

Окончание табл. 2

№ объекта	Описание этапа	№ этапа	Стоимость работ млн. руб.	Остаток стоимости работ		Загрязн. труда Чел.-дн.	Дневная заработан- ная плата руб./чел.-день	Заработанная плата тыс. руб.	Фамилия бригадира	Число рабочих в бри- гаде человек	Совмещение дни
				%	млн. руб.						
3	Бытов. помещ.										
	Подзем. часть	1	1.19	100	1.19	71	400.00	28.40	А	10	0
	Надзем. часть	2	19.04	100	19.04	1466	400.00	586.40	Б	25	0
	Кров. работы	3	1.51	100	1.51	201	400.00	80.40	В	8	0
	Сантехработы	4	1.21	100	1.21	197	400.00	78.80	Г	7	0
4	Отдел. работы	5	4.99	100	4.99	1088	400.00	435.20	Д	20	0
	Общежитие										
	Подзем. часть	1	2.50	100	2.50	298	400.00	119.20	А	10	0
	Надзем. часть	2	6.97	100	6.97	630	400.00	252.00	Б	25	0
	Кров. работы	3	0.59	100	0.59	121	400.00	48.40	В	8	0
	Сантехработы	4	0.41	100	0.41	136	400.00	54.40	Г	7	0
	Отдел. работы	5	1.03	100	1.03	277	400.00	110.80	Д	20	0

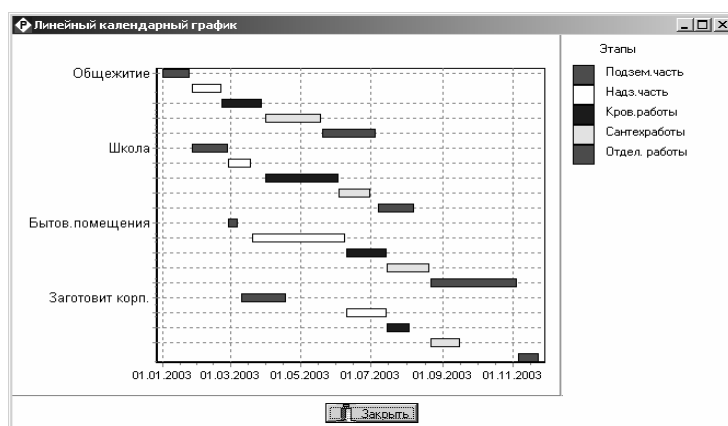


Рис. 3. Оптимальный календарный план строительства группы из 4 объектов

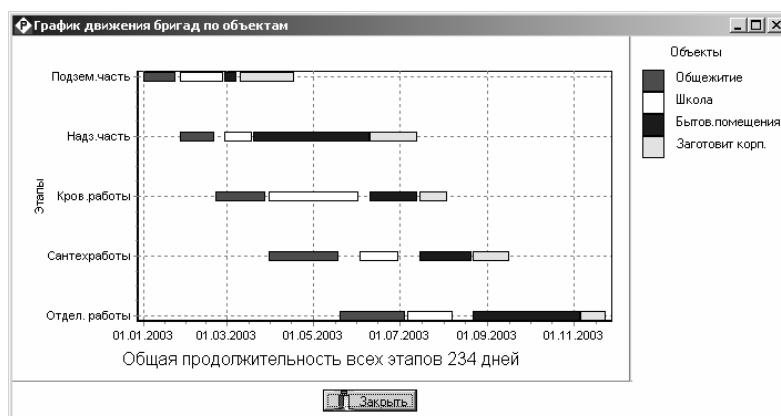


Рис. 4. Оптимальный график движения бригад по объектам

Т а б л и ц а 3

Оптимальная очередность исполнения объектов. Оптимальная очередность возведения объектов 2-1-3-4 при минимальной продолжительности 234

Описание этапа	№ этапа	Фамилия бригади- ра	Продолжительн. дни	Совмещения дни	Календарный месяц и дата		Рабочие дни по порядку		Простой дни
					начала	окончания	начала	окончания	
Общежитие									
Подзем. часть	1	А	18	0	01.01.03	24.01.03	1	18	0
Надзем. часть	2	Б	19	0	27.01.03	20.02.03	19	37	0
Кров. работы	3	В	26	0	21.02.03	28.02.03	38	63	0
Сантехработы	4	Г	36	0	31.03.03	19.05.03	64	99	0
Отдел. работы	5	Д	34	0	20.05.03	04.07.03	100	133	0
Школа									
Подзем. часть	1	А	23	0	27.01.03	26.02.03	19	41	0
Надзем. часть	2	Б	15	0	27.02.03	19.03.03	42	56	4
Кров. работы	3	В	46	0	31.03.03	02.06.03	64	109	0
Сантехработы	4	Г	20	0	03.06.03	30.02.03	110	129	10
Отдел. работы	5	Д	24	0	07.07.03	07.08.03	134	157	0
Бытов. помещ.									
Подзем. часть	1	А	7	0	27.02.03	07.03.03	42	48	0
Надзем. часть	2	Б	58	0	20.03.03	09.06.03	57	114	0
Кров. работы	3	В	25	0	10.06.03	14.07.03	115	139	5
Сантехработы	4	Г	28	0	15.07.03	21.08.03	140	167	10
Отдел. работы	5	Д	54	0	22.08.03	05.11.03	168	221	10
Общежитие									
Подзем. часть	1	А	29	0	10.03.03	17.04.03	49	77	0
Надзем. часть	2	Б	25	0	10.06.03	14.07.03	115	139	0
Кров. работы	3	В	15	0	15.07.03	04.08.03	140	154	0
Сантехработы	4	Г	19	0	22.08.03	17.09.03	168	186	0
Отдел. работы	5	Д	13	0	06.11.03	24.11.03	222	234	0

Выводы. 1. Предложена модель календарного плана строительства группы объектов и методика расчета его временных параметров.

2. Разработана программа «Расписание» позволяющая автоматизировать процесс планирования подрядных работ для группы объектов.

3. Применение программы «Расписание» — методическая основа для организации планирования, управления и контроля строительства группы объектов с применением информационной технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филин Г.С. Об одном методе расчета линейного календарного плана производства множества объектов. Самара, 2002. Деп. ВИНТИ РАН 29.08.2002 г. №1525-В.
2. Филин Г.С. Оперативная разработка программы подрядных работ, оперативное планирование, управление и контроль возведения группы объектов строительства : метод. указ. для менеджмента строит. орг. по применению программы для ЭВМ «Программный комплекс управления производством множества объектов «Расписание»» / Г.С. Филин, М.С. Стенгач. Самара, 2004. Деп. ФГУП ВНИИТПИ ГОССТРОЯ РФ 29.08.2004. № 11952. Первая редакция.
3. Филин Г.С. Планирование, управление и контроль строительства группы объектов с применением программного комплекса «Расписание» / Г.С. Филин, М.С. Стенгач // Актуальные проблемы современного строительства : тез. докл. междунар. науч.-практ. Конференции, 11—15 апреля 2005 г. Ч. 2. Пенза : ПГУАС, 2005.
4. Филин Г.С. Оптимальное календарное планирование производства группы объектов в строительстве // Известия вузов. Серия «Строительство». 2005. № 3.

© Филин Г.С., 2006

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 539.375 + 666.974.2

Т.К. Акчурин, А.В. Ушаков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЖАРСТОЙКИХ БЕТОНОВ НА ГЛИНОЗЕМИСТОМ ЦЕМЕНТЕ

Приведены результаты исследований характеристик вязкости разрушения жаростойких бетонов на глиноземистом цементе по полным диаграммам деформирования образцов при трехточечном изгибе $R(f)$. Исследования проводились с выделением полных диаграмм упругого $R_e(f)$ и диссипативного $R_d(f)$ сопротивлений с помощью метода аналитического определения направления линий разгрузки на стадии, соответствующей восходящей ветви диаграммы $R(f)$.

In the article the results of researches of fracture toughness characteristics of heat resisting concrete on a calcium aluminate cement under full diagrams $R(f)$ of deformation of samples at three-point bending test are presented. Researches were done with excretion of full diagrams of elastic $R_e(f)$ and dissipative $R_d(f)$ resistances with the help of a method of analytical definition of a direction of lines of unloading at a stage corresponding to the ascending branch of diagram $R(f)$.

Составы исследованных жаростойких бетонов на глиноземистом цементе (табл. 1) используются при строительстве теплотехнических сооружений и соответствуют требованиям «Инструкции по технологии приготовления жаростойких бетонов (СН 156-79)». При исследовании применялись методики, предложенные в [1, 2, 3, 4, 5].

Т а б л и ц а 1

Расход материалов на 1 м³ жаростойкого бетона на глиноземистом цементе (ЖБГ)

Вязущее	Шамотный песок	Шамотный щебень	Вода
1	2,14	2,14	0,5

Полные диаграммы деформирования жаростойкого бетона на глиноземистом цементе (ЖБГ) изменяются в результате воздействия высоких температур (рис. 1). Однако существенное различие заключается в том, что с повышением температуры нагрева по мере удаления влаги, в т.ч. химически связанной, диаграммы деформирования бетона на портландцементе изменяются плавно, последовательно [1], в то время как для жаростойкого бетона на глиноземистом цементе резкое изменение диаграмм наблюдается после нагрева бетона при 105 °С, а затем с повышением температуры наступает стабилизация структуры ЖБГ.

Благодаря поэтапному вычислению упругого $R_e(f)$ и диссипативного $R_d(f)$ сопротивлений ЖБГ можно видеть характер изменения свойств бетона при на-

гревании. Так резкий спад диаграммы $R_y(f)$ у образца из ЖБГ, не подвергнутого нагреванию (рис. 2), говорит о быстром начальном прорастании одной трещины непосредственно после окончания линейной стадии деформирования. Однако наличие достаточно большой площадки на диаграмме $R_y(f)$ после незначительного спада явно указывает на торможение этой трещины и развитие одной или нескольких дополнительных трещин. В самом деле, увеличение деформаций f без увеличения упругого сопротивления $R_y(f)$ возможно только за счет одновременного раскрытия нескольких трещин, что, в свою очередь, может иметь место только в случае торможения начальной трещины.

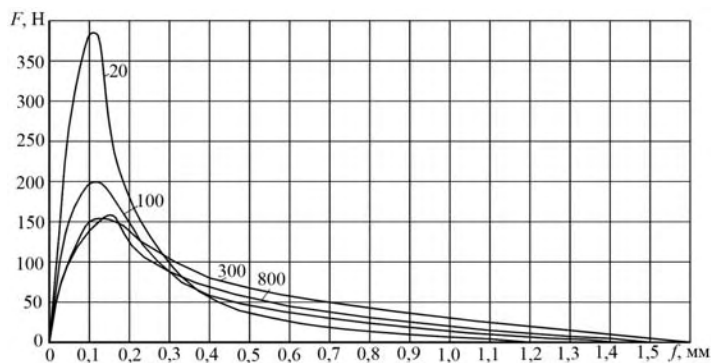


Рис. 1. Влияние нагрева на изменение полных диаграмм изгиба жаростойкого бетона на глиноземистом цементе с шамотными заполнителями: 1 — 20 °C; 2 — 105 °C; 3 — 300 °C; 4 — 800 °C; F — сила; f — прогиб

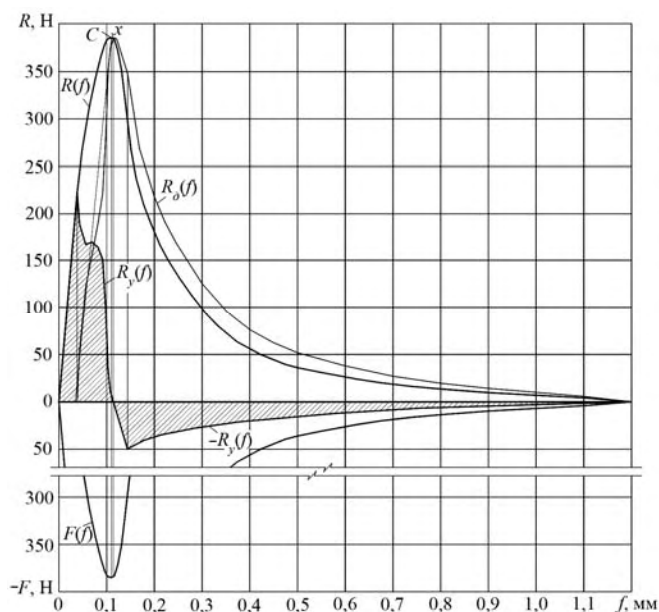
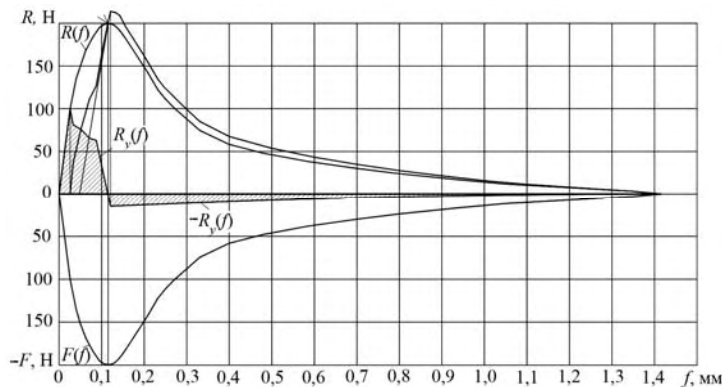
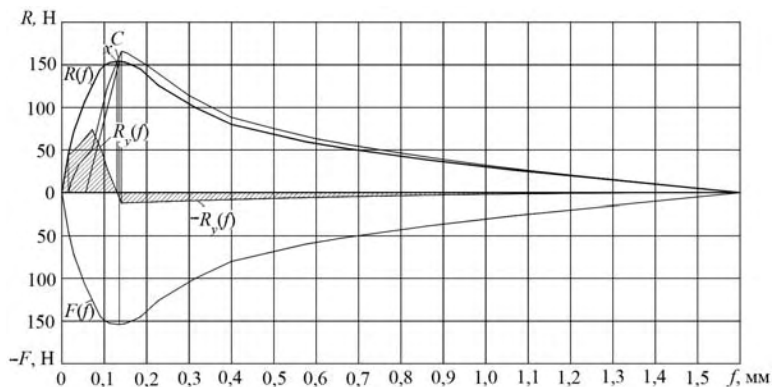
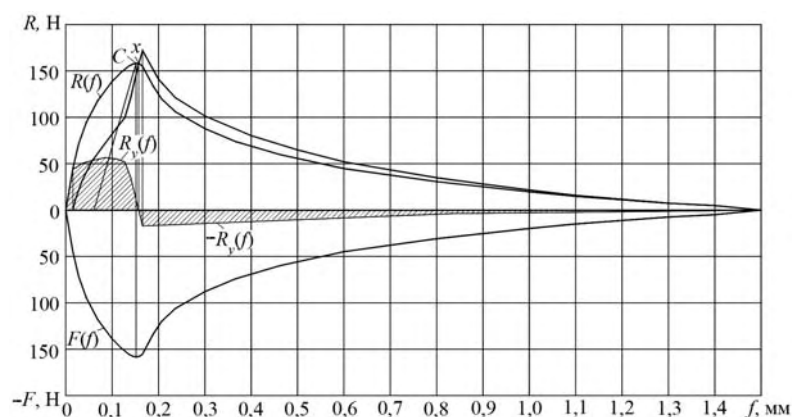


Рис. 2. Поэтапное вычисление соотношений упругой и диссипированной энергий по полной диаграмме изгиба жаростойкого бетона на глиноземистом цементе с шамотными заполнителями при $t = 20$ °C: $R(f)$ — общее сопротивление образца; $R_y(f)$ — упругое сопротивление образца; $R_o(f)$ — диссипативное сопротивление образца; $F(f)$ — усилие машины; f — прогиб

Такой характер деформирования образца из ЖБГ, не подвергшегося нагреванию, указывает на его существенно большую начальную трещиноватость в сравнении с ЖБП, а также более ярко выраженную способность к торможению развивающихся трещин.

С повышением температуры нагревания до 105 °С снижается общая несущая способность образца из ЖБГ, однако характер кривой $R_v(f)$, фактически не изменяется. При дальнейшем повышении температуры нагревания до 300 °С несущая способность образца снижается незначительно, а при повышении температуры от 300 до 800 °С практически не снижается. Однако характер кривой $R_v(f)$ изменяется существенно. При температуре 300 °С ее подъем плавный, но имеется явно выраженный пик при деформациях, соответствующих примерно 80 % предельной нагрузки на восходящей ветви $R(f)$. При повышении температуры до 800 °С подъем кривой $R_v(f)$ более пологий, чем при 300 °С, при этом пик отсутствует и в целом кривая приобретает форму, близкую к трапеции, площадь которой превышает площадь под кривой $R_v(f)$ при 300 °С. Представляется, что изменение характера кривой $R_v(f)$ ЖБГ при нагревании от 20 до 105 °С и далее до 800 °С вызвано объединением пор с образованием множественных начальных трещин, которые, однако, не становятся сквозными, благодаря чему сохраняется способность материала к их торможению. В то же время можно предположить, что при дальнейшем повышении температуры образца до 1000...1200 °С кривые $R(f)$ и $R_v(f)$ образцов из ЖБГ станут похожими на кривые $R(f)$ и $R_v(f)$ для образцов из ЖБП.

Рис. 3. То же, что на рис. 2, при $t = 105$ °СРис. 4. То же, что на рис. 2, при $t = 300$ °С

Рис. 5. То же, что на рис. 2, при $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$

Установлено, что на фоне значительного снижения прочности и особенно модуля упругости, удельная энергия разрушения G_f после нагрева образцов из ЖБГ в интервале температур $20\ldots 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ изменяется незначительно (табл. 2.), что характерно для долговечных материалов за счет их высокого сопротивления развитию трещин в процессе разрушения бетона. Силовой критерий K_{1C} с повышением температуры постепенно снижается и после нагрева при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 45,5 % от начальной величины.

Т а б л и ц а 2

Влияние нагрева на изменение параметров трещиностойкости, прочности и модуля упругости жаростойкого бетона на глиноземистом цементе

Тем- пература, $^{\circ}\text{C}$	R_{btf} , МПа	$E \cdot 10^3$, МПа	G_f , Дж/м ²	K_{1C} , МПа	$U_{общ}$, Дж	U_y , Дж	$\frac{U_y}{U_{общ}}$, %
20	5,31	27,56	65,21	1,34	8,75	1,47	16,80
105	3,03	13,17	63,7	0,91	7,21	0,67	9,25
300	2,31	8,02	72,24	0,76	8,55	0,58	6,79
800	2,16	6,52	57,75	0,61	7,06	0,71	10,12

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушаков А.В. Анализ результатов испытаний жаропрочного бетона на портландцементе на трещиностойкость с использованием усовершенствованных методик / А.В. Ушаков, В.В. Губин, Т.К. Акчуринов // «Региональные технологические и экономико-социальные проблемы развития строительного комплекса Волгоградской области. Наука. Практика. Образование» мат. II науч.-техн. конф. Волгоград, 2005. Ч. 1. С. 15—21.

© Акчуринов Т.К., Ушаков А.В., 2006

УДК 625.855.3

А.А. Котляревский, С.А. Королев, В.В. Вовко, Т.К. Акчурун

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТА И СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ПРИМЕРЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА

Приведена методика оценки эффективности использования разработанных составов модифицированных битумных вяжущих, учитывающая качественные показатели технологии литого асфальтобетона.

The presented technique of an estimation of efficiency of use of the developed structures modified bitumen knitting considering quality indicators of technology cast asphalt concrete.

Дороги — визитная карточка страны, одна из основ ее экономической жизни. Эффективная работа транспорта — необходимое условие успешного развития всех без исключения отраслей народно хозяйственного комплекса. Низкое качество асфальтобетонных покрытий и ремонтных работ оборачивается не только увеличением эксплуатационных расходов и снижением срока службы транспортных средств, но и ростом числа аварий, ущерб от которых измеряется не только деньгами.

В настоящее время необходимы новые методы оценки эффективности и качества ремонтно-строительных работ, т.к. ныне существующие не в полной мере учитывают факторы, влияющие на производство и эксплуатацию автомобильных дорог. Кроме того, традиционный асфальтобетон ГОСТ 9128-97 уже исчерпал свои возможности. Автомагистрали работают в режиме перегрузки. Они не выдерживают сегодняшней интенсивности движения, насыщенной грузонапряженности, знакопеременных нагрузок, возникающих от частых остановок и разгона транспорта при движении автомобиля в режиме «городского цикла». В результате асфальтобетонные покрытия из традиционных укатываемых смесей не выдерживают более 2-3 лет эксплуатации. В связи с этим поиск более эффективных видов асфальтобетонных смесей является несомненно актуальной задачей. Так, большой эффективностью отличается литой асфальтобетон на основе полимербитумного вяжущего, предназначенный для грузонапряженных магистралей с интенсивностью движения более 7000 транспортных единиц в сутки, обладающий высокой устойчивостью к перепадам температур и уникальный по своим физико-механическим показателям [1].

Литой асфальт является разновидностью горячих асфальтобетонных смесей и отличается от других аналогов тем, что все межзерновые поры в нем заполнены асфальтовым вяжущим веществом. При этом отношение Б/П несколько больше, чем в вяжущем веществе обычного асфальтобетона. После укладки массы и ее уплотнения в монолите практически отсутствуют остаточные поры и пустоты, поэтому покрытия из него более водонепроницаемые.

На кафедре СМиСТ ВолгГАСУ нами разработаны оптимальные составы модифицированных битумных вяжущих с улучшенными физико-механическими и физико-химическими свойствами с использованием отходов производства поликапроамида.

В результате модификации битумного вяжущего олигокапроамидом и олигомерами циклического и линейного строения в битуме происходят структурные и фазовые превращения в битуме, что подтверждается проведенными исследованиями физико-механических свойств, определением кинематической вязкости и методом ИК-спектроскопии.

Установлено, что приготовление литых асфальтобетонных смесей на модифицированном битуме приводит к улучшению показателей качества литого асфальтобетона: повышается тепло- и морозостойкость; увеличивается износостойкость и долговечность, кроме того, снижается расход битумного вяжущего на 15...20 %.

Основным документом, позволяющим оценить состояние автомобильных дорог, определить цели и задачи дорожной отрасли, установить методику и порядок диагностики, а также порядок использования результатов оценки для принятия оптимальных управленческих решений на стадии планирования и оценки эффективности дорожно-ремонтных работ на сегодняшний день является ОДН 218.0.006-2002 «Правила диагностики и оценки состояния, автомобильных дорог. Основные положения». Оценку транспортно-эксплуатационного состояния дороги осуществляют по степени соответствия установленным для соответствующих категорий дорог нормативным требованиям основных транспортно-эксплуатационных показателей дороги, принятых за ее потребительские свойства, таких как: обеспеченная дорогой скорость, непрерывность, удобство и безопасность движения, пропускная способность, способность пропускать автомобили и автопоезда с осевой нагрузкой и общей массой.

Конечным результатом оценки является обобщенный показатель качества и состояния дороги P_d , включающий в себя комплексный показатель транспортно-эксплуатационного состояния дороги KP_d , показатель инженерного оборудования и обустройства $K_{об}$ и показатель уровня эксплуатационного содержания $K_э$:

$$P_d = KP_d \cdot K_{об} \cdot K_э.$$

Показатели P_d , KP_d , $K_{об}$, $K_э$ являются критериями оценки качества и состояния дороги. Их нормативные значения для каждой категории принимают в соответствии с действующими нормативно-техническими документами.

В зависимости от целей и задач оценки она может быть выполнена как по обобщенному показателю качества и состояния, так и отдельно по комплексному показателю транспортно-эксплуатационного состояния, показателю инженерного оборудования и обустройства или по показателю уровня эксплуатационного содержания.

Оценку качества дороги в момент сдачи в эксплуатацию после строительства, реконструкции или ремонта, также как и эксплуатируемой дороги, выполняют по результатам объективной оценки и измерения фактических параметров и характеристик дороги [2].

Предлагаемая нами методика оценки эффективности использования разработанных составов модифицированных битумных вяжущих учитывает качественные показатели технологии литого асфальтобетона при производстве ремонтно-строительных работ еще на стадии рабочего проекта и позволяет

оценить экономическую эффективность и целесообразность применения различных модификаторов битумного вяжущего.

$$\mathcal{E} = \left(\sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{I(t, t_0) \cdot \prod_{q=1}^t (1 + E_q)} - \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{I(t, t_0) \cdot \prod_{q=1}^t (1 + E_q)} \right) \cdot k,$$

где R_t — результаты, полученные в год t ; $I(t, t_0)$ — индекс инфляции в году t по сравнению с годом t_0 ; Z_t — текущие затраты в год t ; K_t — единовременные затраты в год t ; E_q — норма дисконта; k — комплексный коэффициент качества.

Комплексный коэффициент качества определяется по формуле:

$$k = \prod_{i=1}^n \frac{x_i}{x_i^{\text{норм}}},$$

где x_i — значение i -го показателя качества; $x_i^{\text{норм}}$ — нормативное значение i -го показателя качества.

Превосходство в качестве дорожного покрытия реально приводит к увеличению прибыли дорожно-эксплуатационных предприятий (служб). На увеличение прибыли воздействуют два фактора: 1) удовлетворенность потребителей более высоким качеством производства ремонтно-строительных работ, вследствие чего дорожное предприятие имеет возможность выиграть тендерные торги; 2) снижение затрат на производство из-за отсутствия дефектов, и, следовательно, уменьшение затрат на их доработку [3].

Таким образом, при использовании новых более качественных технологий для ремонта и строительства автомобильных дорог (таких, как технология литого асфальтобетона), увеличивается эффективность работы не только дорожного предприятия, но и всего народного хозяйства, так как дорожная отрасль является одной из наиболее ресурсоемких отраслей в России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гохман Л.М. Почему битумы, отвечающие требованиям ГОСТ 22245–90, не соответствуют требованиям условий эксплуатации асфальтобетонных покрытий / Транспорт России. Главная тема. 2005. Июнь.
2. ОДН 218.0.006-2002 «Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. Основные положения» от 3 октября 2002 г. Н ИС-840-р.
3. Ребрин Ю.И. Управление качеством : учебное пособие. Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2004.

© Котляревский А.А., Королев С.А., Вовко В.В., Акчурин Т.К., 2006

УДК 625.855

Ю.И. Калгин

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ХОЛОДНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО БИТУМНО-ПОЛИМЕРНОГО ВЯЖУЩЕГО В ДОРОЖНОМ ПОКРЫТИИ

Приведены результаты исследований влияния полимерных добавок на усталостную долговечность холодного асфальтобетона.

The paper presents the results of investigating the influence of polymer additives on the endurance life of cold asphalt concrete.

Широко применяемые в настоящее время при устройстве дорожных покрытий горячие асфальтобетонные смеси на вязких нефтяных битумах являются источником загрязнения окружающей среды. Приготовление, транспортировка, укладка горячих асфальтобетонных смесей сопряжены со значительными материальными затратами. Необходимо всевозможными путями стремиться к снижению температур приготовления и укладки асфальтобетонных смесей без ухудшения их физико-механических характеристик. Будущее за асфальтобетонными смесями, способными обеспечить требуемые транспортно-эксплуатационные характеристики дорожных покрытий, но при этом укладываемыми в холодном виде.

Повышение прочности и долговечности холодных асфальтобетонных смесей имеет большое народнохозяйственное значение и связано с улучшением качества применяемых жидких битумов. Традиционные жидкие битумы, получаемые путем разжижения вязкого битума различными растворителями, характеризуются недостаточными физико-механическими показателями и не могут обеспечить необходимый уровень качества холодного асфальтобетона.

Радикальным способом повышения качества применяемых жидких битумов является их модификация полимерными добавками. Такими полимерными материалами, способными повысить качество холодных смесей на основе жидкого нефтяного битума, являются синтетические каучуки и блоксополимеры типа СБС. Макромолекулы указанных полимеров характеризуются склонностью к ассоциации, что позволяет при определенном содержании образовывать пространственную структурную сетку в вяжущем.

Ранее проведенными исследованиями [1, 2, 3] доказано коренное улучшение физико-механических свойств холодных асфальтобетонных смесей на основе жидких битумов, полученных разжижением вязких битумов растворами полимеров. Неисследованным до настоящего времени являлось влияние полимеров на усталостную долговечность холодного асфальтобетона.

Известно, что процессы разрушения асфальтобетона в дорожном покрытии под многократным воздействием автотранспорта определяются явлениями усталости, т.е. постепенного снижения прочности материала во времени [4].

Важнейшим вопросом при выборе пути повышения долговечности холодного асфальтобетона в покрытии является учет закономерностей процессов развития деформаций в условиях непрерывно изменяющихся

эксплуатационных факторов. Асфальтобетон в покрытии работает в сложном напряженном состоянии. Поэтому при оценке усталостной долговечности следует рассматривать те воздействия, которые имеют место в процессе работы асфальтобетона, и при этом в режиме, наиболее близком к реальным эксплуатационным условиям. Так, по данным А.В. Руденского [4, 5], режимом испытания асфальтобетона, наиболее близко имитирующим реальные условия работы материала в условиях воздействия на покрытие автотранспортной нагрузки, является испытание на усталость при циклическом динамическом изгибе.

Известно, что чем больше действующие напряжения, тем быстрее протекают процессы разрушения. Таким образом, при заданном напряжении усталость асфальтобетона определяет время, в течение которого покрытие может выдерживать заданное напряжение без разрушения. Соответственно, динамическую усталость при циклически действующих нагрузках определяют числом циклов, которое выдерживает материал до разрушения.

Наиболее близка реальным эксплуатационным дорожным условиям частота испытания, равная 868 мин^{-1} , так как расчетная продолжительность одного цикла действия нагрузки в этом режиме составляет около 0,02 секунды, что соответствует режиму нагружения дорожного покрытия при проезде автомобиля со скоростью 60 км /ч.

Усталостные характеристики холодного асфальтобетона устанавливались путем воздействия циклически прилагаемой нагрузки на асфальтобетонные образцы — балочки размером $16 \times 4 \times 2,5$ см — в режиме постоянной амплитуды прогиба. Всего исследования были проведены при трех различных амплитудах прогиба: 0,23, 0,35 и 0,50 мм.

Испытания проводились при 20°C на специально сконструированном стенде на базе флексометра ФР-2. При указанной температуре определялись значения усталостной долговечности образцов — призм — с последующим расчетом коэффициента усталости.

Коэффициент усталости определяли по формуле

$$m = K \cdot P \cdot lq e \cdot (lq e - P \cdot lqt_0)^{-1}, \quad (1)$$

где m — коэффициент усталости; P — показатель пластичности холодного асфальтобетона; K — коэффициент, характеризующий особенности состава асфальтобетона и условия его работы в покрытии; t_0 — длительность цикла нагружения; e — основание натурального логарифма.

Для проведения испытаний были приготовлены образцы холодного асфальтобетона типа Б_х одинакового гранулометрического состава, но на основе различных вяжущих. Всего было приготовлено и испытано три холодных асфальтобетонных смеси: одна контрольная, на разжиженном керосином исходном битуме марки БНД 60/90; остальные — смеси, модифицированные синтетическим каучуком типа СКС-30 АРКМ 15 и термоэластопластом типа ДСТ 30-01. Содержание полимера в вяжущем составляло 4 % в пересчете на сухое вещество. Физико-механические показатели модифицированных жидких битумов и разжиженного исходного битума приведены в табл. 1.

Показатели физико-механических свойств исследованных на долговечность холодных асфальтобетонных смесей приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Физико-механические показатели жидких битумно-полимерных вяжущих

Наименование показателей	Требования ГОСТ 11955-82 для СГ 130/200	Жидкий битум, полученный разжижением исходного БНД 60/90	Жидкий модифицированный битум	
			Содержание полимера 4 %	
			СКС	ДСТ
1. Условная вязкость по вискозиметру с отверстием 5 мм при 60°, сек	131...200	167	182	188
2. Количество испарившегося разжижителя, %	Не менее 7,0	10,1	19,8	15,9
3. Температура размягчения остатка после определения количества испарившегося разжижителя, °С	Не ниже 39	40,5	45	61
4. Сцепление с кварцевым песком	Выдерж. по образцу № 2	К.о. № 2	К.о. № 2	К.о. № 2

Результаты испытаний холодных асфальтобетонов вышеуказанного состава на усталостную долговечность приведены на рис. 1 и 2.

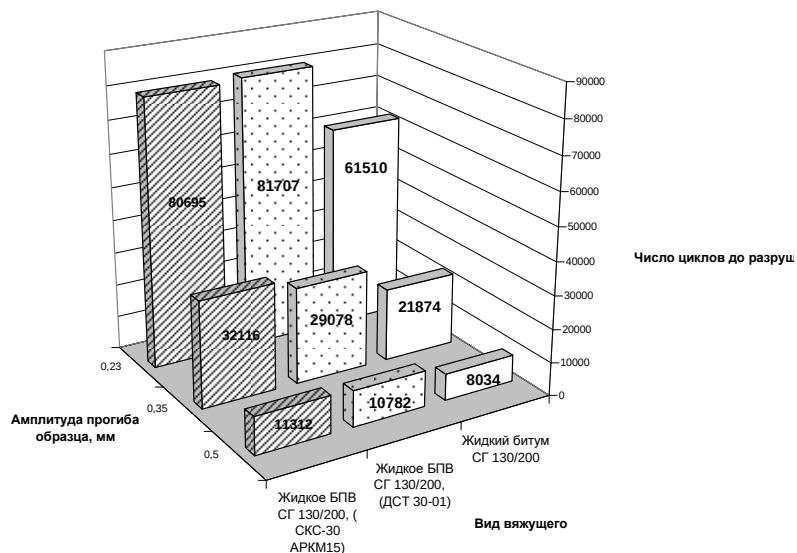


Рис. 1. Усталостная долговечность асфальтобетона, модифицированного полимерами в сухом состоянии

Т а б л и ц а 2
Физико-механические показатели модифицированного холодного асфальтобетона
типа Б_х

Наименование показателей	Норма для марки Б _х по ГОСТ 9128 для типа Б _х I марки	Применяемое вяжущее		
		Жидкий битум СГ 130/200	Жидкое БПВ на основе ДСТ 30-01	Жидкое БПВ на основе СКС 30 АРКМ15
1. Средняя плотность, г/см ³	Не норм	2,34	2,34	2,36
2. Водонасыщение, % до прогрева после прогрева	От 5 до 9	5,2	5,0	4,8
		4,5	3,5	4,1
3. Слеживаемость	Не более 10	8	3	9
4. Набухание, % до прогрева после прогрева	Не нормир.	0,8	0,7	0,8
		0,5	0,2	0,3
5. Предел прочности при сжатии при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, МПа до прогрева: — сухих; — водонасыщенных; — после длит. водонасыщений; после прогрева: — сухих; — водонасыщенных; — после длит. водонасыщений	Не менее			
		1,5	1,58	1,82
		1,1	1,28	1,66
		0,8	1,06	1,36
		1,8	1,90	2,02
		1,6	1,69	2,04
		1,3	1,42	1,37
6. Предел прочности при сжатии $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, МПа до прогрева после прогрева	Не нормир.	0,35	0,56	0,8
		0,45	0,87	0,95

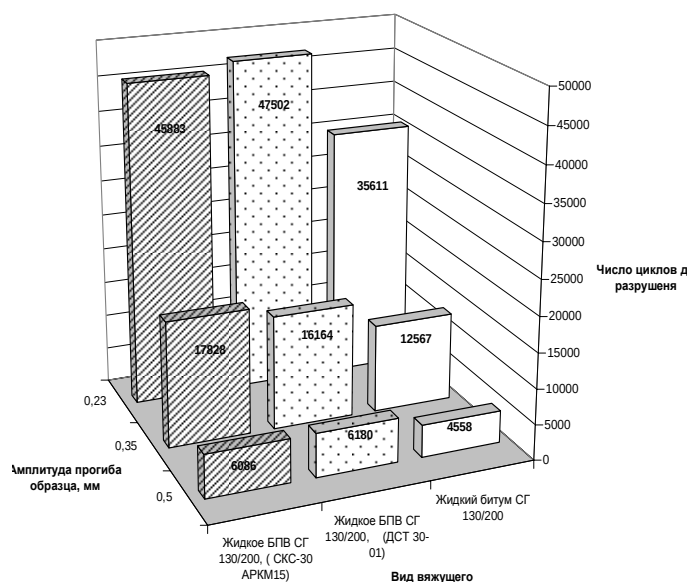


Рис. 2. Усталостная долговечность асфальтобетона, модифицированного полимерами в водонасыщенном состоянии

Как следует из результатов испытаний, усталостная долговечность холодных асфальтобетонов, приготовленных на жидких битумах, модифициро-

ванных СКС и ДСТ, в среднем превышают усталостную долговечность асфальтобетона на традиционном жидком битуме: в 1,35...1,4 раза в сухом состоянии и в 1,3...1,35 раза в водонасыщенном.

Усталостная долговечность асфальтобетонов, приготовленных на модифицированных СКС и ДСТ жидких битумах, в среднем практически одинакова. Стандартные физико-механические показатели вышесказанного у холодного асфальтобетона, модифицированного СКС (см. табл. 2).

Наличие воды в порах холодного асфальтобетона снижает его усталостную долговечность. Об этом свидетельствуют результаты испытания водонасыщенных образцов. Так, показатель для всех трех составов смесей в среднем в 1,7...1,8 раз меньше усталостной долговечности образцов испытанных в сухом состоянии.

Выводы. 1. Применение модифицирующих добавок ДСТ и СКС повышает усталостную долговечность холодного асфальтобетона в 1,35...1,4 раза.

2. Положительное влияние полимерных добавок установлено как в сухом, так и водонасыщенном состоянии.

3. В наибольшей степени повышает усталостную долговечность и физико-механические свойства холодного асфальтобетона его модификация синтетическим каучуком типа СКС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лаврухин В.П. Физико-механические свойства и усталостная долговечность асфальтобетонов на модифицированных битумах / В.П. Лаврухин, Ю.И. Калгин, В.Т. Ерофеев // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. 2003. № 6. С. 89—99.
2. Лаврухин В.П. Свойства асфальтобетонов на модифицированных битумах / В.П. Лаврухин, Ю.И. Калгин // Наука и техника в дорожной отрасли. 2002. № 1. С. 14—18.
3. Лаврухин В.П. Холодные асфальтобетонные смеси с повышенными физико-механическими свойствами, на жидких битумно-каучуковых вяжущих / В.П. Лаврухин, Ю.И. Калгин, А.А. Михайлов // Новые технологии и материалы, применяемые при содержании и ремонте автомобильных дорог : материалы науч.-практ. семинара Ростов-на-Дону : Изд-во РГСУ, 2002. С. 54—59.
4. Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия. М. : Транспорт, 1992. 254 с.
5. Руденский А.В. Усталость асфальтобетона — один из важнейших критериев эксплуатационной долговечности асфальтобетонных покрытий // Труды РосдорНИИ. Вып. 9/98. С. 37—42.

УДК 666.974.2

З.А. Мантуров, А.Б. Тотурбиев

БЕЗОБЖИГОВЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА БЕЗВОДНЫХ СИЛИКАТАХ НАТРИЯ

В результате всесторонних теоретических и экспериментальных исследований подтверждена возможность получения нового класса безобжиговых теплоизоляционных жаростойких материалов на безводных силикатах натрия, получаемых путем введения высокопористых наполнителей, введения и выжигания выгорающих добавок, способами пенообразования и газового вспучивания.

As a result of comprehensive theoretical and experimental researches the opportunity of reception of a new class non-burning of heat-insulating high-temperature materials on waterless silicates of a highly natrum gained by introduction Porous of filling compounds, introduction and burning out of the burning out additives, expedients of a lathering and gas bursting expansion is affirmed.

Развитие промышленности строительных материалов, химической, нефтеперерабатывающей, черной и цветной металлургии, машиностроения и других отраслей промышленности базируется на росте выпуска и качественном совершенствовании материалов, выдерживающих воздействие высоких температур.

Отечественный и зарубежный опыт производства и применения жаростойких обжиговых высокопористых теплоизоляционных материалов свидетельствует о том, что они заняли одно из главных мест в промышленном печестроении для тепловой изоляции горячих поверхностей с температурой 600...1600 °С.

На практике для этих целей используют в основном высокопористые керамические теплоизоляционные материалы, получаемые путем введения и выжигания выгорающих добавок, введением высокопористых наполнителей, способами газового вспучивания (газообразованием) и пенообразования [1]. При этом окончательное закрепление полученной высокопористой структуры и придание прочности изделиям во всех случаях достигается в процессе высокотемпературного обжига.

Однако высокая энергоемкость традиционных обжиговых высокопористых керамических теплоизоляционных материалов и большие капитальные вложения на их производство диктуют острую необходимость разработки и реализации новых эффективных жаростойких теплоизоляционных материалов, прежде всего безобжиговых, для высокотемпературной изоляции тепловых агрегатов различного назначения.

Отсюда вытекает актуальность исследований, направленных на разработку и внедрение новых эффективных безобжиговых жаростойких теплоизоляционных материалов для высокотемпературной изоляции тепловых агрегатов различного назначения.

В этой связи большой интерес представляют многолетние научные исследования, проводимые в Дагестанском государственном техническом университете совместно с Московским государственным строительным университетом и НИИЖБ Госстроя РФ [2, 3]. В результате всесторонних теоретических и экс-

периментальных исследований получены эффективные виды жаростойких безводных силикат-натриевых композиционных вяжущих на основе тонкодисперсных безводного силиката натрия (БСН) и различных огнеупорных веществ (шамот, магнезит, диас, карборунд, хромомagneзит и т.д.).

Достаточно высокая огнеупорность этих вяжущих позволила разработать на их основе жаростойкие бетоны с температурой службы до 1600 °С. В качестве заполнителя использовались различные огнеупорные материалы.

Обобщая результаты исследований по применению БСН мы предположили возможность разработки нового класса жаростойких материалов на его основе, получаемых по энергосберегающим технологиям, а именно безобжиговых высокопористых жаростойких теплоизоляционных материалов.

Формирование омоноличивающих новообразований в структуре материала на основе БСН, как известно [2, 3], принципиально отличается от образования связующей пленки из традиционных вяжущих веществ (цементы, жидкое стекло и т.п.). Связка из БСН характеризуется высокой плотностью и клеящей способностью: ее клеящая способность в 3...5 раз выше, чем у традиционных вяжущих веществ, что предполагает эффективность использования безводной силикат-натриевой композиции для получения на его основе высокопористых жаростойких теплоизоляционных материалов.

Кроме того, при взаимодействии БСН с водой вначале происходит гидратация катиона Na, который сорбируется на поверхности огнеупорного наполнителя и активизирует его. Особенно значительная активизация будет наблюдаться для алюмосиликатных, в том числе шамотных огнеупорных наполнителей.

Придание вяжущих свойств композиции из БСН и ее последующее упрочнение осуществляются в процессе низкотемпературной обработки (90...180 °С). Следовательно, отсутствие необходимости предварительного обжига при высоких температурах обуславливает экономическую эффективность получения безобжиговых высокопористых жаростойких теплоизоляционных материалов на основе тонкомолотых БСН и различных огнеупорных наполнителей. В результате возрастает адгезионное взаимодействие клеящей связки с тонкомолотым наполнителем и формирование длинных и прочных цепей кремниевого полимера типа Si—O—Si, т.е. сильных поликонденсационных явлений.

На первом этапе исследований одной из задач при разработке безобжигового высокопористого теплоизоляционного материала на БСН являлось получение эффективной силикат-натриевой композиции — тонкомолотого продукта, изготавливаемого путем совместного помола БСН и огнеупорного компонента, выполняющего роль вяжущего в теплоизоляционном материале.

В качестве безводного силиката натрия использовалась силикат-глыба АО «ДагОгни» по ГОСТ 13079-81 с силикатным модулем 2,7—3. Силикат-глыба — это твердая масса охлажденного расплава, полученного плавлением смеси кварцевого песка с содой или сульфатом натрия при 1300...1400 °С. Химический состав используемой в работе силикат-глыбы следующий, %: SiO₂ — 72; Na₂O — 26,1; Al₂O₃ — 1,5; Fe₂O₃ — 0,07; примеси — 0,03.

Процессы структурообразования в изучаемых композициях аналогичны процессам, протекающим в композициях на основе жидких стекол [4], так как вяжущие свойства, в конечном счете, приобретаются вследствие обводнения

БСН, т.е. вследствие образования концентрированного жидкого стекла. Кинетика растворения БСН непосредственно в самой композиции — основной и наиболее важный процесс, от полноты завершения которого зависит дальнейшее структурообразование вяжущего и теплоизоляционного материала на его основе.

Комплексные теоретические и экспериментальные исследования авторов подтвердили эффективность использования силикат-натриевых композиций для получения на их основе нового класса безобжиговых жаростойких теплоизоляционных материалов, получаемых путем введения высокопористых наполнителей (вспученный перлит), введения и выжигания выгорающих добавок, способами пенообразования и газового вспучивания.

Основными факторами, влияющими на растворение БСН, следовательно, на вяжущие свойства разработанных силикат-натриевых композиционных вяжущих, являются: кремнеземистый модуль, дисперсность и равномерность распределения тонкомолотых компонентов, количество воды затворения, температура и продолжительность растворения.

При получении пористой структуры жаростойкого теплоизоляционного материала за счет пенообразования, водный раствор БСН, образованный в силикат-натриевой композиции в процессе предварительного разогрева при соответствующем режиме тепловой обработки ($80\ldots 90\text{ }^{\circ}\text{C}$), являясь высоковязким затворителем, повышает в целом вязкость всей композиции, следовательно, устойчивость поровой структуры смеси (после введения пены) до последующего упрочнения ее обезвоживанием путем подъема температуры сушки ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Изучено влияние на вяжущие свойства силикат-натриевых композиций технологических факторов: количества силиката натрия в композиции и его кремнеземистый модуль; дисперсности и равномерности распределения компонентов; исходной влажности формовочных масс; вида тонкодисперсного огнеупорного компонента; соотношения его с силикатом натрия по массе; режима тепловой обработки. Проведенные исследования показали, что управлять основными свойствами силикат-натриевых композиций можно, изменяя ряд технологических факторов: содержание силиката натрия и его равномерное распределение в композиции; тонкость помола компонентов ($3000\ldots 4000\text{ см}^2/\text{г}$); количество воды затворения ($V/T = 0,45\ldots 0,6$); температуру предварительного разогрева ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$) и время перемешивания (6 мин).

Предварительный разогрев при одновременном перемешивании силикат-натриевой композиции по сравнению с традиционной технологией повышает растворимость силиката натрия более чем в 10 раз. При этом выявлен высокий уровень однородности смеси независимо от концентрации силиката натрия в композиции. Кроме того, после охлаждения предварительно разогретой силикат-натриевой композиции до комнатной температуры резко увеличивается значение pH среды (≈ 13), вязкость водного раствора силиката натрия (876 сантипуаз), что в свою очередь положительно влияет на активность пенообразования и стойкость пены.

Предварительный разогрев смеси при получении пено-силикат-натриевых композиций осуществляли на лабораторной смесительной установке марки КП-118 и на промышленной бетоносмесительной установке

марки СБ-81 с нагревательными элементами, вмонтированными между внутренней обшивкой смесителя и внешней водяной обшивкой.

Изучение физико-механических, теплофизических и других свойств в зависимости от состава жаростойких теплоизоляционных материалов проводилось с применением математических методов планирования эксперимента и построением экспериментально-статистических моделей с использованием ЭВМ.

Комплексные dilatометрические и теплофизические исследования, а также изучение других эксплуатационных свойств разработанных нами безобжиговых жаростойких теплоизоляционных материалов позволили качественно оценить эффективность их применения в качестве тепловой изоляции различных тепловых агрегатов с рабочей температурой 600...1300 °С (предполагается в дальнейшем повысить температуру эксплуатации некоторых из исследуемых нами жаростойких теплоизоляционных материалов).

Опытно-промышленное апробирование технологии изготовления безобжиговых жаростойких теплоизоляционных материалов в условиях действующего опытно-промышленного цеха по производству пенобетонных изделий завода ЖБИ ЗАО «Опытное научно-производственное предприятие» в поселке Новый Тюбе Кумторкалинского района Республики Дагестан и применение их в качестве теплоизоляции конструкций различных тепловых агрегатов кирпичного цеха ОАО «Дагфос», некоторых объектов ООО «Соцжилстрой» полностью подтвердили справедливость предполагаемых результатов теоретических и экспериментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. М. : Высшая школа, 1989. 384 с.
2. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, М.И. Зейфман, Б.Д. Тотурбиев. М. : Стройиздат, 1986. 144 с.
3. Тотурбиев Б.Д. Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций. М. : Стройиздат, 1988. 208 с.
4. Тарасова А.П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе. М. : Стройиздат, 1982. 130 с.

© Мантуров З.А., Тотурбиев А.Б., 2006

УДК 691.327

А.М. Шорстов, А.Д. Корнеев**ТЕХНОЛОГИЯ ЗАВОДСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОПРОВОДОВ
В ПЕНОПОЛИМЕРБЕТОННОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Приведены два варианта установок для заводского производства теплопроводов в пенополимербетонной изоляции на основе полиизоцианатов (стационарный и барабанный типы). Рассчитаны параметры работы этих установок и описаны технологические особенности изготовления.

Two versions of equipment to produce pipe-lines with foamed organic concrete insulation bases on polyisocyanates are shown (stationary and drum types). The parameters of work of this equipment are calculated and technological features of manufacturing are shown.

Технология заводского производства теплопроводов включает в себя следующие этапы: подготовку форм, подготовку труб, дозировку и приготовление пенополимербетонной смеси, заливку смеси, выдержку в форме, распалубку теплопровода и хранение на стеллажах. Получаемый в результате такого технологического цикла теплопровод представляет собой монолитную конструкцию, состоящую из трех слоев:

- 1) адгезионного слоя толщиной 5...8 мм со средней плотностью 800...1000 кг/м³, образовавшегося у поверхности трубы;
- 2) срединного теплоизоляционного слоя плотностью 300...400 кг/м³, являющегося основным теплоизолятором трубы, его толщина определяется теплотехническим расчетом;
- 3) защитного слоя плотностью 800...1000 кг/м³ и толщиной 5...10 мм.

Все слои формируются одновременно и за один технологический цикл. Заводское производство теплопроводов в пенополимербетонной изоляции наиболее часто встречается в стандовом виде (рис. 1).

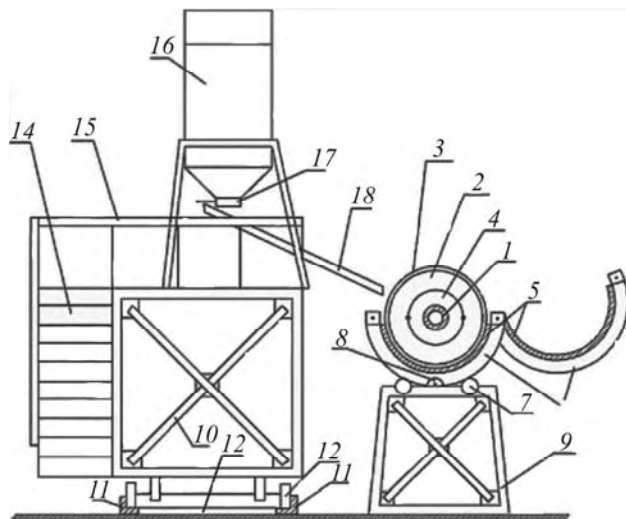


Рис. 1. Установка для изготовления теплопроводов с пенополимербетонной изоляцией: 1 — труба; 2 — металлический диск; 3 — резиновый жгут; 4 — прижимной диск; 5 — металлическая форма; 6 — ободья для вращения формы; 7 — ролики; 8 — фиксатор; 9 — станина; 10 — передвижная площадка; 11 — уголок; 12 — полоса; 13 — колеса; 14 — лестница с ограждением; 15 — ограждение; 16 — смеситель; 17 — запорное устройство; 18 — лоток

При этом формование теплопровода производится в разъемной герметичной форме 5, образованной из двух половинок трубы, разрезанной вдоль ее оси. Для герметизации формы вдоль ее краев приварены металлические рейки с пазами, заполненными резиновыми прокладками. С целью обеспечения возможности поворота формы вокруг продольной оси к ней приварены четыре обода 6, имеющие отверстия для фиксации положения формы с помощью фиксаторов 8. Обода опираются на ролики 7, которые укреплены на станине 9, изготовленной из массивного металлического каркаса. Герметичность торцов формы обеспечивается металлическими дисками 2 с прижимными резиновыми уплотнителями 3. Металлические диски в сборе с прижимными резиновыми уплотнителями устанавливаются на трубу в процессе ее подготовки к формованию.

Для приготовления пенополимербетонной смеси используются традиционные смесители турбулентного типа с увеличенным объемом бака. Смеситель 16 устанавливается на рабочей площадке 10, имеющей ограждение 15 и лестницу 14 для подъема оператора. Рабочая площадка перемещается вдоль формы на колесах по направляющим. Для обеспечения укладки пенополимербетонной смеси предусмотрены лоток 18 и запорное устройство 17 смесителя.

Приготовление пенополимербетонной смеси проводилось в следующей последовательности. С помощью дозиметров устанавливались расчетные количества компонентов. Затем в смеситель заливали полиизоцианат и растворитель и перемешивали в течение 0,5 мин, засыпали минеральный наполнитель и перемешивали 1...3 мин. Гидрофобизирующую жидкость смешивали с триэтаноламином и диэтиленгликолем в отдельной таре, полученную смесь заливали в смеситель и окончательное перемешивание производили в течение 0,5...1 мин.

Подготовка форм к заливке заключалась в ее чистке, прогреве и смазке подогретым низкомолекулярным полиэтиленом. В дальнейшем смазка производилась через 3 цикла изготовления теплопроводов без прогрева формы. Затем в подготовленные таким образом формы укладывались трубы с надетыми металлическими и прижимными дисками. Приготовленная в смесителе пенополимербетонная смесь через запорное устройство по лотку поступала в нижнюю часть формы. При этом площадка со смесителем передвигалась по направляющим вдоль формы. После розлива смеси форму закрывали с помощью натяжных скоб и запорного устройства и поворачивали на 360° в течение 1...3 мин для равномерного распределения смеси. После этого форму выдерживали в течение 30 мин, а затем производили распалубку и выемку готового изделия.

Смеситель сразу после розлива смеси в течение 20...30 минут промывали растворителем, который сливали в специальную емкость и использовали для последующих промывок (до 10 раз) [1].

В отличие от стационарной установки, имеющей низкую производительность вследствие периодической работы, установка барабанного типа позволяет организовать непрерывный автоматизированный процесс производства, что в свою очередь повышает производительность труда.

В этой установке в качестве форм используется непрерывная лента, образованная продольным шарнирным соединением нижних полуформ, к которым также шарнирно закреплены верхние полуформы. Дополнительно установка включает в себя механизм привода ленты, обжимную раму и устройство откря-

Данная установка схематично изображена на рис. 2. Она включает узел подачи теплоизолирующей массы, состоящий из расходных емкостей, дозаторов и смесителя 1, установленного на опорной конструкции, с направляющими 2, формовочная лента включает восемнадцать разъемных форм трех типоразмеров, которые имеют шарнирное соединение. Каждая верхняя полуформа соединена шарнирно с нижней полуформой и имеет двенадцать подрессорных опорных роликов. Лента опирается на обода, объединенные валами 3 и 4, один из которых оснащен приводом. На ободах имеются вырезы под нижние полуформы соответствующих диаметров. Обжимная рама 5, служащая для обеспечения закрытия и герметизации форм, образована пространственным металлическим каркасом, имеющим направляющие полозья под опорные ролики форм. Для обеспечения раскрытия форм перед укладкой в них труб служит откидыватель 6. Транспортер 7 предназначен для транспортировки готовых изделий на склад.

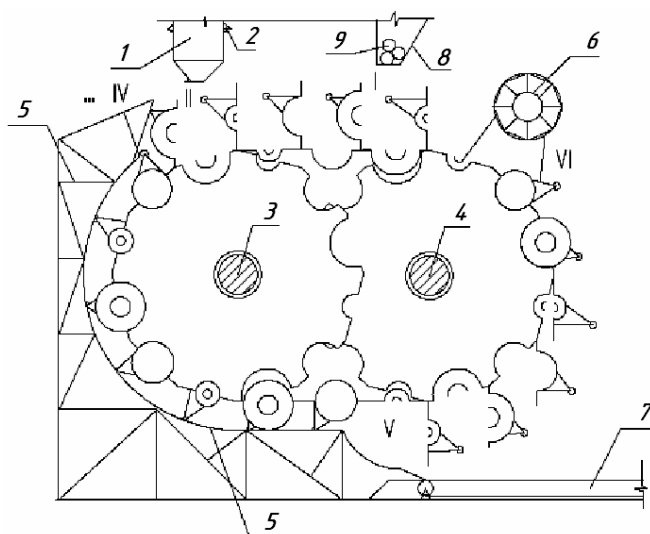


Рис. 2. Схема установки для изготовления трубопроводов с пенополимербетонной изоляцией барабанного действия: 1 — смеситель; 2 — направляющие; 3 — ведущий вал; 4 — ведомый вал; 5 — обжимная рама с направляющими полозьями; 6 — откидыватель; 7 — транспортер; 8 — питатель трубами; 9 — трубы. I — позиция укладки труб в формы; II — позиция заливки смеси в форму; III — позиция неполного закрытия формы; IV — позиция полного закрытия формы; V — позиция извлечения готовых изделий; VI — позиция открытия формы

Установка работает следующим образом. Посредством привода, через вал 3 и обода происходит перемещение формовочной ленты. При этом трубчатый питатель 8 автоматически осуществляет укладку труб 9 в находящуюся под ним открытую форму (позиция I). При дальнейшем перемещении ленты форма с уложенной трубой подходит под смеситель 1 (позиция II), который передвигаясь по направляющим 2 опорной конструкции, заполняет ее теплоизолирующей массой. По окончании заполнения формы путем перемещения ленты форма переводится в положение III. При этом ролик на верхней полуформе упирается в обжимную раму 5 и закрывает форму. Причем смыкание верхней и нижней частей полуформ происходит постепенно и может регулироваться при помощи изменения скорости передвижения ленты. Таким образом, при вспенивании заливочной композиции воздух, вытесняемый ею из формы, свободно выходит и не

препятствует заполнению формы материалом. При достижении следующего положения (позиция IV) происходит окончательное обжатие формы и ее герметизация. При передвижении формы из положения заливки II в положение окончательной герметизации IV происходит ее поворот вокруг продольной оси. При этом вспенивающаяся смесь равномерно распределяется в объеме формы. Обжатая форма перемещается до положения V. В этой позиции направляющие ползья обжимной рамы заканчиваются и верхняя полуформа под действием собственной массы откидывается, готовая изолированная труба скатывается на транспортер 7, который отправляет ее на склад. Дальнейшее перемещение формовочной ленты приводит форму в положение VI, где откидыватель 6 открывает форму, цепляясь своими захватами за крайние ролики верхних полуформ [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Корнеев А.Д.* Полимербетон на основе полиизоцианата / А.Д. Корнеев, Н.М. Борисов, С.К. Шулепов // Передовой научно-производственный опыт, рекомендуемый для внедрения в строительство объектов агропромышленного комплекса : науч.-тех. инф. сб. Вып. 1. М. : НИИЭПсельстрой, 1989. С. 13—16.
2. *Шулепов С.К.* Опыт внедрения трубопроводов с пенополимербетонной изоляцией на объектах сельского строительства / С.К. Шулепов и др. // Информ. листок № 253-84 / ЛМТ ЦНТИиП. Липецк, 1984.

© *Шорстов А.М., Корнеев А.Д., 2006*

УДК 620.169.1:691

Д.Е. Барабаш, Г.В. Зеленев

ЭФФЕКТИВНЫЙ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО КАУЧУКА

Рассмотрены вопросы разработки герметизирующего материала на основе модифицированного жидкого бутадиенового каучука. Представлены технология эпоксидирования исходного каучука с целью повышения его реакционной способности и результаты опытных исследований по выбору оптимального отвердителя связующего. Приведены рецептуры композиций, содержащих различные наполнители, результаты оптимизации смешения компонентов герметика, значения его некоторых физико-механических характеристик.

In article mirror working out questions sealing material on basis liquid modified butadiene rubber. Present to epoxy technology starting material with the purpose of increase his reactionary ability, and results original research to choose optimal cohesive hardener. Reduced dough composition with various stuff, results mixture process optimization mastic components, something of value physics and mechanical characteristics.

Среди эффективных строительных материалов важное место занимают герметизирующие составы на основе полимерного сырья, используемые в современном промышленном и гражданском строительстве. Широкий ассортимент представленных отечественными и зарубежными производителями герметиков базируется, как правило, на трех-четырех видах полимеров. Высокая и не всегда оправданная стоимость таких материалов препятствует их широкому применению. Кроме того, климатические особенности России определяют специфические требования к этим материалам.

В этой связи на базе Воронежского ВВАИУ в течение ряда лет проводились исследования с целью получения современных высокоэффективных герметизирующих материалов различного назначения.

В качестве исходного сырья для проектирования рецептур указанных материалов использовали недорогие жидкие бутадиеновые каучуки, выпускаемые в промышленных масштабах.

На основании анализа многочисленных публикаций по исследованиям в области создания герметизирующих материалов сформулированы наиболее общие требования к ним. Герметизирующие составы должны обладать: эластичностью и прочностью, позволяющими им деформироваться без разрушения при эксплуатации конструкций; высокой адгезией к материалу конструкции; атмосферо-, влаго-, тепло- и морозостойкостью, а также устойчивостью к действию рабочих сред; малой коррозионной активностью по отношению к материалам, контактирующим с герметизирующим составом.

Желательно также, чтобы герметизирующие составы были способны к отверждению или вулканизации при комнатной температуре и не содержали растворителей, испарение которых вызывает усадку материала.

Как правило, основная доля указанных выше свойств обеспечивается базовыми жидкими каучуками, а для получения ряда специфических характеристик применяется их модификация. Этому способу изменения изначальных свойств каучуков имеется веское обоснование, поскольку исходное сырье не всегда способно обеспечить весь комплекс заданных свойств.

Диапазон значений физико-механических и эксплуатационных характеристик определяется областями применения герметизирующих составов.

Свойства некоторых известных герметизирующих составов на основе различных полимеров приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Свойства герметизирующих составов на основе различных полимеров

Показатели	Полимерная основа		
	Жидкие полисульфиды	Жидкие полиорганосилоксаны	Фторуглеводородные каучуки
Плотность, г/см ³	1,2...1,8	1,0...2,3	1,6...2,3
Прочность при растяжении, Мн/м ²	1,5...4,0	1,5...4,5	7,0...14,0
Относительное удлинение, %	150...500	150...600	300...700
Удельное усилие отслаивания, кН/м	1,5...4,5	1,3...2,5	3,0...6,0

Обеспечение столь высоких значений физико-механических характеристик, как правило, требует усложнения технологии приготовления или применения герметизирующих составов. Так, для обеспечения адгезии композиций на основе жидких полисульфидов в их рецептуру вводят дополнительно адгезивы, а при применении фторуглеводородных составов требуется нанесение специальных подслоев и ступенчатое выдерживание при температурах 160...177 °С в течение 1...3 ч.

Герметики на основе жидких полиорганосилоксанов также требуют специальных подслоев для обеспечения адгезии, кроме того, они нестойки к действию нефтяного топлива и предназначены, в основном, для эксплуатации в воздушной среде [1].

За рубежом имеется опыт применения заливочных герметизирующих составов на основе бутадиеновых каучуков, вулканизирующихся при комнатной температуре. Вулканизаты имеют прочность при растяжении около 2 Мн/м², относительное удлинение 200...300 % и обладают хорошими диэлектрическими свойствами [1].

В этой связи представляют интерес герметизирующие составы на основе жидких бутадиеновых каучуков. Их способность к химической и структурной модификациям обуславливает широкий спектр возможных сочетаний благоприятных физико-механических и эксплуатационных свойств.

В результате анализа приведенных выше данных были определены минимальные требования к герметикам общего назначения: относительное удлинение не менее 200 %, напряжение при разрыве не менее 1,5 Мн/м², удельное усилие отслаивания от стальной подложки не ниже 1,5 кН/м. При этом значение вязкости герметика, готового к заливке, измеренное при температуре 20 °С по вискозиметру ВЗ-4, не должно превышать 180 с.

Следует отметить, что указанные значения физико-механических характеристик получены при температуре +25 °С. При отрицательных температурах значения этих характеристик неизбежно изменяются, что следует учитывать при эксплуатации готовых изделий.

Отверждение герметизирующих составов может протекать по различным механизмам. С точки зрения удобства применения рационально проведение отверждения «холодным способом» по механизму полимеризации, так как при этом не выделяются побочные продукты реакции: вода и газы. Однако, провести отверждение указанным способом не всегда возможно, поскольку у исходных каучуков, как правило, отсутствуют реакционно-способные группы, позволяющие проводить «холодное» отверждение. Привитие указанных групп возможно как на стадии синтеза полимера, так и в процессе переработки готового сырья. В каждом конкретном случае предпочтение следует отдавать тем группам, которые способствуют обеспечению заданного комплекса свойств. Наиболее активны следующие концевые группы: эпоксидные, карбоксильные, гидроксильные или их сочетание.

Для проведения исследований в рамках получения реакционно-способного связующего нами был выбран жидкий дивинил-пипериленовый каучук СКДП-Н [2], с соотношением звеньев дивинил : пиперилен 58:42 и вязкостью 70...80 с по вискозиметру ВЗ-4, измеренной при температуре 25 °С. Указанный каучук является компонентом резиновых смесей для производства автомобильных шин. Введение этого каучука в смеси способствовало повышению морозо- и износостойкости резин.

Нами была проведена химическая модификация указанного каучука — эпоксидирование, то есть привитие исходному полимеру концевых реакционно-способных эпоксигрупп. Выбор такого способа модификации обусловлен тем, что наличие полярных эпоксигрупп у модифицированных каучуков способствует высокой адгезии к различным подложкам. Кроме того, благодаря высокой реакционной способности этих групп, в качестве отвердителей этих каучуков можно использовать мономерные, олигомерные и полимерные соединения различных классов и таким образом в широком диапазоне варьировать режимы отверждения (температура, время) и свойства получаемых материалов.

Эпоксидирование проводили в лабораторном реакторе, обеспечивающем температуру от 30 до 200 °С и давление от 0 до 6 МПа. Процесс проводили в присутствии катализаторов — надуксусных кислот с концентрацией от 1 до 1,5 % по массе [3]. Конечным показателем протекания реакции служило процентное содержание эпоксидных групп в каучуке.

По результатам проведенных исследований было получено уравнение регрессии (в кодовых переменных), адекватно описывающее зависимость количества привитых эпоксигрупп от продолжительности проведения реакции, давления нагнетаемого воздуха и температуры реакционной смеси:

$$N = 9,49 + 0,88T + 1,03t + 1,32P - 0,88T^2 - 0,73t^2 + 3,5P^2 + 0,19Tt + 0,46TP + 0,39tP,$$

где N — количество эпоксигрупп, % по массе; T — температура проведения реакции, °С; t — продолжительность проведения реакции, мин; P — давление нагнетаемого воздуха, МПа.

В результате оптимизации эпоксидирования получили модифицированный каучук, содержащий 9...10 % по массе реакционно-способных концевых эпоксигрупп. Отмечено, что вязкость модифицированного каучука увеличилась и составила 95 с по вискозиметру ВЗ-4.

Дальнейшие исследования проводили уже на модифицированном каучуке, при этом оптимизировали некоторые физико-механические показатели

композиций на двух структурных уровнях, переходящих один в другой: «жидкий каучук + компоненты отверждающей группы» — каучуковая матрица (КМ); «каучуковая матрица + дисперсный наполнитель» — каучуковое связующее (КС).

Для отверждения полученного модифицированного каучука использовали отвердители двух типов: жидкий толуилنديизоцианат (ТИЦ) и изометилтетрагидрофталевый ангидрид (ИМТГФА).

Определение оптимального количества отвердителя производили путем оценки изменения величины относительного удлинения образцов-восьмерок и усилия отслаивания полимерного слоя от стальной подложки. Графическое отображение результатов проведенных исследований представлено на рис. 1.

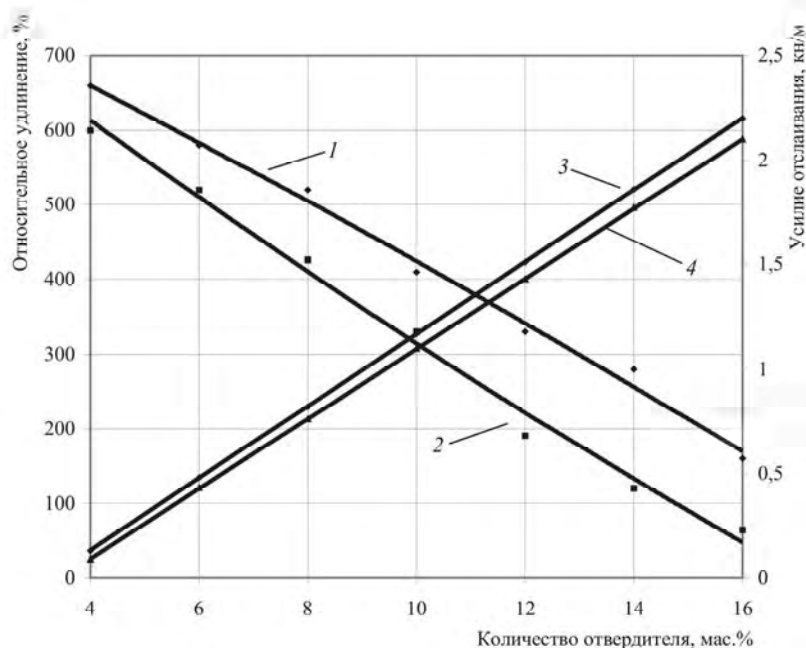


Рис. 1. Изменение относительного удлинения и усилия отслаивания в зависимости от вида и количества отвердителя: 1, 4 — отвердитель ТИЦ; 2, 3 — отвердитель ИМТГФА

Для оптимальных составов (на уровне КМ) определили физико-механические характеристики, значения которых представлены в табл. 2.

Величины относительного удлинения композиций, содержащих в качестве отвердителя ТИЦ, превышали требуемые, в то время как прочность при 100% удлинении была значительно ниже.

Т а б л и ц а 2

Физико-механические характеристики составов на уровне полимерной матрицы

Показатели	Каучуковая матрица	
	Каучук+13% ТИЦ	Каучук+12% ИМТГФА
Прочность при 100% растяжении, МПа	0,98...1,0	1,2...1,4
Относительное удлинение, %	310...320	210...215
Остаточное удлинение, %	5...10	0...10
Удельное усилие отслаивания, кН/м	1,65...1,72	1,55...1,65

Улучшение механических свойств материала возможно при введении активных наполнителей — твердых высокодисперсных тел, хорошо смачивающихся полимером. При этом решающую роль в формировании структуры материала играет размер частиц наполнителя и его удельная поверхность. С увеличением удельной поверхности наполнителя возрастает доля энергии, затрачиваемая на «связывание» его полимером, и соответственно снижается доля «адгезионной» энергии. В связи с этим в качестве наполнителей использовали канальную сажу и аэросил, характеристики которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав и свойства наполнителей

Показатели	Сажа канальная	Аэросил
Основное вещество	C — 99,3 %	SiO ₂ — 99,6 %
Средний диаметр частиц, нм	30	30...40
Уд. адсорбционная поверхность, м ² /г	130	175
pH водной суспензии	4	4

Выбор этих наполнителей обусловлен их широким применением в резиновой промышленности. Кроме того, одинаковые значения pH водной суспензии и среднего диаметра частиц при различных значениях удельной адсорбционной поверхности позволяют оценить влияние последнего параметра, связанного с поверхностной энергией на величины когезионной прочности и адгезии к стальной подложке. Наполнение осуществляли в пределах от 10 до 50 % по объему с шагом 10 %, с контролем вязкости.

На каждом этапе наполнения определяли напряжение при 100% растяжении (при скорости нагружения 50 мм/мин) и адгезию к стальной подложке методом отслаивания.

Результаты проведенных исследований графически представлены на рис. 2.

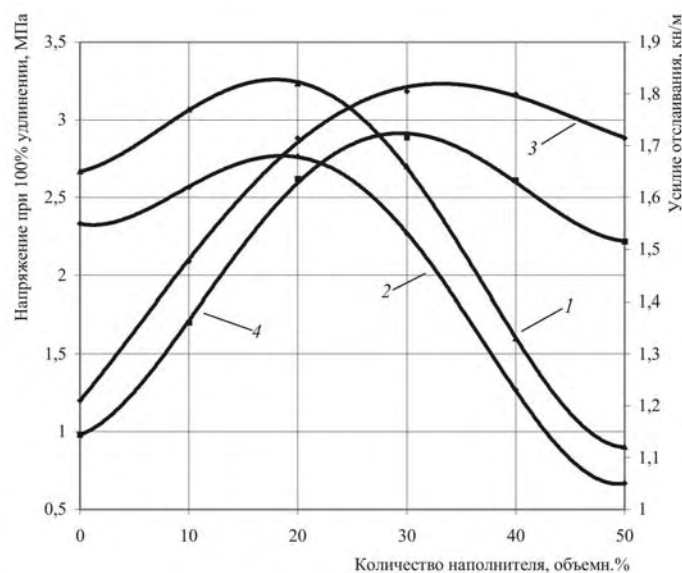


Рис. 2. Изменение характеристик материала в зависимости от вида и количества наполнителя: напряжение при 100 % удлинении: 1 — аэросил; 2 — сажа канальная; усилие отслаивания: 3 — аэросил; 4 — сажа канальная

Наибольшим упрочняющим эффектом, как следует из рис. 2, обладал аэросил. Аппроксимирующие кривые 1 и 2, построенные для иллюстрации изменения напряжения при 100 % удлинении, имели ярко выраженный экстремальный характер. Причем как для аэросила, так и для сажи канальной максимум прочности достигался при их содержании 18...20 % по объему, а вот показатели измеренных напряжений отличались. При наполнении аэросилом максимум прочности составлял 3,25 МПа, а при использовании сажи — 2,72 МПа. При этом усилие отслаивания плавно возрастало до достижения степени наполнения 30...35 % по объему для обоих наполнителей, а затем снижалось (кривые 3 и 4 на рис. 2). Максимальные усилия отслаивания составили 1,82 и 1,7 кН/м при наполнении аэросилом и сажей соответственно.

На основании этого был сделан вывод о целесообразности применения аэросила при его содержании в 22...25 % по объему. У смеси, содержащей указанное количество наполнителя, вязкость по вискозиметру ВЗ-4 составляла 150 с. Дальнейшее увеличение степени наполнения сопровождалось непрерывным ростом вязкости, причем при достижении концентрации обоих наполнителей в 45 % по объему, смеси представляли собой очень вязкую пасту, неспособную выравняться под собственным весом. Кроме того, в смесях визуальным обнаруживались включения конгломератов наполнителя, размером до 0,5 см. Резкое падение значений напряжений после достижения концентрации наполнителей 20...22 % по объему объяснялось нарушением сплошности пленочной структуры матрицы и агрегацией частиц наполнителя. Для снижения вязкости и устранения агрегации частиц наполнителя в смесь дополнительно вводили пластификатор — дибутилфталат, при этом значения напряжений при 100% удлинении и усилия отслаивания снизились на 15...20 %. Опытным путем установлено, что оптимальное количество пластификатора составило 1,8 % от массы каучука. Введением пластификатора удалось снизить вязкость до 115 с.

Для увеличения сроков эксплуатации герметизирующего материала в состав композиции вводили антиоксидант — три-(*n*-нонилфенил)-фосфит (фосфит НФ), в количестве 1,5 %.

Однородность состава полимерной смеси определяется параметрами смешения, поскольку наибольшая гомогенность может быть достигнута только при определенной интенсивности процесса.

Для приготовления полимерных композиций использовали смеситель периодического действия с якорной мешалкой. Конструкцией мешалки предусматривалось изменение скорости вращения в диапазоне 30...80 об/мин.

Для оценки качества смеси использовали так называемый индекс смешения (I): $I = \sigma^2 / S^2$. Индекс смешения изменялся от 0 (несмешанная система) до 1 (система идеально смешана). В результате проведенных исследований установлен оптимальный режим перемешивания смеси, а именно: скорость вращения вала смесителя — 60 об/мин, время перемешивания — 180...190 с.

На оптимизированном составе определили ряд физико-механических характеристик, значения которых представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Физико-механические характеристики герметизирующего материала

Наименование характеристики	Значение характеристики*
Прочность при 100% растяжении, МПа	3,11...3,15/3,22...3,24
Относительное удлинение, %	200...210/160...180
Остаточное удлинение, %	3...5/10...18
Удельное усилие отслаивания, кН/м	1,52...1,54/1,03...1,05
Водопоглощение за 24 ч, %	1,1/ —
Изменение массы, % при выдерживании в авиационном топливе в течение 24 ч	2,8/ —

* — измерения при +25 °С/измерения при –5 °С

В 2002 г. разработанным материалом были заполнены деформационные швы бетонного покрытия аэродрома г. Воронежа. Заливку швов производили при помощи шприцевой системы, под давлением. Полимеризация «на отлип» происходила в течение 5...6 ч. Полное отверждение герметика завершалось спустя 10 ч. Длительная эксплуатация в натуральных условиях выявила высокую надежность герметика. Благодаря высоким деформационно-прочностным свойствам, водостойкости и устойчивости к действию некоторых агрессивных сред, разработанный герметик с успехом может использоваться для герметизации стыков сборных сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лабутин А.Л. Антикоррозионные и герметизирующие материалы на основе жидких каучуков / А.Л. Лабутин, К.С. Монахова, Н.С. Федорова. М. ; Л. : Химия, 1966. 356 с.
2. ТУ 38.103242-83. СКДП-Н. Каучук дивинил-пипериленовый низкомолекулярный : технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1984. 11 с.
3. Энциклопедия полимеров / под ред. В.А. Кабанова. М. : Советская энциклопедия, 1974. Т. 2. С. 114.

**ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ. ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ
ВОЗДУХА. ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ. ВОДОСНАБЖЕНИЕ,
КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ
РЕСУРСОВ**

УДК 628.853

А.Н. Гвоздков

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА
В КОНТАКТНЫХ АППАРАТАХ И МЕТОДОВ ИХ РАСЧЕТА**

Рассмотрены особенности использования отношения Льюиса в качестве характеристики, позволяющей оценить эффективность протекания процессов тепло- и влагообмена в контактных аппаратах систем кондиционирования воздуха. Приведен анализ известных методов расчета контактных аппаратов при осуществлении в них различных по направленности процессов обработки воздуха.

Features of use of a Lewis ratio are considered as the characteristic, allowing to estimate efficiency of processes heat and moisture exchange in contacting units of HVAC systems. The article represents the analysis of known methods of calculation of contacting units.

Вопросы повышения эффективности работы контактных аппаратов тесно связаны с изучением особенностей протекания в них процессов тепло- и влагообмена.

В теории работы контактных аппаратов важное значение имеет вопрос о подобии совместно протекающих процессов тепло- и влагообмена. В качестве критерия подобия обычно принимается отношение Льюиса:

$$\frac{\alpha}{\sigma} = C_p, \quad (1)$$

где α — коэффициент явного теплообмена; σ — коэффициент полного теплообмена; C_p — удельная теплоемкость влажного воздуха.

Величины α и σ определяются из выражений:

$$\alpha = \frac{G c_p \Delta t_c}{F_k \Delta t_{\text{ср.л.}}}, \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{G \Delta I}{F_K \Delta I_{\text{ср.л.}}}, \quad (3)$$

где $\Delta t_{\text{ср.л.}}$ — среднелогарифмический перепад температуры в контактном аппарате; $\Delta I_{\text{ср.л.}}$ — среднелогарифмический перепад энтальпии в контактном аппарате; F_k — поверхность контакта взаимодействующих сред.

Изучению вопроса выполнения отношения Льюиса посвящены работы как отечественных, так и зарубежных авторов [1, 2, 3].

Впервые теоретическое и экспериментальное подтверждение постоянства отношения коэффициентов тепло- и влагообмена было получено Льюисом в режиме изоэнтальпийного увлажнения воздуха.

Эксперименты, проводимые при политропическом состоянии сред, выявили отклонение отношения α/σ от его теоретического значения, что привело к появлению различных мнений по этому вопросу.

Ряд авторов объясняет изменение α/σ двойственным характером процессов тепловлагообмена, например, возможным испарением воды на части поверхности контакта при осуществлении процессов охлаждения и осушения воздуха [3, 5, 11].

Причиной отклонения отношения Льюиса в [2] предполагается наличие совместно протекающих процессов молярного и молекулярного переноса в пограничных слоях относительно поверхности контакта. В общем случае молярно-молекулярного переноса отношение коэффициентов тепло- и влагообмена находится в пределах:

$$c'_p \geq \frac{\alpha}{\sigma} \geq \frac{\lambda_v}{D_v}, \quad (4)$$

где λ_v — коэффициент теплопроводности; D_v — коэффициент диффузии водяного пара в воздухе.

Для описания отклонений отношения Льюиса от его теоретического значения были предложены различные параметрические критерии.

В [7] предлагается использование критерия O_t :

$$O_t = \frac{T_{m_1} - T_{жн}}{T_{c_1} - T_{m_1}}, \quad (5)$$

где $T_{c_1}, T_{m_1}, T_{жн}$ — начальные параметры контактирующих сред.

Е.Е. Карпис предложил выражение [8]:

$$\bar{T}_o = \frac{T_{c_1} - T_{m_1}}{T_{c_1} - T_{жн}}. \quad (6)$$

О.Я. Кокорин на основании теории подобия объясняет отклонение α/σ от c'_p нарушением условий однозначности переноса теплоты и влаги на геометрической поверхности контакта. Им были обобщены экспериментальные данные ряда авторов в зависимости от критерия O_t и одновременно был проведен теоретический анализ изменения потенциалов переноса. Выявлены значения критерия O_t , при которых экспериментально полученные отношения α/σ соответствуют теоретическому значению.

Однако необходимо отметить, что критерий O_t не в полной мере отражает влияние начальных условий взаимодействия, представляющих собой сово-

купность начальных параметров контактирующих сред и их расходов. Из [5] известно, что при постоянных начальных параметрах воздуха и воды в режиме охлаждения-осушения направление условного луча процесса обработки воздуха изменяется в широких пределах. Этот факт говорит о том, что отношение Льюиса при $O_T = \text{const}$ будет иметь различные значения в зависимости от коэффициента орошения, что подтверждается известными экспериментальными исследованиями [6].

Так, результаты экспериментальных исследований, проведенных Е.Е. Карписом, показали, что при начальных параметрах воздуха $t_c = 28^\circ\text{C}$, $t_m = 22,7^\circ\text{C}$ и воды $t_{\text{жн}} = 10^\circ\text{C}$, определяемых постоянством критериев $\bar{T}_0 = 0,294$, $O_T = 2,396$ отношение Льюиса при $B = 1,2 \text{ кг/кг}$ равно $0,309$, а при $B = 1,8$ составило $0,283$.

Поэтому возникает необходимость учета в начальных условиях соотношения расходов взаимодействующих сред.

А.А. Гоголин [3] на основе экспериментальных данных проанализировал выполнение отношения α/σ в зависимости от коэффициента влаговываждения:

$$\zeta = \frac{\Delta I}{c'_p \Delta t}. \quad (7)$$

Анализ показал, что α/σ приближается к c'_p при значениях $\zeta = 0$, $\zeta = 2 - 3$. Был сделан вывод о том, что данное отношение выполняется при отсутствии двойственности процессов влагообмена, в частности, отсутствии доувлажнения в конечной фазе обработки воздуха.

Использование коэффициента влаговываждения при анализе выполнения отношения Льюиса имеет те же недостатки, что и использование критерия O_T .

Экспериментальные исследования, проведенные Л.М. Зусмановичем в режиме охлаждения насыщенного воздуха, показали, что независимо от гидродинамических условий и при изменяющихся начальных параметрах воздуха и воды отношение α/σ примерно соответствует теоретическому. Автором был сделан вывод об однонаправленности протекания процессов тепло- и влагообмена при осуществлении данных процессов.

Для опытов осушения-охлаждения ненасыщенного воздуха было сделано предположение, что в этом режиме имеет место двойственность процесса переноса влаги. Это, в свою очередь, является причиной заниженных средних коэффициентов влагообмена и соответственно отклонения α/σ в сторону больших значений.

Таким образом, рассмотрение вопроса выполнения отношения Льюиса показало отсутствие единой методики обобщения опытных данных, что в ряде случаев приводит к различному толкованию получаемых в экспериментах результатов, чем затрудняются оптимизация и усовершенствование конструктивных решений контактных аппаратов. Одним из важных вопросов в решении данной проблемы является четкое представление направленности развития процессов обработки воздуха и условий достижения термодинамического равновесия контактирующих сред.

На $I-d$ диаграмме реальный процесс обработки воздуха обычно изображается прямой линией, соединяющей точки начального и конечного состояний воздуха. В то же время многочисленные экспериментальные исследова-

ния показали, что реальные процессы при изображении их в $I-d$ диаграмме отклоняются вправо от конечной температуры воды. По данным Е.Е. Карписа [5] это отклонение колеблется от 1...2,5 до 4 °С, причем при охлаждении и осушении воздуха линии реальных процессов в $I-d$ диаграмме всегда проходят правее и выше линий процессов, направленных на конечную температуру воды, а при нагреве и увлажнении — левее и ниже. В связи с этим было предложено направление идеального процесса, ориентированного на конечные параметры воды. Причинами отклонения реального процесса от идеального Е.Е. Карпис считает полидисперсность факелов распыла в форсуночных камерах орошения и большой разброс локальных значений температур. А.А. Гоголин сделал предположение о том, что причиной отклонений является доувлажнение воздуха [3].

В [4] рассматривается направленность развития процесса тепловлагообмена как процесс смешения основного потока воздуха с насыщенным тонким слоем воздуха над поверхностью воды без учета скачков параметров на линии раздела сред. Необходимо отметить, что в конечной фазе обработки воздуха при таком построении имеет место изоэнтальпийное увлажнение, что в определенной мере согласуется с предположением А.А. Гоголина о доувлажнении как причине отклонения реальных процессов от условных [3].

Таким образом, традиционное представление о направленности изменения параметров контактирующих сред строятся на предположении, что вначале протекают процессы охлаждения и осушения, а затем изоэнтальпийного увлажнения.

Экспериментальные исследования процессов охлаждения и осушения воздуха, проведенные Л.М. Зусмановичем [9], представили направленность развития процессов тепло- и влагообмена в контактных аппаратах в виде сложной кривой. При этом на начальном этапе обработки воздуха имеет место протекание процесса увлажнения, близкого к изоэнтальпийному, а затем происходит постепенный переход к расчетному режиму — охлаждения и осушения. При этом не дается теоретическое обоснование этих экспериментальных данных.

Таким образом, необходимо отметить отсутствие точной физической картины протекания процессов тепло- и влагообмена в контактных аппаратах, нет единого мнения в вопросе направленности развития и состояний термодинамического равновесия конечных параметров контактирующих сред. По этой причине в обращении находится довольно много методов расчета контактных аппаратов, основанных на эмпирическом подходе к описанию процессов тепло- и влагообмена [7, 8, 10, 11].

Наибольшее распространение получили методы коэффициентов эффективности и условных коэффициентов тепло- и влагообмена.

С учетом условного представления реального и идеального процессов, Е.Е. Карписом [8] была предложена зависимость коэффициента эффективности в виде:

$$E_o = 1 - \frac{t_{m_k} - t_{ж_k}}{t_{m_n} - t_{ж_n}}, \quad (8)$$

где t_{m_n}, t_{m_k} — начальные и конечные параметры воздуха по мокрому термометру; $t_{ж_k}, t_{ж_n}$ — начальные и конечные параметры воды.

Для полного описания конечных параметров воздуха после контактного аппарата необходимо знать два параметра его состояния. В связи с этим предложено использовать универсальный коэффициент эффективности:

$$E' = 1 - \frac{t_{c_k} - t_{m_k}}{t_{c_n} - t_{m_n}}. \quad (9)$$

На основании опытных данных для различных по направленности процессов в [6] приведены зависимости и все необходимые данные для расчета коэффициентов эффективности в виде:

$$E(E') = A(v\rho)^v B^n, \quad (10)$$

где $(v\rho)$ — массовая скорость воздуха в живом сечении контактного аппарата; B — коэффициент орошения.

Необходимо отметить, что зависимости для коэффициентов эффективности носят формальный характер и не имеют строгого физического смысла, а имеющиеся рекомендации о направленности реальных процессов изменения параметров воздуха на $t_{ж_k}$ и $t_{ж_{нд}}$, как правило, не оправдываются. Теоретическое обоснование коэффициентов эффективности не получило подтверждения в работах Л.М. Зусмановича [9].

В [7] предложен метод расчета контактных аппаратов на основе обменных коэффициентов, автор — О.Я. Кокорин. В этом методе предложена зависимость для определения коэффициента явного теплообмена в виде:

$$\alpha = f[(v\rho), B, z, \bar{P}], \quad (11)$$

где z — показатель, учитывающий конструктивные характеристики камеры орошения.

Для учета начальных условий взаимодействия использован параметрический критерий типа:

$$\bar{P} = \frac{P'_n - P_n}{P'_n - P_{ж}^n}, \quad (12)$$

где P'_n — давление насыщения при начальной температуре воздуха; P_n — начальное парциальное давление водяных паров в воздухе; $P_{ж}^n$ — давление насыщения водяных паров при начальной температуре воды.

В методе используется экспериментально полученная графическая зависимость между начальным и конечным значениями относительной влажности воздуха и давлением воды перед форсункой в камере орошения.

Л.М. Зусмановичем [10] был предложен метод на основе относительных значений энтальпии и температуры воздуха. Он был получен в результате преобразования системы дифференциальных уравнений явного и полного теплообмена:

$$dQ_n = [\alpha(t_c - t_{ж_k}) + r\beta(p_n - p_{пов})] dF, \quad (13)$$

$$dQ_{я} = \alpha(t_c - t_{ж_k}) dF. \quad (14)$$

Наибольший интерес представляет метод расчета, предложенный Е.В. Стефановым [11]. Он основан на использовании чисел переноса явного и полного тепла:

$$NTU_{я} = \alpha F / c_p G = (t_{c_1} - t_{c_2}) / \Delta t_{ср.л.}, \quad (15)$$

$$NTU = \sigma F / G = (I_1 - I_2) / \Delta I_{\text{ср.л.}} \quad (16)$$

Сущность метода сводится к установлению функциональной связи между числами единиц переноса и факторами, определяющими протекание процессов тепло- и влагообмена. Для оценки величины отклонения реального процесса от идеального автором предложен критерий совершенства процесса:

$$K = \frac{NTU_{\text{я}}}{NTU} = \frac{\alpha}{\sigma c'_p}. \quad (17)$$

Это отношение представляет аналог отношения Льюиса, то есть совершенным будет считаться процесс в случае выполнения отношения, что говорит об условности использования данного критерия в практических расчетах контактных аппаратов.

В заключении рассмотрения данного вопроса необходимо отметить, что ни один метод расчета не позволяет дать термодинамическую оценку протекающим процессам тепло- и влагообмена с учетом их направленности. Все используемые методы являются основой лишь для инженерных расчетов, основанных на накопленных экспериментальных данных.

С учетом вышесказанного можно сделать вывод об актуальности разработки термодинамического подхода к изучению процессов тепло- и влагообмена, протекающих в контактных аппаратах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берман Л.Д. О справедливости аналогии между тепломассообменом и соотношением Льюиса для кондиционеров и градиен // Холодильная техника. 1974. № 2. С. 34—37.
2. Богословский В.Н. Отопление и вентиляция : Ч. 2 Вентиляция / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.П. Титов. М. : Стройиздат, 1976. 439 с.
3. Гоголин А.А. Кондиционирование воздуха в мясной промышленности. М. : Пищевая промышленность, 1966. 239 с.
4. Зусманович Л.М. Особенности процессов охлаждения ненасыщенного и насыщенного воздуха // Кондиционирование воздуха : сб. тр. / НИИ сан. техники. М. : Госстройиздат, 1963. № 15. С. 82—95.
5. Зусманович Л.М. Оросительные камеры установок искусственного климата. М. : Машиностроение. 1967. 110 с.
6. Карпис Е.Е. Изменение отношения Льюиса для политропических процессов в форсуночных камерах // Кондиционирование воздуха : сб.тр. / НИИ сан. техники. М. : Госстройиздат, 1963. № 15. С. 68—81.
7. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования воздуха. М. : Машиностроение, 1978. 261 с.
8. Карпис Е.Е. Исследование и расчет процессов тепло- и массообмена при обработке воздуха водой в форсуночных камерах // Кондиционирование воздуха : сб. тр. / НИИ сан. техники. М. : Госстройиздат, 1960. № 6. С. 5—106.
9. Зусманович Л.М. Анализ современных методов расчета оросительных воздухоохладителей // Вопросы обработки воздуха в контактных аппаратах. М. : ЦНТИ по гражд. строит. и архитектуре, 1970. С. 3—62.
10. Богословский В.Н. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение / В.Н. Богословский, Л.В. Петров, О.Я. Кокорин. М. : Стройиздат, 1985. С. 80—94.
11. Стефанов Е.В. Исследование модернизированной схемы форсуночной камеры / Е.В. Стефанов, В.Д. Коркин // Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. М. : Стройиздат, 1965. С. 143—154.

УДК 697.98:666

В.И. Боглаев, В.В. Россошанский, М.В. Тетерев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОЙМАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены проблемы работы систем аспирации и снижения запыленности воздуха рабочей зоны в производственных помещениях таких производств, как гипсовое, цементное, силикатного кирпича. Предлагаются рекомендации по повышению работы пылеулавливающего оборудования, системы аспирации технологического оборудования.

We have examined the aspiration system operation problems and the problems of the air dustiness of the working area of the gypsum and cement manufacturing, and of the manufacturing of the silicate bricks. We propose the recommendations how to raise the operational effectiveness of the capping of dust equipment and the aspiration system of the manufacturing equipment.

Анализ системы аспирации на предприятиях по производству *гипсового вяжущего* показал, что она включает, как правило, отсос от котла, охладителя, кольца мельницы. В качестве пылеулавливающего оборудования применяются циклоны — как первая ступень, и электрофильтры — как вторая ступень очистки. При работе систем обеспыливающей вентиляции отмечается низкая эффективность улавливания пыли существующими аппаратами. Так, например эффективность улавливания гипсовой пыли циклонами составляет 41...63 %, электрофильтрами составляет — 92...95.

Низкая эффективность улавливания гипсовой пыли в циклонах обусловлена перегрузкой его по воздуху, пыли и мелкодисперсностью пыли. Остаточная большая концентрация пыли в пылегазовом потоке после циклонов приводит к снижению эффективности работы электрофильтра. Кроме того, гипсовая пыль имеет высокое удельное электрическое сопротивление порядка 1×10^{13} до 5×10^{13} Ом (что приводит к эффекту обратной короны), поэтому плохо улавливается электрофильтрами.

Так как дисперсный состав пыли, удаляемой от разного оборудования, различный, то рационально очистку удаляемого пылегазового потока от оборудования производить отдельно от каждого отсоса. Например, для повышения степени очистки от пыли рекомендуется воздух, отходящий от гипсового котла, очищать в аппаратах ВЗП, затем направлять на дальнейшую очистку. Аппараты ВЗП обеспечивают высокую степень очистки от пыли — до 97 %. Применение такой схемы очистки позволяет разгрузить двойной циклон по воздуху и пыли и снизить концентрацию пыли в газопылевом потоке, входящем в электрофильтр.

Анализ работы электрофильтров показал эффективность пылеулавливания меньше каталожных данных. Для снижения выбросов в атмосферу рекомендуется заменить электрофильтры рукавными фильтрами. Рукавные фильтры позволяют очищать воздух от пыли размером до 3 мкм с эффективностью 99 %. Возможно так же использование нескольких рукавных фильтров, отходящих от котла, мельницы или охладителя отдельно.

Для повышения эффективности работы двойного циклона организован отсос из бункера батарейного циклона через аппарат ВЗП-400. Эффективность улавливания гипсовой пыли блоком пылеулавливания циклон — ВЗП

составила 75 % без отсоса и 84 — с отсосом из бункера циклона. Для повышения эффективности работы электрофильтра рекомендуется провести наладку режимов встряхивания и распределения скорости по сечению фильтра. Однако наладка электрофильтра дает небольшое увеличение эффективности пылеулавливания 1...1,2 %.

Совершенствование систем аспирации при производстве цемента. Анализ работы систем обеспыливающей вентиляции от колосниковых холодильников показал, что на предприятиях по производству цемента наблюдается низкая эффективность работы циклонов. Предлагается провести реконструкцию существующих систем аспирации, а именно провести замену менее эффективных циклонов на аппараты ПВ ВЗП с предполагаемой эффективностью улавливания до 95 % в качестве первой ступени, в качестве второй ступени очистки установить рукавный фильтр. Так же наблюдается недостаточная аспирация технологического оборудования, например, узлов перегрузки материала. Нами предлагается подключить в систему аспирации от холодильника отсосы воздуха от узла пересыпки из холодильника на ковшовый транспортер.

Также предлагается следующая система пылеочистки, особенностью которой является то, что предусматривается при уменьшении расхода воздуха в 2 раза переключение части аппаратов на вторую ступень очистки. Предлагается разработать систему автоматики, которая позволит отключать часть циклонов когда расход воздуха будет уменьшаться.

На предприятиях по производству цемента имеется большое количество узлов перегрузок и транспортеров. Нами были выделены основные проблемы работы систем *аспирации галерей клинкерных транспортеров*, например: неэффективные конструкции местных отсосов, недостаточное количество удаляемого воздуха. Предлагается реконструкция существующих систем аспирации, а именно: разработка и замена местных отсосов от кожухов транспортеров в узлах перегрузки; полное укрытие транспортеров; реконструкция течи для того, что бы снизить энергию удара клинкера, падающего с высоты; установка в качестве первой ступени очистки аппаратов ПВ ВЗП для снижения нагрузки по пыли на рукавные фильтры; реконструкция рукавных фильтров (замена механизмов встряхивания и продувки, замена рукава).

Как правило, используют *системы аспирации от силосов цемента* с механическим побудителем тяги, с очисткой воздуха в рукавных фильтрах. Однако нами предлагается использовать новую систему аспирации безнапорную, работающую на давлении, которое создается в банке при закачке цемента пневмотранспортом. Учитывая, что 50 % пыли имеет размер меньше 9 мкм, в качестве пылеуловителя оптимально использовать электрофильтр. В ряде случаев возможно применение рукавного фильтра с малой скоростью фильтрации. Эффективность улавливания составит: у электрофильтра до 99 %, у рукавного фильтра до 98.

Предложения по улучшению состояния воздушной среды и снижению выбросов в атмосферу в упаковочном цехе. Анализ систем аспирации (на примере ряда производств) показал, что система аспирации от упаковочной машины имеет большой запас производительности. Проектный расход воздуха от карусельной машины составляет до 5000 м³/ч, тогда как система аспирации имеет производительность до 10000 м³/ч. Рекомендуется провести герметизацию рукавного фильтра и подключить в эту систему аспирации два местных отсоса от просеивающих машин с расходом воздуха 1000 м³/ч от каждого отсоса.

Отсосы от элеватора рекомендуется переключить с рукавного фильтра от карусельной упаковочной машины МФУ-72 на рукавный фильтр ФВК-90, т.к. проектный расход воздуха от карусельной машины равен проектной производительности рукавного фильтра МФУ-72. При этом следует уменьшить производительность вентилятора посредством уменьшения оборотов двигателя до 1000 об/мин с проектным расходом от 7000 м³/ч. При этом суммарный расход воздуха через рукавный фильтр ФВК-90 составит: 2 башмака элеватора по 700 м³/ч, две головки нории по 800 м³/ч, два накопительных бункера по 500 м³/ч, итого 4000 м³/ч при проектной производительности рукавного фильтра ФВК-90 5400 м³/ч.

При реконструкции систем аспирации упаковочного цеха рекомендуется заменить рукавные фильтры ФВК-90 и МФУ-72 на один рукавный фильтр ФРИ-270 производительностью 15000 м³/ч, с подключением на него всех инженерных коммуникаций и упаковочной машины № 1.

На заводах по производству *силикатного кирпича* не наблюдается проблем при работе пылеочистного оборудования, которое, как правило, состоит из инерционных пылеуловителей и рукавных фильтров. Совершенствованию подлежат конструкции местных отсосов от оборудования, а также определение требуемых объемов аспирационного воздуха. Например, аспирация прессовых станков не обеспечивает все узлы пыления: так, наиболее сильное пылевыведение наблюдается при осыпании с прессовального стола излишков сырьевой смеси и при его чистке. Материал осыпается с высоты около 1,5 м на пол. При накоплении материала на полу рабочий скребком удаляет его в цепной конвейер. Наибольшее пылевыведение наблюдается при ударе осыпающегося материала о пол и при работе рабочим скребком. Обеспыливание этого узла возможно двумя вариантами: установить местный отсос, отсасывающий воздух из-под прессовального стола, или организовать аспирацию цепного конвейера и направить в него загрязненный воздух от прессов. При этом необходимо заменить решетки, закрывающие конвейер, листовой сталью для гермитизации конвейера.

Нами был проведен опытно-промышленный эксперимент степени 3². Варьируемыми параметрами были сечение отсоса и расход воздуха. При использовании варианта 1 нами было установлено, что необходимые аспирационные объемы составляют 550...600 м³/ч, скорость воздуха в рабочем сечении отсоса — 1,5...1,8 м/с; при использовании варианта 2 — соответственно 1000...1200 м³/ч и 3,0...3,5 м/с, и наблюдается явление уноса материала в систему аспирации, что недопустимо.

Таким образом, на предприятиях по производству гипса рекомендуется использовать в качестве первой ступени аппараты ПВ ВЗП, имеющие более высокую эффективность очистки по сравнению с циклонами: в качестве второй ступени — рукавный фильтр со скоростью фильтрации до 1,0 м/с. Электрофильтры показали себя не эффективными в связи с физико-химическими свойствами пыли. В производстве цемента наблюдается низкая эффективность работы циклонов из-за мелкодисперсности цементной пыли. Предлагается провести замену циклонов на аппараты ПВ ВЗП. На предприятиях по производству силикатного кирпича наблюдается недостаточная аспирация технологического оборудования, в следствии чего в рабочую зону выделяется большое количество пыли. Для решения этой проблемы предлагается установка дополнительных отсосов воздуха от технологического оборудования.

© Боглаев В.И., Россошанский В.В., Тетерева М.В., 2006

УДК 628.4.04-403

*Е.Е. Мариненко, Т.В. Ефремова, Черкасов А.В.***КРИТЕРИИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СБОРА БИОГАЗА НА ПОЛИГОНАХ ТБО**

Для определения эффективности систем сбора биогаза предложена генеральная определительная таблица, включающая энергетические, экономические и экологические коэффициенты. Приведена диаграмма, позволяющая определить уровень эффективности применяемой системы сбора биогаза.

In order to determine the efficiency of biogas gathering facilities the authors suggest using the general determining table which includes energy, economic and environmental factors. A diagram is presented that allows determining the efficiency rate of the biogas gathering facilities currently in use.

Для оценки энергетического, экологического и экономического уровня системы вводятся соответствующие коэффициенты, определяемые по уравнению:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{i=s} k_n \varphi(i)}{\sum_{i=1}^{i=s} \varphi(i)},$$

где i — количество отдельных характеристик; $\varphi(i)$ — функция, нормирующая веса относительных параметров, входящих в ранжированную последовательность, общее число которых равно s .

Характеристики, описывающие различные стороны функционирования технических систем, имеют разную размерность и разную количественную оценку. Поэтому необходимо преобразование отдельных показателей системы в вид, удобный для инженерной оценки объекта. В качестве такой системы-преобразователя предлагается генеральная определительная таблица (ГОТ) [1]. ГОТ представляет собой обобщенную сводку технических, энергетических и экологических требований на системы получения биогаза. Для наиболее объективной оценки систем получения биогаза в ГОТ заносятся только показатели, характерные для всех систем. Характеристики и позиции в совокупности образуют дерево «характеристик — позиций».

ГОТ можно револьвентировать в виде матрицы характеристик.

	Позиции				
	p_1	p_2	p_3	...	p_n
$\varphi(i_1)$	j_{11}	j_{12}	j_{13}	...	j_{1m}
$\varphi(i_2)$	j_{21}	j_{22}	j_{23}	...	j_{2m}
$\varphi(i_3)$	j_{31}	j_{32}	j_{33}	...	j_{3m}
...	...	...	...	...	...
$\varphi(i_n)$	j_{n1}	j_{n2}	j_{n3}	...	j_{nm}

В матрице строки в целом отображают характеристики, а столбцы — позиции. На пересечении строк и столбцов помещены оценки, выраженные в баллах.

Использование квадратных матриц характеристик ($i = p$) позволяет учесть равномерное изменение весов позиций в пределах

каждой характеристики и неравномерное изменение оценок по мере перехода от одной характеристики к другой.

Энергетический коэффициент является решением матрицы, составленной на основе следующих коэффициентов:

1) *энерго-коммерческого коэффициента* i_1

$$\eta = 1 - \eta_{\text{сн}},$$

где $\eta_{\text{сн}}$ — доля биогаза, расходуемая на собственные нужды биогазовой установки. Статьи расхода энергии на нужды системы сбора биогаза на полигонах и свалках ТБО:

на работу компрессной станции;

работу по откачке конденсата из конденсатосборника.

Необходимая мощность компрессора, кВт, определяется по уравнению:

$$N_{\text{комп}} = \frac{pQ \ln \frac{p_{\text{нагн}}}{p}}{1000 \eta_{\text{из}} \eta_{\text{м}}},$$

где p — разрежение в системе, Па; Q — расход извлекаемого биогаза, м³/ч; $p_{\text{нагн}}$ — абсолютное давление в транспортирующем трубопроводе биогаза, Па; $\eta_{\text{из}}$ — изотермический КПД, зависящий от интенсивности охлаждения компрессора ($\eta_{\text{из}} = 0,65 \dots 0,85$); $\eta_{\text{м}}$ — механический КПД компрессора, учитывающий потери мощности в подшипниках и движущихся частях. Для поршневых компрессоров различных конструкций $\eta_{\text{м}} = 0,80 \dots 0,93$.

Мощность, необходимая для работы насоса по откачке конденсата из конденсатосборника, определяется по уравнению:

$$N_{\text{нас}} = \frac{Q_{\text{вл}} \cdot p_{\text{нас}}}{\eta_{\text{о}} \cdot \eta_{\text{м}}},$$

где $Q_{\text{вл}}$ — расход конденсата, м³/ч; $p_{\text{нас}}$ — давление, развиваемое насосом, Па; $\eta_{\text{о}}$ — объемный КПД; $\eta_{\text{м}}$ — механический КПД;

2) *коэффициента энергорентабельности* i_2 , МДж/тыс. р.·год

$$\mathfrak{E}_{\text{рт}} = \frac{Q \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot T_{\text{р}}}{C_{\text{т}}(T - T_0)},$$

где $C_{\text{т}}$ — стоимость системы сбора биогаза, тыс. р.; $T_{\text{р}}$ — время работы установки в течение года, ч; T — общий срок эксплуатации полигона ТБО, год; T_0 — время начала работы установки, год;

3) *коэффициента экономии природного газа* i_3 , м³/ч

$$G_{\text{пг}} = Q \frac{C_{\text{т}_{\text{бг}}}}{C_{\text{т}_{\text{пг}}}},$$

где $C_{\text{т}_{\text{бг}}}$ — стоимость 1 МДж, получаемого при сжигании биогаза, р/МДж; $C_{\text{т}_{\text{пг}}}$ — стоимость 1 МДж, получаемого при сжигании природного газа, р/МДж.

Стоимость 1 МДж для биогаза:

$$C_{\text{т}_{\text{бг}}} = \frac{1000 C_{\text{т}}}{Q \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot T_{\text{об}}},$$

где $T_{\text{об}}$ — общее время работы установки, ч; стоимость 1 МДж природного газа:

$$C_{\text{т}_{\text{пг}}} = \frac{C_{\text{т}_{\text{пг}}}}{Q_{\text{пг}}^{\text{р}}},$$

где $C_{тг}$ — стоимость 1 м³ природного газа, р/м³; $Q_{нпг}^p$ — низшая теплота сгорания природного газа, МДж/м³.

Следовательно:

$$G_{тг} = \frac{1000 C_{тг} \cdot Q_{нпг}^p}{C_{тг} \cdot Q_{н}^p \cdot T_{об}}$$

Экологический коэффициент зависит от следующих показателей:

1) *коэффициента снижения парникового эффекта* i_4 , кг СО₂/р. Основным газом, участвующим в создании парникового эффекта, является диоксид углерода. Эквивалент одного килограмма метана составляет 35 кг диоксида углерода [4]. С учетом среднего состава биогаза для различных источников (55 % — для полигонов и свалок ТБО и 65 % — для канализационных очистных сооружений и сельскохозяйственных предприятий) коэффициент снижения парникового эффекта определяется следующим образом:

$$k_{пэ} = \frac{Q(r_{CH_4} \rho_{CH_4} + 0,029 r_{CO_2} \rho_{CO_2})}{C_{тг}},$$

где r_{CH_4} , r_{CO_2} — соответственно объемная доля метана и диоксида углерода в биогазе; ρ_{CH_4} , ρ_{CO_2} — соответственно плотность метана и диоксида углерода, кг/м³;

2) *коэффициента снижения вреда окружающей среде* i_5 , учитывающего исключение выброса в атмосферу вредных веществ, содержащихся в биогазе, для которых установлены предельно допустимые концентрации максимальных разовых выбросов. Для систем сбора биогаза на полигонах и свалках ТБО коэффициент снижения вреда окружающей среде учитывает возможные выбросы сероводорода и определяется по зависимости:

$$k_{вр} = k_{эс} \cdot y \cdot Q \sum_{i=1}^n k_{эi} r_i,$$

где $k_{эс}$ — коэффициент экологической ситуации и значимости территории;

$y = \frac{y_{удг}^a}{y_{удРФ}^b}$ — отношение показателя эколого-экономической оценки удельного

го ущерба от загрязнения атмосферного воздуха по экономическому району к показателю, среднему по Российской Федерации; $k_{эi}$ — коэффициент относительной эколого-экономической опасности загрязняющего вещества, выбрасываемого в атмосферный воздух; r_i — объемная доля в составе биогаза загрязняющего вещества.

3) *коэффициента снижения эмиссии вредных веществ* i_6 , кг/м², базирующегося на ориентировочных объемах выброса вредных веществ в случае возгорания 5 % площади полигона (учитываются выбросы твердых веществ, сернистого ангидрида, оксида азота, оксида углерода и сажи):

$$k_{эвв} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot H_{отх} \cdot \rho_{отх} \cdot k_{эс} \cdot y \sum_{i=1}^n k_{эi} j_i,$$

где $H_{отх}$, $\rho_{отх}$ — соответственно толщина, м, и плотность, кг/м³, складированных на полигоне отходов; j_i — удельный выброс вещества на тонну ТБО, кг/т.

Для определения экономического коэффициента необходимо вычислить значение следующих показателей:

1) *коэффициента эффективности автоматизации* i_7 , р/м^3

$$k_{\text{эа}} = \frac{H \cdot Q \cdot \text{Ст}_{\text{ог}} - H_{\text{об}} \cdot \text{Ст}_{\text{об}}}{Q \cdot H},$$

где H — время работы установки, ч/сут ($H=24$ ч/сут); $H_{\text{об}}$ — время работы обслуживающего персонала, ч/сут; $\text{Ст}_{\text{об}}$ — стоимость одного часа работы обслуживающего персонала, р/ч;

2) *коэффициента окупаемости рекультивированных земель* i_8 , р.

$$K_{\text{рз}} = \frac{k_3 \cdot A \cdot \text{Ст}_a}{k_b},$$

где A — площадь рекультивированных земель, га; Ст_a — стоимость аренды (продажи) рекультивированных земель, р/га; k_b — коэффициент пересчета дохода с сельскохозяйственных земель в зависимости от периода их восстановления.

Для определения качества предлагаемой системы составлена диаграмма, учитывающая все показатели системы. Согласно диаграмме система по производству биогаза может быть оценена: «очень хорошо», «хорошо», «удовлетворительно» и «плохо» (рис.).

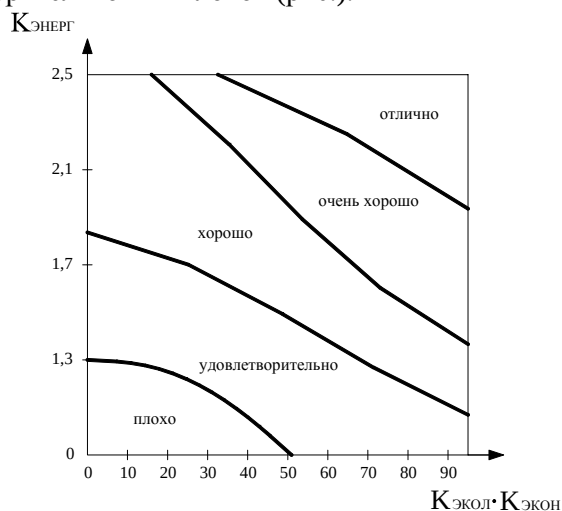


Диаграмма качественного определения эффективности системы

Энерго-эколого-экономический коэффициент определяется путем решения матрицы, составленной на основе окончательных оценок генеральной определительной таблицы. Числовое значение коэффициента находится в пределах 0,27...944,784 и предлагается в качестве одного из паспортных показателей системы сбора биогаза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гмошинский В.Г. Теоретические основы инженерного прогнозирования / В.Г. Гмошинский, Г.И. Флиорент. М. : Наука, 1973. 304 с.
2. Мариненко Е.Е. Тенденции развития систем сбора и обработки дренажных вод и метаносодержащего газа на полигонах твердых бытовых отходов : Отечественный и зарубежный опыт / Е.Е. Мариненко, Ю.Л. Беляева, Г.П. Комина. СПб : Недра, 2001. 160 с.

© Мариненко Е.Е., Ефремова Т.В., Черкасов А.В., 2006

УДК 621.928.9

А.С. Артюхин, А.В. Баяев, А.С. Тюрин**СРАВНЕНИЕ АППАРАТОВ ВЗП И ЦИКЛОНОВ ПРИ ОЧИСТКЕ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОЙИНДУСТРИИ**

Проанализированы теоретические и экспериментальные данные эффективности пылеулавливания и потери давления в аппаратах ВЗП и циклонах. Показано преимущество аппаратов ВЗП над всеми моделями циклонов как по эффективности пылеулавливания, так и в энергетическом аспекте.

We have analyzed the theoretical and experimental data of the capping of dust efficiency and the pressure casualties in the countercurrent rotational flow equipment and in the whizzer separator. We have shown the advantage of the countercurrent rotational flow equipment over all the models of the whizzer separators in the capping of dust efficiency as well as in the energy aspect.

Пылеуловитель со встречными закрученными потоками (ВЗП) — это аппарат, полученный в результате усовершенствования циклона. ВЗП снабжен дополнительным нижним вводом, через который в сепарационную камеру поступает дополнительный поток воздуха, закрученный в одном направлении с верхним. Благодаря этому изменяется схема движения потоков воздуха внутри аппарата и повышается эффективность его работы. Поэтому представляется интересным сравнение данных аппаратов с другими пылеуловителями центробежного действия, в первую очередь с циклонами.

Основными параметрами, характеризующими работу центробежного пылеуловителя, являются: эффективность пылеуловителя η , которую, как правило, измеряют медианным диаметром d_{50}^{η} — диаметром частиц, которые улавливаются в пылеуловителе на 50 %; коэффициент гидравлического сопротивления аппарата ξ ; средняя условная скорость газа в цилиндрической части пылеуловителя u .

Оценка эффективности пылеулавливания циклонов приведена в работах многих авторов, например в [1, 2]. Для вихревых пылеуловителей характеристики аппаратов содержатся в [3]. Данные различных характеристик центробежных аппаратов приведены в табл. 1.

Аппараты 1950—1970-х гг. (ВПУ) имели сопловой или лопаточный верхний ввод, в который запыленный газ подавался отдельным вентилятором. Эффективность этих аппаратов была очень высокой, но коэффициент их гидравлического сопротивления сопоставим с показателями высокоэффективных циклонов. Аппараты ВЗП с тангенциальным верхним вводом, появившиеся в 1980-х гг., существенно отличались от ВПУ. Пылевоздушная смесь подавалась на очистку одним вентилятором. ВЗП имели несколько меньшую эффективность по сравнению с ВПУ, но низкий коэффициент гидравлического сопротивления и высокая средняя скорость газа в цилиндрической части пылеуловителя компенсировали этот недостаток.

В циклоне весь объем очищаемого воздуха подается в верхний ввод. По мере движения сверху вниз поток меняет свое направление и поступает в

осевую зону циклона. В аппарате ВЗП только часть общего объема очищаемого воздуха, подаваемая в верхний ввод, меняет направление своего движения при очистке в аппарате. Из этого следует, что затраты энергии на разворот потока в ВЗП будут меньше. При одинаковой общей производительности сравниваемых равновеликих аппаратов ВЗП и циклонов, одинаковых коэффициентах гидравлического сопротивления входных устройств скорости газа во входных патрубках аппарата ВЗП будут ниже, поскольку поток разделяется до аппарата. Исходя из вышесказанного можно заключить, что теоретически потери давления в пылеуловителях ВЗП меньше, чем в циклонах. На практике эта гипотеза полностью подтверждается.

Т а б л и ц а 1

*Характеристики различных типов циклонов ($d_k=500$ мм)
и вихревых пылеуловителей [1, 2, 3, 4]*

Пылеуловитель	d_{50}^{η} , мкм	v , м/с	ξ
ЦН-24	8,5	4,5	75 (80)
ЦН-15	4,5	3,5	155 (163)
ЦН-11	3,65	3,5	245 (250)
СКД-ЦН-33	2,31	2,0	520 (600)
СК-ЦН-34	1,95	1,7	1050 (1150)
ВЦНИИОТ	8,6	4,0	75
ВПУ DSE 33 сопловой ($d_k=200$ мм)	1,1 (0,8)	2,92	723
ВПУ DSE 33 лопаточный ($d_k=200$ мм)	1,08	2,92	547
ВЗП-600 ($d_k=600$ мм) тангенциальный	1,4	4,8	75

Потери давления в аппаратах ВЗП сравнимы с потерями в низкоэффективных циклонах, например ЦН-24, ВЦНИИОТ, а эффективность пылеулавливания выше, чем у энергоемких высокоэффективных циклонов, что обуславливает возможность их работы при значительно больших расходах газа, чем у циклонов тех же диаметров. Сопоставление эффективности сепарации пыли для равновеликих циклонов и аппарата ВЗП при оптимальных для них нагрузках [3] показаны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

*Сопоставление эффективности сепарации пыли для равновеликих циклонов
и аппарата ВЗП при оптимальных для них нагрузках*

Пыль	d_m , мкм	ВЗП-1000	ЦН-11	ЦН-15	СК-ЦН-34
Известняк	5	96,0	48	45	92
Целлюлоза	6	96,5	63	48	95
Эмульсионный ПВХ	6	97,0	50	45	93
Эпоксидная смола	22	98,0	88	82	98
Карбонат кальция	11	99,0	80	69	98,2
Гидрооксид алюминия	39	99,8	92	90	99,8
Полиакрилонитрил	32	99,8	91	90	99,8
Суспензионный ПВХ	100	99,98	90	98	99,9

Данные показывают небольшое преимущество ВЗП по эффективности пылеулавливания над циклоном СК-ЦН-34, при этом ВЗП очищает в 2,8 раза больший объем пылегазовоздушной смеси и имеет в 14 раз меньший коэффициент гидравлического сопротивления по сравнению с СК-ЦН-34.

В настоящее время при разработке систем газоочистки все более широкое применение находит энергетический принцип сравнения инерционных пылеуловителей, разработанный проф. М.И. Шилевым и его школой. В основы принципа положено условие равенства интегральных эффективностей отдельных аппаратов или каскадов, при котором определяется соотношение между потерями давления в них, или, что то же самое, между удельными энергозатратами в них на очистку газов [4]. При выводе принципа был использован фракционный коэффициент проскока:

$$K_{\delta} = e^{-aStk^n} \quad (1)$$

где a , n — постоянные, характеризующие пылеулавливающие способности аппарата; $Stk = \tau \frac{v}{d}$ — число Стокса, определяющее инерционный механизм

улавливания пыли в аппарате; v , d — характерные скорости и эквивалентные линейные размеры инерционного пылеулавливания пыли в аппарате;

$\tau = \frac{\rho_m \delta^2}{18\mu}$ — время динамической релаксации частиц; ρ_m , δ — плотность и размер частиц; μ — динамическая вязкость газа.

Для оценки фракционного коэффициента проскока, представим (1), следующим образом:

$$K_{\delta} = e^{-Ad^{2n}}. \quad (2)$$

Далее преобразуем его к виду:

$$\lg\left(\frac{1}{K_{\delta}}\right) = Ad^{2n}, \quad (3)$$

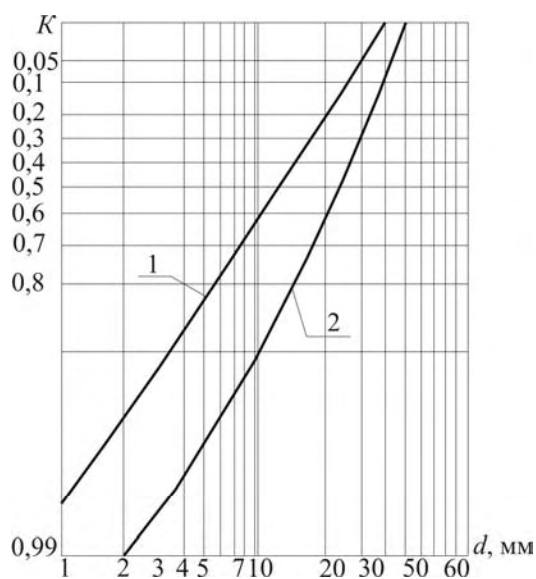
$$\lg \lg\left(\frac{1}{K_{\delta}}\right) = \lg A + 2n \lg d. \quad (4)$$

Таким образом, фракционный коэффициент проскока можно представить в виде линейной зависимости. Например, на рис. 1 представлены данные фракционного коэффициента проскока для аппарата ВЗП-600 и циклона ЦН-11 $d=600$ мм.

Для аппарата ВЗП-600 теоретический фракционный коэффициент проскока по аналогии с уравнением (1) можно представить следующим образом:

$$K_{\delta} = e^{-9,38Stk^{0,27}}. \quad (5)$$

Исследование и эксплуатация пылеуловителей со встречными закрученными потоками показывают [5], что они обладают высокой степенью улавливания мелкодисперсных частиц пыли, очищают больший по сравнению с равновеликими циклонами объем пылегазовоздушной смеси, имеют существенно меньший коэффициент гидравлического сопротивления по сравнению с высокоэффективными циклонами, имеют слабую чувствительность эффективности сепарации к колебаниям нагрузки по газу, концентрации пыли в газе и температуре очищаемого потока, меньшие по сравнению с циклонами абразивный износ и залипание твердыми частицами внутренних поверхностей аппаратов, возможность регулирования процесса пылеулавливания путем изменения соотношения расходов газа по каналам, меньшие габаритные размеры в плане, чем у циклонов равной производительности.



Фракционный коэффициент проскока:
1 — ВЗП-600; 2 — циклон ЦН-11

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Ярославль, 1977. 95 с.
2. Страус В. Промышленная очистка газов. М., 1981. 616 с.
3. Сажин Б.С. Пылеуловители на встречных закрученных потоках / Б.С. Сажин, Л.С. Гудим М. : НИИТЭХИМ, 1982. 49 с.
4. Шилаев М.И. Критерии выбора и сравнения аппаратов газоочистки / М.И. Шилаев, А.Р. Дорохов // Известия ВУЗов. Строительство. 1998. № 6. С. 81—84.
5. Азаров В.Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками: Опыт внедрения. Волгоград : Изд-во Волгогр. гос. техн. ун-та, 2003. 150 с.: ил.

© Артюхин А.С., Баяев А.В., Тюрин А.С., 2006

УДК 628.394(470.45-25)

Е.В. Москвичева, А.А. Быков, А.А. Геращенко, А.Е. Алексиков, П.В. Рушковский

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМЫ ВОДООТВЕДЕНИЯ г. ВОЛГОГРАДА НА ВОДНЫЙ ОБЪЕКТ

Предложен способ снижения антропогенной нагрузки системы водоотведения на водный объект, заключающийся в обязательной обработке сточных вод коагуляционно-флокуляционным методом. Данный метод используется для снижения концентрации ПАВ, которые оказывают разрушающее действие на источник водоснабжения и работу очистных сооружений водоотведения.

The article suggests a method of decreasing the man-made effect of the sewerage system on a water body. This implies the required treatment of waste waters by coagulation and flocculation. This method is used to reduce the amount of tamols which deteriorate the source of water supply and the functioning of sewage disposal plants.

Защита окружающей среды и стабилизация работы систем водоочистки предполагают развитие передовых технических знаний и технологий, в частности, в области водного хозяйства. На сегодняшний день Россия оказалась в непростой экологической ситуации. Две трети населения пьют ежедневно некачественную питьевую воду. Некоторым системам водоочистки на территории России уже более 100 лет, и только 27 % из них соответствуют государственным экологическим стандартам. 50000 систем водоснабжения и 20000 систем по очистке сточных вод России нуждаются в модернизации или замене сооружений, и, кроме того, реконструкция требуется сетям водоснабжения протяженностью 463000 км. Из 50 млрд м³ сточных вод 20 млрд м³ не соответствуют государственным стандартам, но они попадают в водоемы.

Среди причин ухудшения состояния воды: промышленная и сельскохозяйственная деятельность, протечки нефти из трубопроводов, устаревшие системы водоочистки и оборудование. Никогда ранее не отмечалось такой острой необходимости в развитии технологий в области водного хозяйства.

К факторам, обуславливающим необходимость более эффективных и экономичных технологий в области водного хозяйства, относятся изношенная инфраструктура, более строгое законодательство по охране окружающей среды, рост населения, стареющее общество, дефицит воды. Из-за роста населения количество воды на человека в общем круговороте воды в природе между 1950 и 2050 гг. снизится на 73 %. К 2040 г. по меньшей мере 3,5 млрд человек будет не хватать воды, что в 10 раз больше, чем в 1995 г. К 2050 г. две трети мирового населения могут оказаться живущими в регионах с хронической, повсеместной нехваткой воды.

За последние несколько лет в нашей промышленности появился ряд прогрессивных технологических решений, касающихся вышеуказанных проблем. Более дешевый обратный осмос, технология ультрафильтрационной мембраны, электрохимической обработки привели к идее повторного использования воды и опреснения. Благодаря повышенной энергоэффективности широкое распространение получили растворяющиеся аэрофлотационные очистители и диффузные аэраторы. Другие методы дезинфекции, такие как озонирование, ультрафиолетовая и электрохимическая дезинфекции, становятся все более популярными в качестве одного из возможных путей сохранения противомикробной защиты, одновременно уменьшая содержание в воде побочных продуктов дезинфекции.

В связи с необходимостью повышения безопасности важнейших объектов инфраструктуры повысился спрос на технологии контроля в режиме реального времени и на телеметрические системы. Заводское оборудование также пополнилось автоматизированными насосами и гидротехническими затворами. Технологии децентрализованной или местной очистки считаются наиболее экономически выгодной заменой централизованного оборудования для водоочистки. Совершенствование технологий, постоянно происходящее в области очистки промышленных стоков, позволяет улучшить общую экономику предприятия и повысить эффективность эксплуатации.

На территории Волгоградской области поверхностные водные ресурсы сосредоточены в водных объектах Волжского и Донского бассейнов и используются для нужд населения, предприятий и организаций различных отраслей народного хозяйства. Мощным источником их загрязнения являются производственные сточные воды, с которыми в водоемы попадает широкий спектр токсичных веществ. К таким веществам относятся поверхностно-активные вещества (ПАВ), большинство из которых являются биологически жесткими веществами и не утилизируются в природе естественным путем. Накапливаясь в водоемах, ПАВ оказывают сильное токсическое действие на флору и фауну, ухудшают органолептические показатели воды, препятствуют процессам самоочищения водных объектов. Даже небольшие количества ПАВ вызывают обильное пенообразование, нарушают кислородный обмен в водоемах, тормозят процессы фотосинтеза, сокращая кормовую базу, и приводят к гибели рыб. Специфические свойства ПАВ вызывают серьезные затруднения при очистке сточных вод, особенно биохимическим путем. ПАВ встречаются в сточных водах многих предприятий, в том числе и железнодорожного транспорта, так как широко применяются в качестве моющих средств, эмульгаторов, стабилизаторов эмульсий и суспензий и пр.

Очистные сооружения большинства предприятий железнодорожного транспорта не имеют специального оборудования для извлечения из сточных вод непосредственно ПАВ. Последние чаще всего удаляются попутно с другими загрязнителями, что способствует высокому остаточному содержанию их в очищенной воде (50 мг/дм³ и более). В частности, только один комбинат обслуживания пассажирских поездов Волгоградского отделения СКЖД сбрасывает в горколлектор с неочищенными сточными водами до 1 т ПАВ в год, за что выплачиваются штрафы более 1 млн р. Поэтому в настоящее время остается актуальной разработка новых высокоэффективных технологий очистки сточных вод, содержащих ПАВ, которые позволяют проводить процесс с высокой скоростью, при отсутствии громоздкого и дорогостоящего оборудования, низких энергозатрат и несложной утилизации загрязнений, извлеченных из сточных вод. Реальные стоки предприятий ОАО «Российские железные дороги» и ЖКХ содержат анионное поверхностно-активное вещество (АПАВ) — сульфонол — относящееся к классу сложных ароматических соединений, а также взвешенные вещества и нефтепродукты.

Многокомпонентный состав стоков объекта исследования, низкие концентрации ингредиентов, а также поставленные задачи определили выбор коагуляционно-флокуляционного метода очистки стоков с применением специфических коагулянтов и флокулянтов. Метод является одним из прогрессивных технологических процессов очистки воды.

Главным достоинством метода является возможность в одной стадии уловить все типы загрязнителей сточной воды (растворимые, коллоидно- и грубодисперсные), что значительно увеличивает экономическую эффективность метода.

При изменении традиционного механизма коагуляционно-флокуляционного метода очистки введением коагулянтов и флокулянтов направленного действия возможно достижение высоких эффектов очистки от ПАВ и сопутствующих ингредиентов с одновременным сокращением временем очистки, а также получение шлама с хорошими структурно-механическими свойствами, что значительно упрощает его утилизацию.

Выбор метода очистки обоснован не только анализом литературных источников, но и проведенными на кафедре водоснабжения и водоотведения ВолгГАСУ исследованиями по определению физико-химического состояния основного улавливаемого компонента сточных вод (сульфонола) с использованием современных методов анализа.

Подбор реагентов коагуляционно-флокуляционной смеси проводился с учетом специфической реакционной способности каждого из них с основным улавливающим реагентом (сульфонолом) и структурами, стабилизированными им.

Обоснован и экспериментально доказан механизм процесса очистки, протекающий по принципу экстракции молекулярных и коллоидно-дисперсных загрязнителей высокомолекулярным полиэлектролитным флокулянт (к-флокулянт). Выявлен выраженный синергический эффект действия коагуляционно-флокуляционной смеси (комплексобразователь — коагулянт-сорбент — полиэлектролитный флокулянт). Отмечено доминирующее действие полиэлектролитного к-флокулянта, обеспечивающего высокую скорость очистки за счет ионного взаимодействия с отрицательно заряженными частицами загрязнителей стоков.

Проведена унификация метода очистки на стоках с повышенным содержанием нефтепродуктов.

Исследована сравнительная характеристика эффективности действия ряда высокомолекулярных полиэлектролитных флокулянтов в зависимости от их молекулярной массы, содержания и знака заряда ионогенных групп.

Изучена принципиальная возможность применения деструктивного метода глубокой доочистки сточных вод, содержащих АПАВ, ультрафиолетовым облучением (фотолиз). Методом газожидкостной хроматографии изучены продукты деструкции на предмет степени токсичности.

На рисунке представлена схема образования сточных вод. За ее пределами остались шламы, образующиеся при подготовке свежей воды, сточные воды энергетических производств, вторичные загрязнения, поступающие в водоемы от процессов очистки сточных вод материальных производств. Схема образования сточных вод заслуживает подробного обсуждения в связи с концепцией создания безотходной технологии, которая мыслится возможной путем переработки отходов производства в товарный продукт или вторичное сырье для повторного использования. Из схемы следует, что все процессы переработки отходов непременно требуют участия энергии, производство которой в современной тепло- и электроэнергетике принципиально не может быть безотходным в силу необратимости процессов горения.

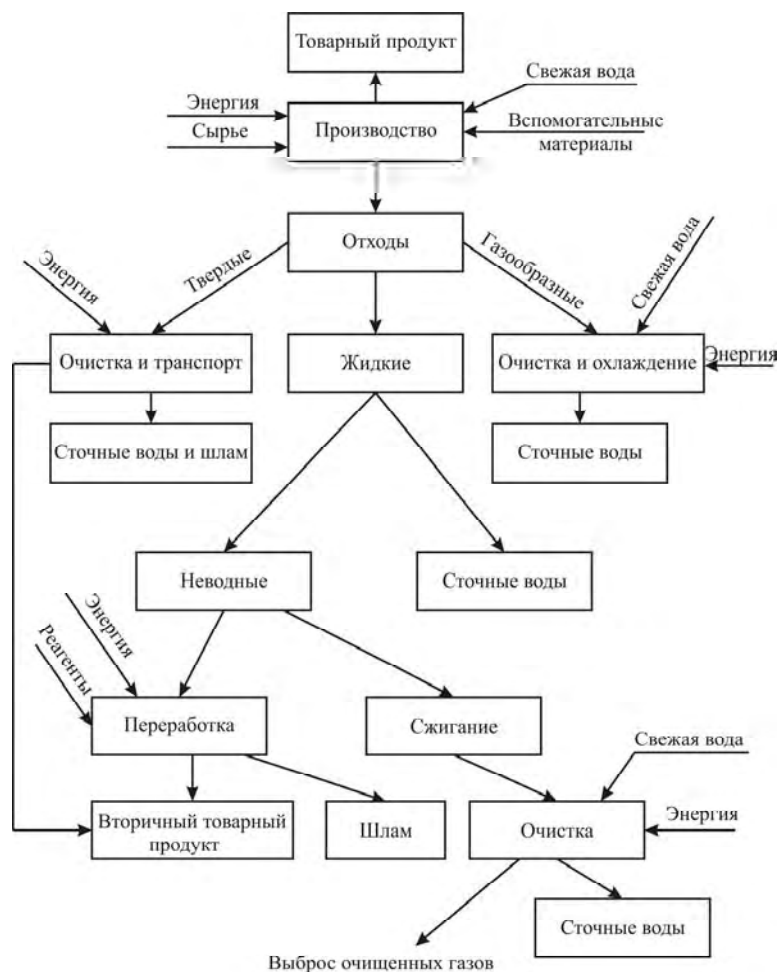


Схема образования сточных вод

Теоретически все виды сточных вод, возникающих в материальном производстве, могут быть очищены до любого наперед заданного состояния и кондиционированы до нужного состава, но это требует колоссальных расходов энергии. Если прибавить к этому расходы на капитальное строительство, оборудование и аппараты для очистки отходов, будет ясно, что под безотходной технологией (такой термин существует) надо понимать малоотходную технологию, отличающуюся, прежде всего, минимумом энергозатрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мусаелян С.М. Экологическое состояние водных объектов Волгоградской области и пути его улучшения : монография / С.М. Мусаелян, А.А. Быков. Волгоград, 2004. 96 с.
2. Ливчак И.Ф. Охрана окружающей среды : учеб. пособие / И.Ф. Ливчак, Ю.Ф. Воронов. М. : Стройиздат, 1988. 191с.
3. Соснина Н.А. По вопросу очистки сточных вод предприятий ж/д транспорта от поверхностно-активных веществ / Н.А. Соснина, Е.Л. Терехова // Научно-технические экологические проблемы транспорта : материалы науч. конф. Хабаровск : ДВГУПС, 2000.

© Москвичева Е.В., Быков А.А., Геращенко А.А.,
Алексиков А.Е., Рушковский П.В., 2006

ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

УДК 711.424

Н.С. Сапрыкина

«СОЦГОРОД ЯРРАК» В ЯРОСЛАВЛЕ, ЭТАПЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

Изложены особенности проекта застройки крупного жилого массива ЯрРАК (конец 1920-х — 1930-е гг.), расположенного в северной части центра Ярославля. Рассматриваются этапы его реализации, принципы новой застройки и реконструкции существующей в контексте разработки нового генерального плана города (1936), а также стилистических и идеологических установок времени.

The project of big inhabited district YarRAF (the end of 1920—1930 years) in the north part of Yaroslavl's center is described in this article. There are stages of its realization, the principles of new buildings and the reconstruction against the background of creation of the new general city's plan (1936), ideological and stylistic demands of time.

Ярославль — уникальный исторический город, на примере которого можно проследить многие тенденции и закономерности развития российской архитектуры с древнейших времен до наших дней. Советский период времени стал для этого города новой эпохой развития и преобразования, который во многом обусловил его современный вид и сложившуюся структуру застройки. Здесь можно проследить все этапы становления и развития советского градостроительства от первых идей городов-садов до первых эталонов новых микрорайонов.

Одним из наиболее интересных периодов поисков и реализаций, отражающих оригинальную точку зрения на социальные и другие проблемы градостроительства, является рубеж 1920—1930-х гг., когда в теории градостроительства начинают доминировать концепции «соцгорода» и возникают первые реальные проекты и постройки.

Своеобразную трактовку идея соцгорода получила в жилом комплексе, спроектированном и построенном в 1929—1934 гг. в Ярославле, рядом с новым промышленным районом — территорией резиноасбестового комбината (ЯрРАК). «На месте свалок, огородов, на бывшем грязном Городском валу Ярославля за три года выросли крупные, каменные жилые кварталы ярославского резино-асбестового комбината с водопроводом, канализацией и электроосвещением», — так писала газета «Северный рабочий» в начале 1930-х г. [1]. Но это были не просто дома, а целый комплекс четырехэтажных пятисекционных домов, в центральных трех секциях которых размещались квартиры,

в двух крайних — общежития с комнатной системой, а первый этаж центральных секций использовался под общественные учреждения, магазины, ясли и другие учреждения обслуживания. Помимо жилья в структуре кварталов одновременно были возведены детские учреждения, баня, прачечная, фабрика-кухня, школа ФЗУ, здание кинотеатра, что наиболее соответствовало идее «современного социалистического города с коммунистическим обоснованием всей жизни обитателей и всего городского хозяйства» [2]. При этом архитектор Т.В. Покровский попытался создать единый архитектурный ансамбль, символизирующий художественно-эстетические идеалы общества того времени. На основе конструктивной и функциональной оправданности объемно-планировочных решений, рациональности и простоты форм появилось в середине 1920-х годов новое направление в советской архитектуре — конструктивизм, который и оказал существенное влияние на образ и стилистику жилого комплекса РАК. Поэтому архитектура его зданий очень лаконична, можно сказать аскетична, и лишена не только рельефных деталей и украшательств, но и даже штукатурки.

Основная масса жилищного фонда и крупные общественные учреждения соцгорода ЯрРАК располагались в основном в виде фасадных линий вдоль проспекта Шмидта (пр. Ленина) в промежутке от набережной р. Волги до Гражданской улицы (пр. Октября). В конце 1920-х гг. это была окраина города, но важное градостроительное положение проспекта уже тогда было предопределено и учтено при его формировании. На современном этапе проспект Ленина является одной из главных центральных улиц города, связывая набережную р. Волги и важный транспортный узел — железнодорожный вокзал «Ярославль-Главный». Большая ширина проезжей части, зеленый бульвар в ее центре, позднее украшенный фонтанами, формирование площадей, «обрамление» в основном четырехэтажной кирпичной застройкой — все это придавало новый масштаб и ритм градостроительной структуре, отражающей специфику новой экономической формации.

Объемная композиция жилых домов комплекса строилась на преобладании контрастных членений. Единство ансамбля создавалось очень простыми средствами, общими для всех зданий. Это — симметрия фасадов, подчеркнутая просторными угловыми балконами-террасами, выступами лестничных клеток, узкими полосами остекления над ними; ритм широких оконных проемов; горизонтальные тяги по контуру оконных проемов, противопоставленные вертикальному остеклению лестничных клеток. По своей профилировке тяги представляли простую полочку в виде напуска кирпича, такая же полочка играла роль венчающего карниза.

Планировочное решение жилых зданий тоже отличалось простотой, лаконичностью и компактностью. Помимо традиционных секций для конца 1920-х годов с двумя четырехкомнатными квартирами на этаже (каждая комната имела самостоятельный выход в переднюю, кухня и санитарный узел размещены около лестничной клетки) в структуре здания предусмотрены торцевые секции с многокомнатными квартирами с узким коридором, кухней, санузелом и балконом-террасой (сушилкой для белья) при входе. Такое планировочное решение позволяло сочетать две формы заселения в здании: для семейных — квартиры, для одиноких и малосемейных — общежитие, и при этом отвечало актуальной идее того времени, связанной с коллективизацией быта.

Не менее интересными сооружениями данного комплекса являлись и общественные здания, выполненные также в стиле конструктивизма и служащие композиционными акцентами застройки. Клуб «Гигант» (построенный в 1931—1934 гг. по проекту архитектора И.И. Князева) — главный элемент рассматриваемого комплекса. Первоначально он возводился как звуковой кинотеатр, но в 1936 г. был реконструирован, в частности расширена сцена, в дальнейшем надстроили клубные помещения. Угловое расположение клуба на пересечении двух улиц: Гражданской (проспекта Октября) и проспекта Шмидта (проспекта Ленина) — предопределило композицию здания. Мощный куб актового зала подчеркивает вход в здание и закрепляет угол пересечения улиц. Масса угла облегчена угловым окном, а сам куб опирается на тонкие железобетонные столбы, квадратные в плане. Активным элементом здания является угловой карниз. Решенный в виде простой плиты прямоугольного очертания, подчеркивающей горизонталь фасада и лент оконных проемов, угловое решение входа, он зрительно отделяет массу нависающего объема куба от входной зоны. В 1963 г. была осуществлена реконструкция клуба, в том числе частичная надстройка второго этажа, которая существенно не повлияла на облик здания. В целом двухэтажное здание клуба отличается гармоничностью пропорций, монументальностью и выразительностью образа.

Другое здание комплекса — фабрика-кухня (1933 г.) — также гармонировало с окружающей архитектурной средой и являлось вторым по значению общественным центром жилого комплекса РАК после клуба «Гигант». Расположенное по проспекту Шмидта (пр. Ленина), оно было несколько сдвинуто в глубину квартала относительно красной линии застройки, что позволило сформировать свободное пространство перед ним и выделить его из контекста строчной застройки проспекта. Объемно-пространственное решение фабрики-кухни представляет собой композицию, состоящую из трех объемов: основного корпуса с обеденными залами, производственного и складского. Фасады здания также отражают концепции наиболее передового в те годы архитектурного стиля: используются большие площади остекления на фоне гладких стен, геометрически правильные объемы, горизонтальные и вертикальные ленты окон. Характерными являются основанные на мощных консолях балконы, перекрытые железобетонными козырьками на тонких опорах. В целом композиция здания была построена на соотношении элементов, имеющих различное структурно-пластическое решение, а так же на противопоставлении глухих плоскостей стен и проемов. Это создает выразительный светотеневой контраст, усиливающий градацию основного и второстепенных объемов здания и их элементов.

К 1930-м гг. в стране постепенно изменился социально-культурный контекст. В практике советской архитектуры все очевидней стала ощущаться коренная переоценка ценностей в архитектуре, связанная с акцентированием роли традиций в формировании образных характеристик архитектуры. Начала звучать более резкая критика монотонности и бедности облика рядовых жилых построек, отдельных общественных зданий. На общем фоне улучшения жизни нарочитый аскетизм многих архитектурных решений казался неуместным, прежний язык архитектуры не мог отображать задач нового идеологического звучания. Все конкретнее обозначалась ориентация на освоение классического наследия, в котором многие видели огромный арсенал отто-

ченных веками композиционных принципов, приемов, форм, понятных и вызывающих глубокий пиетет в самых различных слоях общества.

На этом фоне переоценки ценностей началась работа над новым генеральным планом города «Большой Ярославль» (1928—1936), которая осуществлялась параллельно с разработкой проектов детальной планировки отдельных частей города. И, конечно, специалисты Гипрогора (Ленинградского филиала), рассматривая дальнейшее развитие города на запад и юг в секторе между Волгой и железной дорогой на Москву, не могли не уделить большое внимание дальнейшему формированию и преобразованию «соцгорода ЯрРАК». Тем более что по генеральному плану «Большого Ярославля» проспект Шмидта должен был превратиться в важнейшую магистраль центрального района, а новая промышленная зона продолжала строиться и расширяться. Предполагалось, что к 1938 г. ЯрРАК должен был достигнуть своей полной производственной мощности, соответственно к этому времени число трудящихся должно было возрасти с 12000 (в 1934 г.) до 30000 человек. Поэтому нужно было срочно и комплексно решать проблему обеспечения жильем трудящихся, привлекаемых для работы на комбинате. Кроме того, необходимо было внести корректировки в предыдущий проект застройки вследствие некоторых недочетов: строительство фабрики-кухни никак не было увязано с полукруглой площадью въезда на ЯрРАК, были допущены достаточно случайные постановки новых зданий кинотеатра (клуба «Гигант») и школы ФЗУ. Сама комплексная жилая застройка до конца не была завершена, оставалось большое количество пустующих участков. При этом планировалось, что строительство должно было осуществиться в три этапа и окончательно завершиться в 1942 г. [3].

Новый проект застройки данной территории, разработанный под руководством Н.В. Баранова (архитектор В.А. Гайкович, инженер-экономист З.Ф. Богомолова), является ярким примером, демонстрирующим, какие тенденции времени накладывали свой отпечаток на архитектурное решение, каковы были приоритеты при его создании и реализации. В октябре 1934 г. был создан эскизный проект, а в ноябре 1934 г. тем же авторским коллективом был разработан технический проект застройки первой очереди ЯрРАК на 1935 г., который предполагал размещение новых четырех-, пятиэтажных зданий на участках, свободных от застройки, границами которых являлись: с севера — проспект Шмидта, с юга — пробиваемый новый проезд, отделяющий спиртоводочный завод, с другой стороны — улицы Гражданская и Республиканская. Новые жилые дома, подобно существующим, проектировались квартирного типа с использованием первых этажей под общественно-бытовые учреждения, магазины, парикмахерские, были также запроектированы общежития типа коммунальных квартир (пяти-, семикомнатные). Параллельно предусматривалась частичная реконструкция существующих жилых домов в стиле конструктивизма, возведенных в период 1929—1934 гг., чтобы изменить характер их архитектуры, связать общей архитектурной стилистикой со вновь выстраиваемыми зданиями в неоклассическом стиле, и создать единый архитектурно-планировочный ансамбль района. В задачи управления капитального строительства резинокомбината входили следующие мероприятия: полное архитектурное оформление проспекта им. Шмидта на участке от реки Волги до кинотеатра «Гигант», включая фабрику-кухню и

здание школы семилетки на фибролитовом поселке; застройка разрывов между торцами; создание угловых архитектурных акцентов, уничтожающих монотонность «равноэтажности» зданий; объединение одинаковых смежных домов в одно целое, путем введения композиции встроек, богатых арок, порталов, с созданием богато оформленных въездов; учет архитектуры вновь возводимых домов; создание максимального разнообразия в решении фасадов. Осуществление этих задач планировалось разбить на два этапа и выполнить за два года. Вначале — полное оштукатуривание домов с максимальными капитальными изменениями поверхностей стен, отверстий в них и рельефа; повышение входных дверей и изменение формы и размеров оконных проемов (отказ от ленточного остекления лестничных клеток, уменьшение размеров жилых окон), изменения архитектурного облика угловых лоджий, изменение карнизов в сторону их обогащения с устройством парапетов, решеток, замена плоских крыш стропильной. Следующий этап включал в себя генеральную реконструкцию всего проспекта со встройками в разрывах между домами, надстройку угловых частей домов. При этом реконструкция не должна была нарушить нормальную жизнь проживающих в этом жилом фонде. Стоимость реконструкции была признана невысокой, общие затраты составляли 2 млн 400 тыс. р., из которых стоимость первой очереди была 1 млн 800 тыс. р. и второй очереди — 600 тыс. р. Встройки в разрывах давали дополнительно 1130 м² жилой площади при общей кубатуре 11798 м³ и 2856 м³ декоративной кубатуры. Вся архитектурная композиция была разработана в кратчайшие сроки молодыми талантливыми советскими архитекторами Виноградовым и Власовым (Гипрогор, Ленинград) [1].

Дополнительно в данном районе предполагалось строительство двух школ, поликлиники, двух яслей (на 83 и 102 ребенка), а также двух детских садов (на 90 и 120 детей). Детские учреждения должны были располагаться в отдельностоящих зданиях, ориентированных на юго-восток, территория которых выделялась в самостоятельные полосы с необходимыми открытыми площадками для игр, физкультуры и площадками с навесами. В каждом квартале предусматривались квартальные магазины, столовая с клубом-примитивом, размещаемые на первых этажах жилых зданий, а также самодеятельные прачечные — в их подвальных помещениях. Физкультурные площадки, площадки отдыха для населения и большое количество зеленых насаждений в виде газонов, кустарников и высокоствольной растительности должны были также обогатить инфраструктуру каждого квартала с декоративной и оздоровительной целью.

Проектом детальной планировки была произведена дифференциация всех магистралей, улиц, а также проездов и бульваров. Среди них выявлены магистрали интенсивного движения: проспект Шмидта, улицы Советская и Гражданская, остальные были отнесены к проездам-бульварам, в том числе прогулочным парадным или к простым жилым улицам. В соответствии с этой классификацией была досконально продумана система их организации, благоустройства и озеленения, а также произведена увязка с общественным транспортом — существующими трамвайными линиями. Таким образом, новый проект стал проектом своеобразного «дооформления» наполовину застроенных территорий проспекта Шмидта и прилегающих к нему территорий. Он учел и устранил недостатки предыдущего проекта, а также связал в

единый архитектурно-планировочный комплекс значительную часть города, решив не только чисто утилитарную проблему — строительство необходимого количества жилья, но и попытался сделать новую среду более комфортной, удобной для проживания населения и эстетически более полноценной. Здесь особенно важно подчеркнуть, что работа над этим проектом осознавалась как работа над ансамблем.

Вторая очередь строительства, рассчитанная на период с 1937 по 1938 г., должна была продолжить линию дальнейшего оформления кварталов в соответствии с разработанным планом, были сформулированы проектные задания на застройку новых жилых кварталов ЯрРАК и составлены их эскизные предложения. В этот же период был разработан проект важного градостроительного узла, объединяющего промышленную и селитебную застройку этого района города и оформляющего главный вход-въезд на территорию резинокомбината. Это — большая парадная площадь со зданием заводоуправления ЯрРАК, которая должна была стать самым главным композиционным центром «соцгорода». А третий период был посвящен не только новому строительству, но и комплексной реконструкции существующего капитального фонда [4].

Многое из задуманного было выполнено, в частности построены новые жилые здания, окончательно оформившие большие куски магистралей, «детские очаги», благоустроены значительные отрезки бульваров, улиц, дворов. Но далеко не все планы были реализованы. Не хватало опыта, смена руководства архитектурной мастерской в 1938 г., маломощность местной проектной организации, и, наконец, все ощутимее нависающая угроза войны привели к нарушению отдельных положений застройки «соцгорода ЯрРАК». Но несомненно, что строительство «соцгорода ЯрРАК» положительно отразилось на дальнейшем проектировании и строительстве в Ярославле. Городской квартал стал рассматриваться как законченное архитектурное целое. Идея города как системы, связанная с принципом ансамблевости застройки, начала распространяться не только на общественные центры и градостроительные узлы, но и на жилые массивы. Прогрессивные тенденции жилого комплекса РАК далеко перешагнули свое время и доказали их состоятельность при решении комфортной и самодостаточной жилой среды на протяжении многих десятилетий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лерман А.С. На бывшем городском валу (Обсуждаем проблемы большого Ярославля) // Северный рабочий. 1935. № 227 (4921). С. 3.
2. Рыбинский филиал ГАЯО. Ф. Р-1526. Оп. 1. Д. 13.
3. Материалы Государственного архива Ярославской области ГАЯО. Ф. Р-2018. Оп. 3. Д. 10.
4. Материалы Государственного архива Ярославской области ГАЯО. Ф. Р-2018. Оп. 7. Д. 39.

**ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА.
УПРАВЛЕНИЕ ИНВЕСТИЦИОННО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ**

УДК 711.113

Н.Г. Юшкова

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ
НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ СТАНОВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ И ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМ РАЗВИТИЕМ**

Сформулированы методологические основы разработки документов градостроительного зонирования, обоснована необходимость их внедрения в практику управления градостроительной деятельностью.

The authors established a methodological basis for developing the documents on urban planning zoning, and proved the necessity of their implementation into urban planning management practice.

Начало XXI в. в России ознаменовано кардинальными социально-экономическими преобразованиями в обществе. Вследствие этого возникла необходимость соответствующих изменений в системе управления градостроительной деятельностью. Проблемы управляемости градостроительных систем на различных уровнях их организации становятся приоритетными. Появляются первые теоретические исследования, а также научно-проектные поисковые разработки, посвященные этой проблематике. Однако в профессиональной среде их научная ценность не становится общепризнанной, а в практической деятельности они с трудом находят применение. Эта ситуация объясняется преобладанием классических, десятилетиями устоявшихся тенденций в решении задач управления в области градостроительства над инновационными подходами.

Наряду с этим в современном отечественном градостроительстве на протяжении целого десятилетия по-прежнему отсутствуют эффективные приемы управления градостроительной деятельностью. Поэтому все большую актуальность приобретает проблема разработки научно-методических основ градостроительного регулирования, соответствующих условиям рыночной экономики. В ее решении ведущим становится *управленческий подход*, основанный на использовании в практической деятельности градостроительных документов нового типа.

Основные направления совершенствования градостроительной документации, как отечественной, так и зарубежной, отражены в ряде исследований (см. например, работы Ю. Алексеева, Д. Донцова, А. Крашенинникова, И. Смоляра). Документация, предлагаемая исследователями, достаточно раз-

нообразна. Но вместе с тем доминирует принцип сочетания «рыночного» по форме характера использования территории и «социалистического» по содержанию управления градостроительной деятельностью. Несмотря на то что новые типы документации стали активно внедряться в градостроительную практику, по-прежнему дискуссионными остаются вопросы поиска компромисса между правовыми, экономическими, социальными и технологическими требованиями в процессе ее разработки.

Новое качество документов, возникших на этапе становления рыночной экономической системы, заключалось в их способности правовыми способами регламентировать отношения субъектов градостроительной деятельности, предоставляя им четкие и определенные экономические гарантии. Формы и содержание этих документов первого десятилетия экономических реформ были различны, но наибольшее распространение получили *правила застройки и схемы зонирования*.

Основное отличие этих градостроительных документов от всех прочих заключалось в наделении их *правовым статусом*, установлении обязательности исполнения в полном соответствии с целостностью концепции градостроительного развития территории, а также возможности принятия управленческих, экономических и проектных решений на принципиально новой основе каждым субъектом градостроительной деятельности. Так, например, в рамках проекта генерального плана Москвы на период до 2020 г. был разработан комплекс инновационных положений, включающих в себя функциональное, строительное и ландшафтное зонирование.¹

Принятие Градостроительного кодекса РФ 1998 г. свидетельствовало о переходе к правовым отношениям в градостроительстве: правила застройки получили законодательную основу в качестве нормативного правового акта. Благодаря этому в отечественном градостроительстве появился механизм градостроительного регулирования территории. Впервые в новейшей истории нашей страны градостроительная документация наполнилась новым правовым и управленческим смыслом: наличие правового режима в градостроительной документации обеспечивало установление общих (равных) для всех субъектов градостроительной деятельности прав по использованию и изменению недвижимости и, прежде всего, земельных участков. Признание юридической силы этого документа означало начало становления нового типа правоотношений участников градостроительной деятельности, сочетающего в себе необходимость реализации целенаправленной государственной политики в области градостроительства и возможность практической реализации различных инициатив. Правила застройки стали служить определенной правовой гарантией инвестиционных вложений, так как в них были строго регламентированы действия, направленные на изменение состояния территории, и установлены требования, предъявляемые к субъектам градостроительной деятельности в соответствии с характеристиками территории.

¹ В схемах зонирования были установлены *параметры* использования отдельных планировочных частей территории города, что позволяло рассматривать его как современный эффективный инструмент градостроительного регулирования. Именно «параметрированное» зонирование и послужило своеобразным прототипом современных градостроительных регламентов.

В Градостроительном кодексе РФ 2004 г. логически развиваются положения, касающиеся правил землепользования и застройки, уточняется их место и роль в системе градостроительной деятельности, определяются направления совершенствования процесса их разработки. В этом законодательном акте впервые обозначена сущность правил как *документа градостроительного зонирования*.² Абсолютным новшеством кодекса стало превращение этого вида документа в своеобразное связующее звено, осуществляющее взаимосвязь остальных групп градостроительной документации: территориального планирования и планировки территории³ и обеспечивающего преемственность градостроительных решений. Иными словами, правила землепользования и застройки содержат в себе многие важные положения градостроительной документации всех уровней, в том числе и из других отраслей права. Этой спецификой и обусловлены особенности разработки документов такого типа.

Одним из основных преимуществ правил землепользования и застройки стала возможность снятия большей части правовых и экономических проблем, связанных с поиском ресурсов пространственного развития территории. С разработкой правил возникает новый объект градостроительной деятельности (территория муниципального образования), что позволяет субъектам градостроительной деятельности достаточно быстро и эффективно реагировать на динамику изменения состояния рыночных процессов. Города, в зависимости от интенсивности изменений рынка недвижимости, испытывают потребности в больших или меньших территориальных ресурсах для целей последующего развития. Вследствие того, что территориальные ресурсы города, наиболее привлекательные для реконструкции и размещения застройки, не бесконечны, методом зонирования выделяются территории, способные по совокупности факторов служить ресурсами пространственного развития. Не прибегая к градостроительному зонированию, практически невозможно выявить резервы использования территории. Именно поэтому правила землепользования и застройки призваны служить документальным основанием для принятия градостроительных решений, увязывая ресурсный потенциал территории и перспективы ее развития (И.М. Смоляр, З.Н. Яргина).

С разработкой этого вида градостроительной документации формируется новый алгоритм, основу которого составляют цели социально-экономической направленности. В этом случае гармонизируются интересы общества, частного капитала, законные права граждан, с одной стороны, и условия для привлечения инвестиций, с другой. Правила землепользования и застройки становятся по сути единственным документом среди всего многообразия документального обеспечения градостроительной деятельности, посредством которого оказывается регулирующее воздействие на поведение участников градостроительных правоотношений. Из этого следует необходимость уточнения *структуры*, правил, а так же требований, предъявляемых к их содержанию.

² Правила землепользования и застройки пока единственный вид документа зонирования, признанный законодательно, что не исключает возможности появления новых видов в будущем.

³ В отличие от Градостроительного кодекса РФ 1998 г., в котором правила застройки были представлены как рядовой документ в системе градостроительной деятельности, в Градостроительном кодексе РФ 2004 г. содержится новое прочтение правил, им отводится особая роль, устанавливается последовательность их разработки и методологическая направленность выделения территориальных зон.

Градостроительный кодекс устанавливает компактную и целостную структуру правил землепользования и застройки, в которой выделяются три отдельных компонента — блока самостоятельных нормативно-правовых документов:

порядок применения правил землепользования и застройки и внесения в них изменений;

карта градостроительного зонирования;

градостроительные регламенты.

Их объединяют общие принципы формирования, сфера применения, содержание, стилистика, и в то же время отличают содержание материалов, образующих каждый блок, порядок применения правил землепользования и застройки и внесения в них изменений.

В кодексе достаточно четко изложены общие положения разработки, согласования и утверждения правил, их структура, требования, предъявляемые к содержанию документов. В то же время нельзя не отметить некоторую схематичность процедуры, недостаточную полноту и глубину представляемого в нем материала. Эти недостатки, по всей видимости, лишь следствие того, что градостроительный кодекс является правовым актом, не предполагающим детализировки представленных положений. Но вслед за этим неизбежны проблемы, возникающие перед разработчиками правил землепользования и застройки, заключающиеся в уточнении их содержания.

Особую важность данный аспект приобретает на региональном уровне. В условиях, когда не существует утвержденных на федеральном уровне форм предоставления конечных материалов, возможны излишне свободные, не регламентируемые рамки их разработки, что обуславливает возможность возникновения разного рода проблем, таких, например, как разночтения в практической интерпретации законодательных положений.

В частности, согласно логике Градостроительного кодекса, основным элементом (документом) правил землепользования и застройки является *карта территориального зонирования*. Основное назначение данного документа заключается в придании территориальным зонам одновременно и функционального и правового характера. Этими положениями и ограничено описание содержания карты зонирования, трактовки которого могут разниться в зависимости от многих факторов.

Ввиду отсутствия утвержденных принципов и форм разработки правил землепользования и застройки в целом и карты градостроительного зонирования, в частности, актуальными становятся *вопросы методологии градостроительного зонирования*.

Среди основных *принципов* градостроительного зонирования выделяются требования сочетания общественных и частных интересов и обеспечения права человека на значительное улучшение качества жизни, а также ответственность органов всех ветвей власти за принятие градостроительных решений. Из данных принципов вытекают *цели* градостроительного зонирования, включающие осуществление комплексной оценки состояния среды жизнедеятельности с учетом современных условий и требований; определение приоритетов государственной поддержки развития территориальных зон; контроль и надзор за соблюдением нормативов, правил, требований безопасности; установление гарантий защиты прав и интересов всех правообладате-

лей недвижимости. Для достижения обозначенных целей уточняются *задачи* градостроительного зонирования, которые должны осуществляться координировано с прочими задачами управления.⁴ Только в этом случае может идти речь о результативности градостроительных управленческих решений.

Зонирование, определяя границы действия правового режима территории, позволяет эффективно регулировать градостроительные преобразования на территории. Это становится возможным во многом благодаря тому, что градостроительная деятельность регламентируется и приводится в соответствие с финансовыми ресурсами (наличием инвестиционного интереса реальных застройщиков).⁵ Упорядочение градостроительной организации территории осуществляется преимущественно на средства частных инвесторов. Потенциальный застройщик вынужден, подчиняясь требованиям градостроительного зонирования, разрабатывать схемы (проекты) межевания, тем самым значительно снижая долю расходов бюджетных средств муниципалитета в решении городских проблем. Благодаря градостроительному зонированию активизируются процессы на рынке недвижимости. Так, земельные участки, подготовленные для вовлечения в оборот, могут быть сформированы только в результате межевания территории. Закономерна последующая активизация проведения аукционов по продаже сформированных земельных участков или права их аренды, а в бюджет муниципального образования будут поступать значительные денежные средства. Кроме того, ожидается стабильное пополнение доходной части бюджета в результате продажи права аренды земельных участков, а также от взимания налогов за землю, часть средств которого может быть направлена на разработку градостроительной документации. Инвестиционные ресурсы представляют собой лишь средство достижения конечной цели — активизацию градостроительной деятельности в публичных и частных интересах.

Правила землепользования и застройки значительно расширяют круг потенциальных участников градостроительной деятельности, практически, исключая действие субъективного фактора. Они меняют сложившееся представление о роли собственника в градостроительстве. Благодаря действию механизма градостроительного зонирования переход земельного участка от одного собственника к другому не влечет за собой прекращения градостроительных процессов на нем, а даже, напротив, способен интенсифицировать процессы преобразований.

Практическим результатом градостроительного зонирования является ранжирование территории города на различные территориальные зоны с формированием границ этих зон, наделенных дифференцированным правовым статусом. При этом наряду с установлением некоторых видов стимулирования градостроительной деятельности, могут вводиться и определенные

⁴ Эти задачи достаточно разнообразны и корреспондируются, наряду со сферой градостроительства, с прочими видами управленческой деятельности, такими как государственный учет, техническая инвентаризация, регистрация прав на недвижимое имущество и сделок с ним, статистическая отчетность; использование и охрана земель, охрана окружающей среды, культурного наследия, санитарно-эпидемиологического надзора, пожарная безопасность, налоги и сборы.

⁵ Эти вопросы являются предметом научного интереса автора достаточно давно (см. например: Юшкова Н.Г. Девелопмент в системе государственного управления инвестиционной деятельностью в эпоху постиндустриального общества / Н.Г. Юшкова, Д.Г. Донцов // Вестн. ВолгГАСУ. Сер.: Гуманит. науки. 2004. Вып. 5 (11). С. 25—34; Юшкова Н.Г. Регулирование имущественных отношений на рынке недвижимости / Н.Г. Юшкова, Д.Г. Донцов // Вестн. ВолгГАСУ. Сер.: Гуманит. науки. 2005. Вып. 6 (15). С. 43—50.

ограничения на отдельные виды землепользования. Тем самым создаются объективные предпосылки для регулируемого градостроительного освоения, использования, реконструкции территории посредством как повышения, так и намеренного понижения привлекательности использования отдельных земельных участков, что также позволяет выявить территориальные объекты, необходимые для реализации публичных интересов.

Градостроительное зонирование предусматривает использование специфического инструмента, позволяющего определять *количественные характеристики* в форме перечня видов разрешенного использования, предельных размеров и параметров строительства на указанных участках. Именно эти характеристики способны дифференцировать огромную нерасчлененную массу городской застройки, выявляя наиболее перспективные для градостроительного использования участки. Таким образом формируется экономическая основа зонирования. Вследствие этого правила землепользования и застройки в современных условиях могут быть признаны специфическим *регулятором*, интенсифицирующим не только градостроительную, но и социально-экономическую деятельность субъектов градостроительной деятельности, позволяющим определять приоритеты инвестирования целенаправленно и мотивированно, согласуясь с интересами инвестора и сохраняя градостроительную целостность территорий городских и сельских населенных пунктов.

Понимание правовой сущности процедуры градостроительного зонирования позволяет раскрыть содержание основного компонента правил землепользования и застройки — карты зонирования. В Градостроительном кодексе определено, что карта градостроительного зонирования является документом, фиксирующим границы территориальных зон. Но в то же время не уточняются принципы их выявления и особенности формирования. Однако вопросы практической разработки карты, а также поиск методического инструментария, который бы позволял свести ошибки разработчиков к минимуму, остаются одними из наиболее сложных и дискуссионных. Для этого необходимо учитывать *комплекс градостроительных требований*, влияющих на процесс выявления и закрепления территориальных зон.

Одним из таких требований является *непрерывное условие преемственности* документов зонирования по отношению к положениям территориального планирования. В карте градостроительного зонирования территории конкретизируются направления реализации государственной пространственной политики.⁶ Разработка карт зонирования основывается на прогнозах социально-экономического развития территории, сведениях о состоянии среды жизнедеятельности, инженерной, транспортной и социальной инфраструктурах, инженерной защите территорий, инженерно-геологической изученности и экологической обстановки, объектах культурного и природного наследия, оценочных зонах.

Другим требованием является *координация* управленческих (градостроительных и экономических) решений, которая предусматривает определение видов территориальных зон, исходя из соображений баланса государственных, общественных и частных интересов. Карта зонирования в графическом

⁶ Данные направления определяются на уровне разработки документации территориального планирования, исходя из перспектив социально-экономического развития территорий, их природно-климатических условий, демографических, исторических, культурных и иных особенностей.

выражении представляет собой схему дифференцированного градостроительного использования (освоения), в которой каждой из зон соответствует определенный перечень условий. Эти условия прозрачны и доступны каждому участнику градостроительной деятельности. Тем самым создаются предпосылки перехода от прямого административного управления к эффективному косвенному экономическому регулированию процесса взаимодействия участников градостроительной деятельности.

К наиболее важным требованиям, предъявляемым к процессу разработки карт градостроительного зонирования, относится *прогнозирование* показателей использования территории в сравнении с существующим состоянием. Необходимость уточнения данного положения исходит из того, что в градостроительной практике разработки документов подобного рода довольно часто присутствует формальный подход, вследствие которого территория города превращается в подобие «лоскутного одеяла» функций. Они во многих случаях не образуют в совокупности целостной картины рационального использования территории и тем более не предполагают системного подхода в определении территориальной стратегии развития. Все это существенно препятствует реализации целей управления градостроительной деятельностью, игнорируя тем самым инновационные положения градостроительного кодекса РФ, сводя к минимуму его завоевания в этом вопросе. Установление прогнозных технико-экономических показателей использования территории само по себе не является новацией. И в то же время в контексте рассматриваемых вопросов этот подход принципиален: выделяя зоны определенного градостроительного использования, мы тем самым задаем их перспективные экономические показатели, которые в совокупности определяют как градостроительный, так и *экономический вектор развития территории*.⁷

Только такое, системное, видение проблем внедрения в практику управления градостроительной деятельностью новых видов документации позволит им служить инструментом интенсификации инвестиционных процессов на территории, способным оказывать прямое влияние на эффективность социально-экономических реформ в обществе.

Основным принципом разработки документов градостроительного зонирования, таким образом, становится обязательность для всех, без исключения, участников градостроительной деятельности положений, зафиксированных в этом современном виде градостроительной документации. Благодаря этому процесс управления градостроительной деятельностью способен стать объективно регламентируемым, без включения искусственных, принудительных административных рычагов. При этом правила землепользования и застройки могут служить информационной системой, позволяющей органам архитектуры и градостроительства осуществлять управление градостроительной деятельностью на уровне, соответствующем общепринятым международным стандартам.

© Юшкова Н.Г., 2006

⁷ В карте зонирования правил землепользования и застройки устанавливаются точные параметры (по видам и по величине) и условия градостроительного использования территории, определяя тем самым принципы их реализации на практике. Благодаря наличию строгих регулирующих мер правила землепользования и застройки рассматриваются как документ, гарантирующий принятие эффективных как градостроительных, так и экономических решений правообладателями недвижимости.

УДК 711.4:725.18

Е.Е. Лаверушин, А.Н. Кабанов, Н.Ю. Жданкин

**ПОСТРОЕНИЕ АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
МАТЕРИАЛЬНОЙ СРЕДЫ СОЕДИНЕНИЙ ПОСТОЯННОЙ ГОТОВНОСТИ
(НА ПРИМЕРЕ 76-й ВОЗДУШНО-ДЕСАНТНОЙ ДИВИЗИИ)**

Изложены ключевые проблемы градостроительного механизма размещения войсковых соединений постоянной готовности — основы будущих Вооруженных сил РФ. Определены основные направления формирования подготовки территории страны к обороне как многокомпонентного процесса государственного масштаба, который требует огромных затрат всех ресурсов нации, включая интеллектуальный потенциал.

The paper gives an account of problems connected with urban-planning mechanism of placement of standing alertness army troops, the core of the future Armed Forces of the Russian Federation. The paper outlines the key directions of work aimed at preparation of the country for defense as a state-importance large-scale multi-component process requiring tremendous expense of all national resources, including intellectual potential.

Сегодняшнее состояние фонда служебного жилья военнослужащих по оценкам военных специалистов не отвечает количественным требованиям, а качество не предоставляет возможность адекватно противостоять агрессивной внешней среде. Значительное различие в функционировании военных и гражданских поселений не позволяет искусственно перенести накопленный теоретический и практический опыт их работы в военную область. Сбои намеченного эксперимента в 76-й ВДД (о чем свидетельствуют сведения средств массовой информации) подтверждают низкую эффективность существующего подхода к архитектурному обеспечению в обустройстве войск.

В градостроительной теории и практике народного хозяйства принято различать два уровня расселения: локальный (или групповой) — характеризуется интенсивными ближними связями (в пределах 1-2-часовой доступности мест массового посещения), представляет внутриобластную группу административных районов; региональный — характеризуется экстенсивными ближними связями, представляет собой область или группу областей в виде экономического подрайона.

Основным уровнем системного расселения является локальный, на котором происходит формирование групповой системы населенных мест. В условиях дислокации 76-й ВДД структуры функционируют как групповые, так как строятся на принципах системы-комплекса. Тем самым размещение соединения ВДВ как структура градоформирования нуждается в выявлении того потенциала, который заложен в ее группах населенных мест. В их локальных границах, благодаря активным межселенным контактам, может быть достигнут в перспективе нормируемый уровень общественного обслуживания и возможность широкого профессионального выбора для всего населения, живущего в различных населенных местах. Для этого необходимо, как считают специалисты: 1) социально-экономическая база центрального города была достаточной для удовлетворения потребностей не только его жителей, но и населения всех тяготеющих групп; 2) хорошее развитие транспортных связей [1, 2].

Групповое построение дислокации войск гарнизона Пскова составляет сущностную, коренную ее характеристику. Подвижность жителей военных объектов в пределах Псковского гарнизона с характерными служебными, трудовыми, культурными и иными целями отражает повседневную жизнедеятельность частей и подразделений.

Вследствие перехода Пскова от экстенсивного пути развития к интенсивному, с повышением уровня технических и технологических возможностей, при растущей доле частного капитала в освоении городских территорий, существует дефицит свободных земель для строительства в черте города, что остро выявляет проблемы рационального использования муниципальных территорий, возможность регулирования и прогнозирования их будущего состояния. Поэтому в Пскове активно изыскиваются территориальные резервы, к которым с полной уверенностью можно отнести и территории военных городков, которые в силу ряда причин не эксплуатируются вообще или находятся в состоянии минимальной сохранности и обеспечения.

Интеграция территорий 76-й ВДД в планировочную структуру Пскова с закреплением пространственных границ военного городка транспортной и инженерной инфраструктурой позволяет констатировать факт применения приемов планировки военных городков во времена СССР. Жилые территории возникают не там, где лучше для их размещения, а там, где была возможность быстрее обеспечить их инженерной инфраструктурой. А это не только коммуникации, но и многочисленные обслуживающие сооружения и установки: теплоцентрали, станции водоочистки, насосные станции и др. [3]. По мнению специалистов, самой большой бедой нашего градостроительства на сегодня стали последствия выработанных нами же шаблонов пространственной организации жилой среды, базирующихся на узаконенной модели микрорайон — жилой район, усугубляющейся применением однотипной застройки в 5...9 этажей в разных соотношениях [4].

Для групповой системы военных объектов, сформированных в гарнизон, проектирование не ведется. В гражданской практике этому уровню соответствует проект районной планировки для районов и регионов [5]. Между тем увязка формирования военной инфраструктуры по операционным направлениям потребует уже в скором будущем таких разработок, которые, основываясь на специальных методиках, обеспечат рациональное расходование денег налогоплательщиков, вкладываемых в развитие военной инфраструктуры страны. Основным критерием для районирования, по мнению В. Аникеева и В. Владимирова, должны служить сформировавшиеся групповые системы населенных мест, агломерации, другие территориальные формы расселения, объединенные социальной, транспортной и инженерной инфраструктурой, системой природопользования [6].

На уровне военного округа могла бы воплотиться схема региональной планировки в увязке с региональной схемой дислокации, которая исключала бы авторитарные решения при размещении войск, позволила бы с участием градостроителей решить проблемы культурно-бытового обслуживания гарнизонов. Схема должна реализовываться на основе опорного каркаса комплекса дислокации войск. В масштабе России генеральная схема дислокации стала бы наиболее экономичным способом решения обустройства войск, формирования военной инфраструктуры страны и развития городов.

Мы так привыкли к термину «развитие города», что воспринимаем его как приращение количественных и качественных характеристик [7]. Степень динамичности территорий определяется количеством изменений за обусловленный промежуток времени и количеством содержащих в них неустойчивых средовых компонентов.

И здесь важно отметить необходимость учитывать динамичный характер развития жилой зоны 76-й ВДД. Это выявляется из очередности строительства: перевод значительного числа объектов с системой культурно-бытового обслуживания в перспективное строительство дает возможность предпринять эффективные шаги по трансформации планировочной структуры в направлении улучшения среды обитания уже на стадии реализации проекта.

К наиболее значимым российским факторам трансформации планировочной структуры города можно отнести: развитие рыночных отношений, возникновение новых форм собственности, изменение компетенции различных уровней власти. Целенаправленное проведение трансформации планировочной структуры города в соответствии с общими прогрессивными тенденциями позволяет влиять на укрепление их экономической базы [8].

Практика развития советских Вооруженных сил показала печальный пример отсутствия какого-либо прогнозирования в социальном обеспечении военнослужащих и членов их семей. Научный подход диктует настойчивую необходимость применения градостроительного прогнозирования в условиях формирования соединений постоянной готовности, введения схем дислокации сети опорных военных баз и районных планировок, привязывающих их к местам урбанизированного каркаса государства и др.

Подчеркнем то, что когда говорится об уровне развития комплекса дислокации, практически всегда идет разговор не о парке вооружения и техники (это всегда обустроено), не о казарменной зоне и личном составе срочной службы (они худо-бедно, но также обустроены), а о населении военного городка, жители которого не имеют нормальной сферы культурно-бытовых услуг. Ее мощности не хватает для обеспечения нормативных условий по развитию всей структуры обслуживания сферы отдыха и быта. Поэтому показатель обеспеченности жильем и услугами становится приоритетным как для определения уровня развития гарнизонного комплекса в масштабе военного округа, так и его строительных частей и подразделений [9].

Чем динамичнее развивается территория, чем больше она обладает постоянными элементами, тем сложнее ею управлять и делать долгосрочные прогнозы ее развития. Этот постулат вполне относится к городскому строительству Пскова. Активное развитие 4-го и 7-го микрорайонов по правой стороне Рижского проспекта свидетельствует о довольно устойчивом росте спроса на новое жилье, что в свою очередь заставляет муниципальные органы власти развивать инфраструктуру и сферу услуг, привлекая частный капитал.

Транспортные связи с центром города сформированы с перспективой дублирования Рижского проспекта, что позволяет сократить время перемещения в другие концы города. Ориентированность развития перспективного строительства в направлении Гдова позволяет утверждать, что транспортные узлы и развязки Рижского проспекта приобретают также и военно-оперативное значение, так как позволяют осуществлять переброску войск по кратчайшему расстоянию на соседнее Санкт-Петербургско-Выборгское операционное направление.

Но для дефиниции динамики жилой территории соединения ВДВ, закреплённой в границах улиц Юбилейная, Шестака, Генерала Маргелова, необходимо опираться на эволюционный подход развития планировочной структуры Пскова, ориентированной в 2000—2002 гг. в направлении Рижского шоссе. Это заключается в определении основных направлений транспортных коммуникаций и узлов сопряжения, наращиванием инженерной инфраструктуры, установлением границ развития города.

Ключевой задачей является определение циклических изменений, происходящих в развитии городских территорий Пскова, и здесь важно определить амплитуду колебания разных иерархических уровней и найти взаимосвязь и взаимодействие этих структур. Только исторический анализ может показать особенности, выявить закономерности развития той или иной территории. Определение периодизации, а так же переход города на новый виток развития связаны с преодолением городом и его отдельными территориями различных порогов: структурных, физических, функциональных, технологических и т.д.

Определение и ранжирование динамичных элементов в структуре Пскова и обособленных территорий 76-й ВДД позволяет составить единую матрицу с разнообразным набором типов, элементов территорий и соответствующим выбором режимов функционирования для каждого из них. Следовательно, на градостроительном уровне необходимо четкое взаимодействие между местными и федеральными органами власти по размещению войсковых соединений, которое в данный момент отсутствует. В Минобороны РФ таких органов территориального и военного управления для согласования различных аспектов функционирования воинских контингентов в масштабе федеральных органов нет. Система КЭУ округов занимается всего лишь техническим ремонтом и эксплуатацией существующих систем жизнеобеспечения военнослужащих.

В рамках этого подхода необходимо создание прогностического блока, в том числе теории прогнозирования, как составной части теории любой деятельности. В современных условиях именно прогнозирование позволяет избежать многих ошибок в развитии теории, исключить тупиковые пути и значительно сократить затраты ресурсов. Военная составляющая городов существует не как нелицеприятный атавизм, она должна учитываться и развиваться по основным законам городского хозяйства.

Такое взаимодействие на любом административно-территориальном уровне должно конкретизировать отправные точки развития территорий, закреплённых за военным ведомством, определять основные векторы формирования планировочных структур, создавать органичные механизмы сосуществования новых жилых образований, внедрённых по велению времени в городскую ткань или опосредованно взаимодействующих с ней через элементы военной инфраструктуры.

Генеральная цель — рациональное планирование развития Пскова, с одной стороны, и его военная инфраструктура с генеральной целью — эффективной обороной его — с другой, совмещаются на уровне управления. Если один из элементов системы имеет свойства комплекса, то вся его структура по определению должна обладать этим качеством. Можно было бы считать это достаточным условием, если бы не менталитет специалистов, участвую-

щих в реализации генеральных планов городов, многие десятилетия абстрагирующихся от военной составляющей структуры города.

Военный фактор охватывает состояние и изменения в количестве, качестве организационной структуры, размещении и другие характеристики всех составляющих военной машины России, а также прогнозируемый уровень военных опасностей и угроз, возможные способы их нарастания, содержание, характер, средства вооруженной борьбы и взгляды противника на ее ведение.

Военные специалисты подчеркивают, что пространственные, количественно-качественные и прочие параметры и свойства размещения военной силы на территории достаточно устойчивы. Однако наступает момент, когда вся структура территориального размещения Псковского гарнизона и 76-й ВДД в частности, переходит в нестабильное состояние. Это означает, что один или несколько факторов меняются настолько, что она [структура] уже не способна без каких-либо количественных, качественных, организационных и других метаморфоз компенсировать с должным уровнем эффективности возмущающие воздействия внешних факторов.

Тем не менее, часто потенциал территории не соответствует динамическим характеристикам. Это приводит к неоднородности развития городских территорий [10], может негативно сказаться на их будущем состоянии. Поэтому с целью возможности применения по отношению к территориям с разными динамическими показателями различных мер воздействия, способствующих оптимизации из развития, предлагается ранжировать городские территории «военной направленности» по динамичности происходящих на них процессов. Наиболее динамичной является функциональная организация территории гарнизонов, которая в свою очередь приводит к изменениям в планировочной и композиционной структуре.

Под элементами планировочной структуры Пскова имеется ввиду: система улиц, образующих периметр жилой зоны 76-й ВДД, площадей и скверов, система природных ландшафтов, транспортная и инженерная инфраструктура (каркас). Элементы функциональной организации территории: селитебные районы Пскова, ориентированные по фронту застройки 76-й ВДД со стороны улицы Юбилейная, а также жилые территориальные образования, расположенные вдоль Рижского проспекта, включая торговую сеть и предприятия обслуживания, промышленные и рекреационные зоны. Композиционные элементы: коммуникационные узлы, транспортные оси, визуальные связи.

Ранжирование на подобные типы городских территорий позволит определить динамическое состояние каждого исследуемого участка и всего города в целом и сделать прогнозы на будущее, с тем чтобы выбрать оптимальный режим использования в настоящее время и регулировать процессы развития территорий по отдельным составляющим и в целом. Следовательно, на стадии концептуальных проработок развития территорий военных городков этот существенный момент позволит избежать негативных последствий принятия противоречивых решений о функционировании жилой среды военно-служащих.

Предложенные мероприятия необходимо закладывать на стадии разработки и утверждения основного градостроительного документа — генерального плана города. Генеральный план Пскова, представляющий собой синтез функционального зонирования и регламентов, есть проекция неких политик,

имплицитно вложенных в эти регламенты. Проведение в жизнь этих политик требует взаимодействия многих структур исполнительной власти, оперирующих, в частности, дифференциацией налогообложения, арендных ставок и платы за землю, а также другими имущественно правовыми рычагами, не находящимися в руках урбанистов. Ощущается острая нужда в уточнении и обновлении Правил застройки, их детализации и дифференциации по средовым зонам, причем не фрагментарно, а системно, и самое главное — в их возведении в ранг закона [9].

В качестве небольшого резюме следует констатировать, что одним из важнейших элементов регламентации формирования военной инфраструктуры служит «прозрачность» территории и ее объектов для культурно-градостроительной деятельности. Несмотря на принадлежность к силовым, «закрытым» ведомствам, военная инфраструктура «пуповиной» связана с телом города Пскова через инженерно-транспортные элементы, и это нельзя отрицать, дабы избежать социальных последствий средовых компонентов дислокации вооруженных сил.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матусов А.Л. Условия жизни и состояния здоровья участников полярных экспедиций. М. : Гидрометиздат, 1979. 232 с.
2. Останков В.И. Строительство Вооруженных сил: Вопросы теории и практики // Военная мысль. 1998. № 2. С. 22—25.
3. Давиденко П.Н. Проблемы формообразования ресурсосберегающей и экологически безопасной среды / П.Н. Давиденко, З.К. Петрова // Градостроительство в век информатизации : сб. науч. ст. Отделения градостроительства. М. : Едиториал, УРСС, 2002. С. 155—159.
4. Постнов В.П. Генеральный план и проблемы городского развития. Практические аспекты градостроительного проектирования / Градостроительство в век информатизации : сб. науч. ст. Отделения градостроительства. М. : Едиториал, УРСС, 2002. С. 151—154.
5. Владимиров В.В. Основы районной планировки / В.В. Владимиров, И.Н. Фомин. М. : Выс. школа, 1995. 223 с.
6. Аникеев В.В. Градостроительные проблемы совершенствования административно-территориального устройства / В.В. Аникеев, В.В. Владимиров. М. : Едиториал, УРСС, 2002. 120 с.
7. Рейбан Т.Я. Концепция генплана российского города переходного периода / Градостроительство в век информатизации : сб. науч. ст. Отделения градостроительства. М. : Едиториал, УРСС, 2002. С. 91—93.
8. Титова Н.Н. Градо-экономические основы развития городов / Градостроительство в век информатизации : сб. науч. ст. Отделения градостроительства. М. : Едиториал, УРСС, 2002. С. 70—73.
9. Бунин М.А. Градостроительная организация гарнизонного комплекса северо-западного региона / М.А. Бунин, В.И. Мухин. С-Пб. : ВИТУ, 2003. С. 348.
10. Моисеев С.С. Эволюция размещения и архитектурно-градостроительная организация в городах дальнего Востока : автореф. дис. ...канд. архит. М., 1987. 24 с.

УДК 711.113

Н.Г. Юшкова

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ РЕГЛАМЕНТОВ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ

Обоснована актуальность проблемы формирования теоретических основ регламентации в градостроительной деятельности.

The authors substantiated the urgency of developing a theoretical basis for urban planning activities.

Характерным признаком современного градостроительства является необходимость регламентации процессов пространственного преобразования территории, управляемость развития градостроительных систем. Целый комплекс проблем управления градостроительной деятельностью напрямую связан с применением положений градостроительного законодательства, лежащих в основе регламентирования. Практическая сторона этого вопроса в определенной степени освещена в Градостроительном кодексе РФ 2004 г. Однако теоретические аспекты регламентации градостроительной деятельности остаются не исследованными. В этой связи представляется актуальной проблема формирования теоретических основ регламентации в градостроительстве.

Регламентный подход как перспективное направление совершенствования градостроительной деятельности берет свое начало в «дореволюционном» периоде социально-экономического развития нашей страны, когда механизм государственного воздействия на градостроительные процессы был построен не по «правовому», а по «инструктивно-ведомственному принципу». В профессиональном смысле понятия «регламент» применительно к объектам градостроительной деятельности не существовало как такового. В то же время регламентирующие функции выполняли строительные нормы, правила и контрольные количественные характеристики, получившие широкое распространение во всех сферах деятельности.¹

Новым аспектом проблемы является взаимосвязь задач управления градостроительной деятельностью и формирования системы градостроительных регламентов. Градостроительные регламенты в их современном виде отражают принципиальные отличия, вызванные признанием международных принципов устойчивого пространственного развития территории [1].²

¹ Повышение значимости градостроительных регламентов в теории и практике градостроительства связано с социально-экономическими изменениями в общественном устройстве и совершенствовании законодательно-правовой системы. Так, в середине 1990-х гг. была разработана и утверждена «Целевая программа создания нормативно-методической базы государственного градостроительного кадастра РФ», в которой был сформулирован ряд задач по созданию единой системы градостроительных регламентов использования территории. Наиболее заметные разработки этих лет проводились в центре «Теринформ» ЦИИИП градостроительства М.Я. Вильнером, П.И. Себедашем, Н.И. Наймарком, В.В. Лившицем, Е.А. Розановой, Г.И. Ярославцевой.

² Территориальные изменения рассматриваются с позиций изменения состояния и использования естественной природной и историко-культурной среды, культурных и природных ландшафтов, транспортной и инженерной инфраструктуры вследствие оказания на территорию внешних воздействий.

Градостроительные регламенты в новой редакции Градостроительного кодекса РФ 2004 г. получили *универсальный правовой статус*, чем и отличаются принципиально от практики предшествующих десятилетий. Наличие такого статуса означает наделение регламентов законодательной силой и влечет за собой обязательность их соблюдения представителями всех ветвей государственной власти (законодательной, исполнительной и судебной) и всех других субъектов хозяйственной деятельности, независимо от их ведомственной подчиненности. Наряду с этим устанавливается необходимость соблюдения регламентов рядовыми участниками градостроительной деятельности.³ Сформированные регламенты значительно расширяют возможности градостроительной деятельности, позволяя управлять развитием территории экономическими (стимулирующими), а не директивными методами, в полном соответствии с ее реальными проблемами. В этом случае развитие территории может происходить независимо и от политической, и административной конъюнктуры.

Расширение «экономических» возможностей регламентов в современной градостроительной практике широко освещается в профессиональной литературе [2, 3, 4, 5, 6]. Сторонники данной позиции видят преимущества регламентов в ликвидации административных «барьеров» инвестиционным намерениям застройщиков. А это, в свою очередь, создавало предпосылки к более эффективному в экономическом смысле использованию территории, а также открытому и доступному характеру информации о состоянии и изменении недвижимости⁴. Регламенты, таким образом, могут рассматриваться как характерные экономические стимулы градостроительной деятельности. Но, как правило, большинство управленческих решений, основанных на соблюдении регламентных требований, не в полной мере учитывают социальные требования градостроительной организации среды обитания. Несовершенство такого подхода уже сейчас, по прошествии менее двух лет с момента введения в действие Градостроительного кодекса РФ, очевидно, и, как показывает практика, требует критического осмысления. Известно, что экономический интерес инвесторов превалирует, а соблюдение ими градостроительных принципов использования территории происходит формально. Доступ собственника недвижимости к информации о *параметрах* участка, с одной стороны, стимулирует процесс градостроительного использования территории, связанный с инвестированием средств. Но, с другой стороны, его стимуляция создает предпосылки для неконтролируемой спекуляции собственностью.

В полной мере согласиться с данной трактовкой преимуществ регламентной системы нельзя. Для интенсификации градостроительной деятельности недостаточно того, чтобы градостроительные регламенты рассматривались только как эффективный инструмент, юридически закрепляющий и

³ Именно в этой комплексности заключается одно из преимуществ современной регламентной системы.

⁴ Эта возможность обусловлена активным внедрением в практику управления градостроительной деятельностью системы кадастровых информационно-управляющих систем: см., например: Донцов Д.Г. Кадастровые управляющие информационные системы в градостроительной деятельности / Д.Г. Донцов, В.А. Игнатьев, Н.Г. Юшкова. Волгоград : ВолгГАСУ, 2005. (Серия «Урбанистика»).

регулирующий *экономические отношения* участников градостроительной деятельности.

В современных условиях в градостроительстве ощущается все большая значимость наполнения управленческих решений социальным смыслом. Социальные аспекты, в частности, являются важной составляющей рационального использования территории.

Для реализации целей градостроительной деятельности, обозначенных в ведущем документе, определяющем принципиальные стратегические направления градостроительства — Национальной доктрине градостроительства России, при формировании системы градостроительных регламентов необходимо, наряду с прочими требованиями, обеспечивать комплекс *требований рационального использования территории* [7].

Несмотря на важность этого вопроса как для органов управления, так и для рядовых участников градостроительной деятельности, Градостроительный кодекс 2004 г. не дает четких указаний, раскрывающих методические особенности формирования системы регламентов, ограничиваясь набором стандартных положений.⁵

Как явствует из текста кодекса, градостроительный регламент предназначен для установления правового режима земельных участков. Он синтезирует в себе три основных показателя, таких как *виды разрешенного использования* (строительства, реконструкции); их предельные *параметры*; *ограничения* использования земельных участков и объектов капитального строительства. Этими показателями в совокупности должны быть описаны все зафиксированные в карте зонирования, территориальные зоны и составляющие их элементы.⁶ При этом в кодексе особым образом не оговариваются требования рационального использования территории.⁷ Характерно, что градостроительный контекст термина «разрешенное использование» земельных участков как в Градостроительном кодексе 1998 г., так и в его последующей редакции 2004 г., отсутствует. В то же время очевидно, что формирование современной системы градостроительной регламентации невозможно без комплексного учета требований рационального использования территории.

Необходимость уточнения этого вопроса вызвана тем, что в Градостроительном кодексе 2004 г. представлена новая идеология управления градостроительной деятельностью. Одним из ее ведущих принципов стало выделение градостроительного регулирования в самостоятельное направление. Неотъемлемым признаком регулирования как одной из специфических функ-

⁵ Этот перечень обязательных положений ограничен, в основном, организационно-правовым порядком установления регламентов, включая назначение, изменение, выбор видов разрешенного использования территории и т.п.

⁶ При буквальном толковании этого термина разрешенным, согласно кодексу, является использование земельных участков в соответствии с градостроительным регламентом. В свою очередь, градостроительный регламент представляет собой совокупность установленных правилами застройки параметров и видов использования земельных участков и объектов недвижимости в пределах границ каждой территориальной зоны.

⁷ Следует отметить, что кодекс предусматривает соблюдение требований охраны объектов культурного наследия, а также особо охраняемых природных территорий, при установлении градостроительным регламентом. Но в этом качестве регламент использования земельных участков и объектов недвижимости в пределах границ каждой территориальной зоны.

ций управления является сохранение состояния упорядоченности систем (процессов) посредством сравнения реального состояния их функционирования с заданными показателями и приведения их в соответствие [8].⁸

Особенности регулирования, и соответственно, управления в отношении градостроительства вообще и отдельных территориальных образований в частности реализуются благодаря системе регламентов и зафиксированных в них видах и параметрах разрешенного использования. В свою очередь, одним из аспектов разработки методики установления градостроительных регламентов, является взаимосвязь социально-экономических, правовых и экономических вопросов. На основании этого можно предложить новую трактовку понятия «регламент»,⁹ при формулировке которого были обобщены различные исследования, посвященные данной проблеме.¹⁰

Градостроительные регламенты представляют собой комплекс территориальных показателей допустимого изменения состояния градостроительных систем, посредством которых осуществляется регулирование процессов пространственного преобразования территории с соблюдением условий ее рационального использования. Показатели допустимых изменений являются комплексом закрепленных нормативно и имеющих правовой статус условий, которые определяют предпочтения, ограничения и запрещения изменений состояния и использования территории.

В представленной трактовке градостроительные регламенты расширяют границы градостроительной деятельности, поскольку определяют *перспективные направления использования территории*. Это принципиально отличает их от представленной в Градостроительном кодексе версии, где речь идет о «фактическом использовании земельных участков и объектов капитального строительства» [9]. Можно заключить, что территориальные показатели допустимых изменений градостроительных систем определяются, ориентируясь на правовые цели последующего формирования градостроительных регламентов. Оценивая новеллы Градостроительного кодекса, нельзя не отметить, что придание градостроительным регламентам правового качества делает их одним из наиболее эффективных в технологическом отношении современных инструментов градостроительного регулирования, благодаря которому процессы управления устойчивым пространственным развитием территории приобретают измеримость, что прорывает сложившиеся представления о градостроительстве.

Повышение действенности градостроительных регламентов напрямую зависит от того, насколько точно в правовом смысле сформулированы территориальные показатели допустимых изменений территории. В этом случае нали-

⁸ Очевидно, что для этого необходимо наличие информации о степени отклонения параметров от исходных (нормативных) показателей, их постоянное сравнение. Спецификой регулирования, исходя из этого, является устранение подобных отклонений или сведение их к минимальной величине.

⁹ Имеется в виду, что толкование данного термина, отражающее практическую сторону вопроса, представлено в кодексе, а новшества касаются, в основном, «теоретического контекста» процесса градостроительной регламентации.

¹⁰ К наиболее известным работам по данной проблематике могут быть отнесены исследования А. Крашенинникова, Д. Донцова, М. Вильнера, Г. Малояна и других ученых.

чие точных исходных данных (входящей информации) и правовая фиксация показателей (исходящей информации) позволит свести к минимуму ошибки функционирования системы. Нестандартность подобного подхода заключается в новом представлении градостроительной системы¹¹ в отличие от ее распространенной трактовки как композиционно-планировочной целостности.

Развитие этих положений находит свое отражение в предлагаемых *методических разработках основ градостроительной регламентации*.¹² Востребованность подобных разработок современной практикой управления градостроительной деятельностью высока. Можно предположить, что даже формулировка основных методологических положений, касающихся установления видов разрешенного использования территории, представляет научный интерес. Обобщение опыта градостроительства последнего десятилетия позволяет сформулировать методологические принципы, сочетающие в себе правовые, градостроительные, экономические и управленческие особенности определения видов использования земельных участков.

Первое методологическое положение установления видов разрешенного использования земельных участков и объектов недвижимости требует определения функционального назначения земельного участка, максимально приближенного к сложившейся пространственной организации территории. Речь идет о необходимости соответствия *типологических особенностей (приемов) пространственной организации территории* различным территориальным зонам.

Второе методологическое положение предполагает приоритетное значение местоположения территориальной зоны в городе при определении характера градостроительного использования территории. Этим принципом определяется *взаимосвязь* градостроительной организации территории и *преемственность* функционально-пространственного развития выделенного участка территории.¹³

Третье положение может быть определено как *ранжирование* видов разрешенного использования территории в зависимости от комплекса природно-ландшафтных, градостроительных особенностей территории, степени ее удаленности от центра поселения, характера прилегающих территорий, исторически сложившегося сочетания функциональных процессов и градостроительных объектов в пределах установленной территориальной зоны.

¹¹ В отечественном градостроительстве среди аналогичных подходов к описанию градостроительных систем наиболее известны работы А. Гутнова, Г. Малояна, З. Яргиной.

¹² Актуальность подобных разработок неоспорима. В частности, из текста Градостроительного кодекса не в полной мере ясно, каким образом должны назначаться виды использования территории в условиях различной градостроительной, природно-ландшафтной и социально-экономической специфики, сохраняя при этом универсальность. Отправным правовым положением градостроительного регламента является выделение трех видов разрешенного использования земельных участков и объектов капитального строительства: основного, условно разрешенного и вспомогательного.

¹³ Преемственность в данном контексте рассматривается как сохранение на основе комплекса объективных факторов и реальных данных исторически сложившегося типа использования земельного участка. Следование преемственности позволяет обеспечивать постепенный и логически последовательный процесс градостроительного преобразования территории, не нарушая структурного порядка, характерного для различных территориальных фрагментов.

Четвертое положение предусматривает *обязательность принципа структуризации* в процессе определения состава каждой из зон. Этот подход основан на приоритете основного вида разрешенного использования, в то время как вспомогательным видам использования территории отводится дополнительная к основной функция.

Сочетание перечисленных методологических положений в процессе установления видов разрешенного использования территории позволяет обеспечивать целенаправленное, сбалансированное и взаимоувязанное развитие территориальных зон разных типов. Это способствует дифференциации территории на относительно равномерные фрагменты, в их четком (документально оформленном) пропорциональном соотношении. Тем самым достигается эффект рационального, целесообразного использования территории, основанный на согласовании интересов Российской Федерации, субъектов РФ, муниципальных образований, граждан и юридических лиц — правообладателей недвижимости и иных участников градостроительной деятельности.

Изложенные выше научно-методические положения по-прежнему реально являются «пилотными», но не претендуют на опытные образцы. Их, скорее, необходимо рассматривать как повод для серьезных научных исследований и дискуссии. Вопросы градостроительной регламентации имеют не только научно-методическую значимость, но и инициируют проведение исследований, касающихся проблем системного подхода в сфере управления градостроительной деятельностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Донцов Д.Г. Основы информационного обеспечения регулирования градостроительных систем. М., 2006.
2. Афанасьева Т. Градорегулирование в Москве: правовые аспекты адаптации к рынку / Т. Афанасьева, Э. Трутнев // Архитектурный вестник. 1997. № 4.
3. Афанасьева Т. Градостроительное законодательство России на пути реформ. Сравнительный анализ и концепция реформирования / Т. Афанасьева, Э. Трутнев, Е. Якубович. М., 1996.
4. Афанасьева Т. Правовое зонирование города. Введение в проблемы градорегулирования в рыночных условиях / Т. Афанасьева, Э. Трутнев, У. Валетта. М., 1997.
5. Афанасьева Т. Правовое зонирование города. Введение в проблемы организации современной системы землепользования и застройки в российских городах в условиях формирования рынка недвижимости / Т. Афанасьева, Э. Трутнев, У. Валетта. М., 1997.
6. Лекции по экономике города муниципальному управлению / под ред. А.С. Пузанова. М., 2004.
7. Национальная доктрина градостроительства России. Концепция градостроительной политики России на начало XXI века. М. 2001.
8. Управление в строительстве / под ред. В. М. Васильева. СПб., 2001.
9. Градостроительный кодекс Российской Федерации, 2004 г.

УДК 332.85

В.В. Кофтин

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫМ РЫНКОМ ДОСТУПНОГО ЖИЛЬЯ

Рассмотрены основные направления развития системы управления эффективным рынком доступного жилья (РДЖ), в качестве основы которой предложено использовать синтез государственного регулирования и рыночного саморегулирования для достижения как краткосрочных, так и долгосрочных целей развития РДЖ. Приоритет в предлагаемой системе управления отдан доступности приобретения жилья для основной части населения.

In article the basic ways of development of a control system are considered by the effective market of accessible habitation (MAH). As a basis of control system MAH it is offered to use synthesis of state regulation and market self-regulation for achievement both short-term, and long-term objectives of development of the market of accessible habitation. The basic priority in an offered control system is availability of purchase of habitation to the basic part of the population. The role of the state should consist in maintenance of legislative and administrative infrastructural conditions.

Важное место и роль в социально-экономическом развитии нашего государства занимает рынок доступного жилья (РДЖ). Степень его развития является тем показателем, который позволяет достаточно объективно оценивать программные установки и результаты проводимых реформ в стране. Институциональные реформы в России не будут считаться завершенными без создания эффективно функционирующего РДЖ, мобилизующего и предоставляющего реформируемой экономике ресурсы основных фондов для ее развития. Именно поэтому исследование проблем функционирования РДЖ и эффективного управления им приобрели особую актуальность.

Методы централизованного управления советской экономической системой раскрыли в полной мере свой экономический потенциал на определенных этапах исторического развития СССР: в периоды коллективизации, индустриализации, Великой Отечественной войны и восстановления народного хозяйства, в том числе в период восстановления разрушенного жилищного фонда и массового жилищного строительства. При этом усиление централизации было объективно необходимой мерой в рамках конкретных исторических условий.

Однако с изменением ситуации применение административно-командных методов управления оказывалось неэффективным. Потребовался переход к новым методам, к новым формам регулирования общественного производства, поскольку старые формы и методы начинали сдерживать поступательное развитие производительных сил. Формирующаяся в Российской Федерации рыночная среда потребовала переосмысления происходящих в обществе процессов, что обуславливает творческое развитие экономической науки и требует стратегических разработок для реальной хозяйственной практики. В частности, отсутствие системной теоретической концепции эффективного управления рынком доступного жилья (РДЖ), как в начале проведения реформ, так и на современном этапе, не позволяет государству обеспечить эффективное использование имеющегося экономического потенциала исследуемого сегмента национальной экономики. Необходимо подчеркнуть,

что реализация потенциала исследуемого рынка может стать катализатором развития всей социально-экономической системы, поскольку РДЖ, как локальная рыночная система, является составной частью общей системы национальной экономики России.

Несостоятельность административных методов управления РДЖ в советский период обусловлена издержками директивного планирования во всех отраслях экономики, а также отсутствием реального механизма ценообразования на жилье и конкуренции. И если в условиях командной экономики план был единственным инструментом управления народным хозяйством, то в период перехода к рыночным отношениям от него практически отказались, что также явилось стратегически неверным шагом. Именно поэтому необходимо использовать долгосрочное стратегическое планирование в РДЖ, основанное на реальных расчетных показателях, являющихся критериями эффективности функционирования рынка жилья [1, 2].

Нужно признать, что используемые в условиях перехода к рыночным отношениям методы управления отечественным рынком жилья не дали существенных результатов. Более того, отрасль оказалась в кризисе. Поэтому сегодня востребована такая система управления, которая позволила бы не только вывести РДЖ из кризиса, но и обеспечила бы его интенсивный рост.

У всего населения России существует потребность в качественном, комфортном и доступном жилье: она различается лишь своей остротой, платежеспособным спросом на него и другими показателями. При этом следует подчеркнуть, что в каждом субъекте Российской Федерации имеются свои особенности, возможности и научные разработки по развитию РДЖ. Но, к сожалению, как в органах государственной власти и местного самоуправления, так и в реальном секторе региональных экономик в настоящее время явно недостаточно профессионалов, способных имеющиеся в субъектах Федерации потенциал и наработки реализовать в практическую плоскость [3].

В связи с этим автор считает, что система управления РДЖ должна быть основана на синтезе государственного регулирования и рыночного саморегулирования для достижения как краткосрочных, так и долгосрочных целей развития РДЖ. При этом программно-целевое управление его реализацией позволит сформировать экономические стимулы развития субъектов исследуемого рынка и на основе широкомасштабного внедрения организационных, финансовых и экономических механизмов реализации программных мероприятий обеспечить устойчивое развитие РДЖ [4].

Главным в предлагаемой системе управления является доступность приобретения жилья для основной части населения и обеспечение удовлетворения жилищных потребностей в соответствии с платежеспособным спросом и потребительскими предпочтениями граждан при участии как государства, так и частного сектора. При этом роль государства должна состоять в обеспечении законодательных и административных инфраструктурных условий (например, государственные системы регистрации прав и учета объектов недвижимости, комплексные целевые программы) для развития рыночных институтов и механизмов. Непосредственное финансовое участие государства возможно, с нашей точки зрения, в форме поддержки становления отдельных рыночных институтов на первоначальном этапе (например, института вторичного рынка ипотечных кредитов), а также предоставления безвозмездных

субсидий определенным группам населения (работникам бюджетной сферы, молодым семьям, военнослужащим и др.) с целью повышения доступности строительства и покупки жилья, а также кредитов на эти цели. При этом за государством и органами местного самоуправления, безусловно, остается задача обеспечения жильем малоимущих и других установленных законом категорий граждан (социальное жилье).

Доступность приобретения жилья для населения обеспечивается через развитие банковского сектора, предоставляющего гражданам долгосрочные (на 10...15 лет) кредиты на приобретение или строительство жилья под залог этого жилья (ипотека). Предполагается развитие различных форм долгосрочного жилищного кредитования населения: для приобретения готового жилья, участия в строительстве многоквартирных домов, строительства индивидуальных домов и др.

В рамках системы государственной регистрации прав предполагается усилить правовые гарантии прав добросовестных приобретателей недвижимости и обеспечить финансовые гарантии возмещения ущерба стороне, права которой были нарушены. Права кредиторов-залогодержателей должны быть защищены возможностью обращения взыскания и прекращения прав заемщиков-залогодателей на жилье — предмет ипотеки — в случае невыполнения обязательств по кредитному договору. В законодательстве необходимо обеспечить баланс интересов кредиторов и заемщиков с целью снижения кредитных рисков и процентных ставок, повышения доступности ипотечных кредитов для населения.

Автор считает, что отечественная банковская система для финансирования долгосрочных кредитов населению должна получить доступ к долгосрочным ресурсам пенсионной и страховой системы, к средствам других институциональных инвесторов через развитие рынка ипотечных ценных бумаг. Для этого необходимо дальнейшее законодательное обеспечение надежности этих финансовых инструментов.

Для формирования эффективного рынка доступного жилья и жилищного кредитования необходимо развитие новых институтов: страхования ипотечных кредитов, кредитных бюро, риэлтеров-брокеров и др. С целью снижения стоимости сделок на РДЖ и ипотечного кредитования требует совершенствования деятельность государственных систем регистрации прав на недвижимость и учета объектов недвижимости (повышение прозрачности, надежности и информационной доступности, снижение затрат и времени обслуживания для участников РДЖ, отмена обязательного нотариального удостоверения договоров ипотеки и усиление гарантий прав через систему регистрации прав и другие меры).

Организация жилищного строительства должна претерпеть существенные изменения с целью удовлетворения платежеспособного спроса населения на жилье, который существенно возрастет за счет долгосрочного жилищного кредитования. С целью снижения административных барьеров доступа на рынок жилищного строительства, получения земельного участка с установленными регламентами разрешенного использования и разрешения на строительство необходимо законодательно установить четкие и прозрачные процедуры территориального планирования на уровне Российской Федерации, субъектов Российской Федерации и муниципалитетов, а также правового зо-

нирования с установлением градостроительных регламентов и видов разрешенного использования недвижимости на уровне муниципальных образований, заменить многочисленные процедуры государственной экспертизы градостроительной и проектной документации (за некоторыми исключениями) на устанавливаемые федеральными законами технические регламенты и введение рыночной деятельности по проверке соответствия проектной документации этим регламентам.

Необходимо предоставлять застройщикам для целей жилищного строительства сформированные земельные участки в собственность на торгах и до начала инвестиционно-строительного процесса. Это обеспечит возможность привлечения застройщиками кредитных ресурсов на строительство жилья под залог земельных участков и возводимого жилья. Существенную роль в этом процессе призваны играть органы местного самоуправления, ответственные за развитие территорий муниципалитетов.

Чтобы создать заинтересованность органов местного самоуправления необходимо производить работы по формированию земельных участков и подготовке исходно-разрешительной документации для их предоставления под жилищное строительство с применением конкурсных процедур, а также принятие законодательных мер, обеспечивающих поступление в местные бюджеты в полном объеме средств от продажи сформированных земельных участков. Муниципалитеты, заинтересованные в увеличении объемов жилищного строительства, должны обеспечивать предложение земельных участков для жилищного строительства, обустроенных базовой инженерно-коммунальной инфраструктурой. Начальное финансирование может обеспечиваться посредством муниципальных займов на развитие инфраструктуры, а возврат средств — за счет продажи прав на земельные участки и установление прозрачного и регулируемого муниципалитетами тарифа за подключение к инфраструктуре. Возможно делегирование ответственности за развитие коммунальной инфраструктуры частным операторам объектов коммунальной инфраструктуры. Кроме того, считаем целесообразным развитие девелопмента в целях увеличения объемов жилищного строительства.

Реализация данной системы управления на практике позволит существенно расширить платежеспособный спрос населения на жилье, увеличить предложение жилья, в том числе за счет жилищного строительства, и обеспечить доступность жилья для основных групп населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Анипкин А.М.* Жилищное строительство и инвестиции / А.М. Анипкин, А.Н. Ларионов. Волгоград : Ком. по печати и информ., 1997. 64 с.
2. *Анистратенко А.И.* Индивидуальное жилищное строительство: вчера, сегодня, завтра / А.И. Анистратенко, А.Н. Ларионов. Волгоград : Ком. по печати и информ., 1998. 72 с.
3. *Ларионов А.Н.* Методология регулирования регионального рынка жилья (на примере Волгоградской области) : дис. ...д-ра. экон. наук. С-Пб., 2002. 299 с.
4. *Ларионов А.Н.* Рынок доступного жилья: проблемы формирования и перспективы развития / А.Н. Ларионов, В.В. Кофтин. СПб. : Астерион, 2006. 160 с.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА. ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА

УДК 728.24:502.36

Н.В. Черешнева, И.В. Черешнев

ЗНАЧЕНИЕ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО БЛАГОУСТРОЙСТВА В УЛУЧШЕНИИ МИКРОКЛИМАТА ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ ВОЛГОГРАДА

Рассмотрены архитектурно-ландшафтные приемы озеленения жилой застройки в условиях ухудшения экологической обстановки. Приведены данные о социально-экономической и экологической эффективности проводимых мероприятий.

The authors considered architectural and landscaping methods for residential zones planting under deteriorating environmental conditions. They also gave the data on socio-economic and ecological efficiency of these measures.

Значение зеленых насаждений в создании единого ландшафта, объединяющего среду обитания человека и природу, неоспоримо велико. Однако нельзя сказать, что строительная практика в г. Волгограде богата примерами рационального использования озеленения во дворах жилых групп или в интерьерах жилых домов. Одной из причин низкого качественного уровня жилой среды является недооценка ландшафтно-архитектурной организации внутриквартальных пространств. Проектировщики по-прежнему продолжают относиться к природным факторам как вспомогательному средству, в то время как засушливый климат степей Волгоградской области требует проведения мероприятий по искусственному озеленению, орошению и обводнению территорий жилой застройки.

Острую необходимость увеличения площади озелененных пространств создает экологическая обстановка в городе. Загрязнение водных ресурсов и атмосферного воздуха остается высоким из-за устаревшего оборудования и недостаточного внедрения современных технологий и очистных сооружений. В связи со значительным увеличением числа легковых автомобилей наблюдается рост общего воздушного и шумового загрязнения на примыкающих территориях. Из-за отсутствия финансирования ухудшились санитарное состояние и степень благоустройства жилых дворов. Утрачен реальный социальный контроль за придомовой территорией как жильцами, так и коммунальными службами. Следствием этого явления становится безжалостное уничтожение зеленых насаждений и организация на их месте парковок для личного автотранспорта.

За многовековую историю развития жилища в различных природно-климатических, социально-экономических, национально-культурных и других условиях человеком были выработаны оптимальные формы организации жилой среды, обеспечивающие необходимую связь с природой или защиту от неблагоприятных природных факторов. Современные тенденции развития экологического подхода при организации жилой среды все более сопоставляют с таким понятием, как озеленение открытых пространств жилой застройки и интерьеров жилых зданий.

Эффективность использования растительности в целях экологизации жилых пространств в климате южных регионов России во многом определяется аспектами воздействия зеленых насаждений на человека и окружающую его среду. К наиболее важным из этих аспектов следует отнести: психологический; эстетический; биологический; теплотехнический. Учитывая аспекты воздействия зеленых насаждений на человека и окружающую среду, а также дефицит городских территорий и возрастающую стоимость земли, ставят вопрос об использовании искусственных оснований для размещения зеленых насаждений, поскольку среди всех способов оздоровления города наиболее реальный — всемерное увеличение площадей, занятых растениями. Найти такие площади нетрудно: в первую очередь, это плоские крыши зданий, подземных и полузаглубленных сооружений.

Сады на крышах могут возродиться сегодня в новом качестве. Это могут быть не отдельные, предназначенные для частных владельцев изысканные сады, а «эко»-крыши, травяные кровельные покрытия целых небольших поселков, причем необязательно плоские — есть приемы озеленения скатных крыш. В некоторых зарубежных странах переходят к озеленению крыш практически всех зданий: от административных до жилых и промышленных, особенно если последние примыкают к жилым территориям. Так, в промышленном районе Штутгарта было принято решение возводить производственные здания только с озелененными крышами, и это в короткие сроки значительно снизило уровень шума и загрязнения атмосферного воздуха окружающих жилых районов. Местные власти Германии выдвигают особо жесткие требования к размещению застройки на новых территориях, вводя налоги, стимулирующие создание озелененных поверхностей плоских крыш. Уже много лет существует во Франкфурте засеянная травой кровля административного комплекса площадью более 3 га. Помимо экологического и эстетического эффекта, это значительно улучшило тепло- и звукоизоляцию зданий, микроклимат в помещениях. Эти крыши практически не нуждаются в уходе благодаря подбору состава растений (рис. 1).

Не менее перспективный резерв увеличения площади озеленения — фасады жилых домов (вертикальное озеленение). Вьющиеся растения не только оформляют входы, балконы и лоджии, оживляют глухие торцы домов, но становятся органичным элементом архитектуры фасадов, позволяющим выявить архитекtonику здания, а в некоторых случаях придать фасаду новое ритмическое звучание. Но главная роль принадлежит экологическому эффекту «зеленых» фасадов. Как и озелененные крыши, стены, увитые лианами, способствуют повышению теплоизоляционных свойств ограждающих конструкций. В условиях жаркого климата они защищают жилые здания от воздействия солнечных лучей, атмосферных осадков, значительно снижают уровень шума, а главное, максимально приближенные к каждой квартире, очищают воздух (рис. 2, 3).

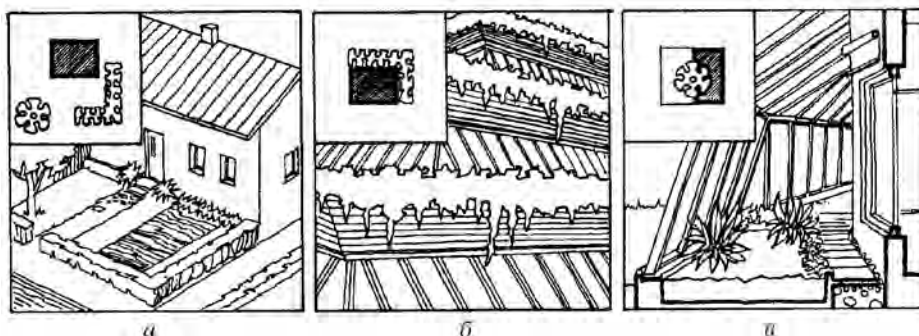


Рис. 1. Повышение эстетических качеств жилой среды за счет увеличения площади озеленения: *а* — придомовых пространств; *б* — вертикальных и горизонтальных ограждающих конструкций; *в* — интерьеров жилых зданий

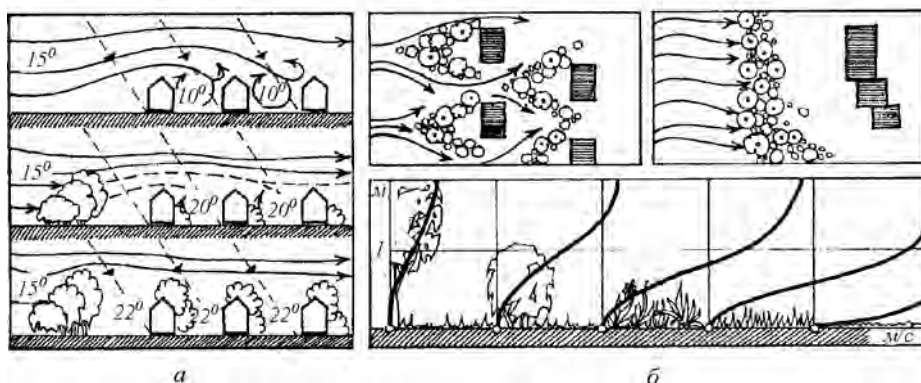


Рис. 2. Снижение теплотерь здания и застройки при организации ветрозащитного озеленения: *а* — изменение тепловой эффективности застройки при различном озеленении придомовых пространств; *б* — приемы ветрозащитного озеленения, график изменения скорости ветра при различной высоте растений

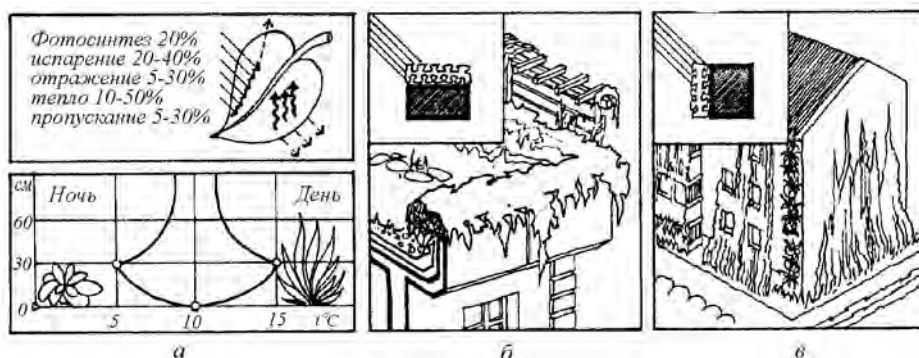


Рис. 3. Снижение тепlopоступлений в интерьеры жилых пространств за счет организации солнцезащитного озеленения: *а* — энергобаланс одного листа, график изменения температуры воздуха при различной высоте растений; *б* — снижение тепlopоступлений за счет горизонтального озеленения крыш; *в* — снижение тепlopоступлений через окна и стены при организации вертикального озеленения

Еще один прием экологизации жилища имеет отношение уже к ландшафтной архитектуре придомового пространства — к решению озелененной полосы, обрамляющей многоэтажное здание от фасада до проезда. Использование придомовой полосы в настоящее время происходит стихийно: жильцы высаживают под своими окнами все подряд, не задумываясь о последствиях. В результате через несколько лет происходит затенение окон, появляется сырость, затрудняется проветриваемость. В некоторых жилых кварталах дворовая территория настолько насыщена подземными коммуникациями, что непригодна для посадки растений, особенно деревьев. Именно поэтому основное внимание следует уделять придомовой полосе, фасадам здания с лоджиями, балконами и террасами, крышам. На крыши зданий могут быть частично перенесены функции дворовых территорий, например, хозяйственно-бытовые (размещение площадок для сушки белья), что позволит высвободить площади для зеленых насаждений. Часть вспомогательных и служебных сооружений (насосные, трансформаторные, тепловые пункты, гаражи, автостоянки) в этих же целях могут быть заглублены, и на их крыши перенесены различные по своему назначению дворовые площадки, либо они могут быть встроены в искусственный рельеф с озелененными откосами [1].

Реконструкция и обновление открытых пространств жилой застройки должна включать комплекс мероприятий, направленных на повышение социально-экономических и экологических условий проживания горожан: 1) замена асфальтовых покрытий на дорожные покрытия, которые дренируют воду, давая тем самым жизнь многочисленным микроорганизмам, обитающим в почве; 2) обводнение и орошение за счет использования систем рециркуляции дождевой воды; 3) энергообеспечение различных функциональных процессов за счет использования солнечных пассивных и активных энергосистем; 4) применение рециркуляционных систем для сбора и переработки бытовых отходов [2].

Таким образом, основные приемы озеленения жилой среды должны быть направлены на достижение наибольшего экологического эффекта. Созданная система озеленения жилой застройки города в перспективе даст возможность добиться наиболее полной интеграции жилых зданий в окружающий природный ландшафт, позволит регулировать тепловой режим, а также обеспечивать горожанам каждодневный контакт с природной средой, повысив при этом психологический и биологический комфорт проживания. Все это в целом позволит создать новую эстетику жилой среды, в которой здания, дворы и природа взаимосвязаны и формируют неповторимый образ городской застройки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Титова Н.П.* Вопросы экологии в ландшафтно-архитектурном проектировании жилой среды // Проблемы экологичного жилища. М. : ЦНИИЭП жилища, 1991. С. 52—61.
2. *Черешнев И.В.* Экологическая реконструкция внутренних открытых пространств / И.В. Черешнев, Н.В. Черешнева // Жилищное строительство. 2005. № 4. С. 17—19.

УДК 711.41:504

С.Е. Стеценко

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ПРИЕМЫ УМЕНЬШЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Приведены эффективные градостроительно-планировочные приемы, снижающие запыленность городской среды. Даны закономерности вертикального распределения частиц в воздухе и рекомендации по применению отделочных материалов согласно дифференциации фасада на ярусы.

The author considers the urban planning techniques for decreasing the dust content in urban environment. She also gives the consistent patterns for vertical distribution of particles in the air and the recommendations for finishing materials application according to the facade levels differentiation.

Высокая запыленность городской среды является причиной серьезных эколого-гигиенических проблем городов. Негативное влияние пыли проявляется в различных сферах деятельности человека, особенно, в городском хозяйстве. Запыленность приводит к росту экономических потерь за счет повышения затрат на эксплуатацию и ремонт зданий и сооружений, вредного воздействия на растительность. Важным аспектом рассматриваемой проблемы является отрицательное влияние запыленности городской среды на здоровье и психологическое состояние человека. Существует прямая зависимость показателей заболеваемости населения города от количества выпадающей пыли.

Приоритетным направлением решения вопроса уменьшения запыленности городской среды, согласно современным градостроительным тенденциям, следует считать процесс модернизации и санации жилой застройки, обеспечиваемый градостроительно-планировочными средствами.

Градостроительно-планировочные приемы эффективно предотвращают локальный пылеперенос, поверхностное пылеобразование и уменьшают запыленность среды. Автор относит к таким приемам изменение конфигурации, этажности и протяженности зданий; посадку пылеветрозащитных зеленых насаждений; использование приемов геопластики (применение современных методов мощения, применение системы комбинированного многокомпонентного покрытия, изменение природного рельефа или создание искусственного путем чередования повышения и понижения отметок внутридворовой территории, вертикальную планировку внутридворовой территории); рациональное использование дождевой воды.

Для обеспечения укрепления поверхности рекомендуется применять современные методы мощения — искусственное покрытие участков городской жилой среды различного функционального назначения с гарантированным проникновением дождевой воды в грунт. Это эффективное средство по улучшению микроклимата на жилой территории, в частности внутридворового пространства, за счет обеспечения стока воды с территории и ее инфильтрации с поверхности территории в грунт с помощью инфильтрационных стыков и отверстий. Предлагается применение 4 основных типов экологических систем мощения: озеленением; инфильтрационными стыками; инфильтрационными отверстиями; водопроницаемыми плитами.

Систему комбинированных многокомпонентных покрытий, где берется за основу чередование естественного покрытия, водной поверхности и искусственного пылящего покрытия, травяного покрова или поверхностей с экологическим мощением (природно-искусственного барьера) и искусственного пылящего покрытия, следует применять как на участках вероятного направления поступления пыли во внутриворотовое пространство, так и на участках локального вторичного внутриворотового пылепереноса. Активно используется природный рельеф на участках или создается искусственный, снижающий вероятность вторичного пылеобразования и пылепереноса. Рекомендуется чередование незначительного повышения и понижения отметок внутриворотовой территории с травяным покровом, которое обеспечит эффективное пылезадержание и утилизацию пыли под действием дождевых осадков или полива. Экологически оправданы вертикальная планировка, уменьшающая чрезмерное перегревание поверхностей и высыхание почвы; организация сбора дождевых вод в специальные резервуары — дворные мини-водоемы для сбора дождевых осадков.

Фасады зданий представляют собой часть городской поверхности, имеющую значительную площадь и аккумулирующую пыль. Пыль, оседая на фасад здания, приводит к его физическому загрязнению. На вертикальные поверхности без выраженной рельефности способны оседать частицы размером от 0,06 до 10 мкм [1].

Распределение частиц пыли по вертикали зависит от сферичности частиц и от их размера. Чем более выражена сферичность частицы пыли, тем выше она может подниматься, даже при незначительной скорости ветра. Пыль характеризуется сферичностью, если ее частицы образовались в результате перехода газа в твердое состояние, т.е. в результате процесса конденсации или сформировались в результате процесса горения, что соответствует пыли техногенного происхождения. Такая пыль легче поддается увлажнению.

На протяжении 10 м от поверхности почвы наблюдаются частицы от 1 до 100 мкм. На высоте 3-4 м от поверхности земли, преимущественно преобладают крупнодисперсные частицы, диаметром от 10 до 100 мкм, причем в большей степени присутствуют частицы размером 10...50 мкм (пыль природного происхождения, песок, пыльца растений). Частицы, диаметром от 1 до 5 мкм и менее преобладают на уровне 9...10 м и выше, что характерно для частиц техногенного происхождения [2]. На поверхности данных частиц способны накапливаться такие химические элементы, как Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, Fe.

Частицы менее 1 мкм в диаметре схожи в своем поведении с газами, а на их поверхности могут накапливаться такие токсичные элементы, как As, Sb, Pb, Cd. Концентрация частиц мелкой дисперсности с увеличением высоты (1,5...30 м) падает в среднем в 2,5 раза. Концентрация пыли перед наветренным фасадом здания в 5-6 раз выше концентрации пыли, чем у подветренного фасада дома. Это означает, что мелкодисперсная пыль, поступающая преимущественно от автомагистралей или других техногенных источников, оказывает наибольшее негативное влияние на внешние фасады здания или на его наветренные торцы. Кроме того, частицы мелкой и средней дисперсности в большей мере характерны для городского воздуха. Следовательно, необходимо в первую очередь предусматривать защиту фасадных поверхностей от запыления частицами мелкой и средней дисперсности.

Поверхность фасада здания можно условно разделить на ярусы, соответствующие следующим уровням (рис.):

- 1 ярус: уровень цокольного этажа — 0,5...1,0 м;
- 2 ярус: уровень первого этажа — 1,0...4,0 м;
- 3 ярус: уровень второго этажа и выше — 4,0...10,0 м и более.



Дифференциация фасада на ярусы

Изучение практических данных позволило автору сделать вывод, что для 1-го и 2-го ярусов фасада здания в большей степени характерно отложение средне- и крупнодисперсной пыли природного происхождения: пыли, песка, пыльцы растений, которая может быть токсична вследствие адсорбции на ее поверхности ядовитых элементов. При санации фасада здания для его 1-го и 2-го яруса следует исключить применение фасадных строительных материалов, имеющих рельефность. Это позволит уменьшить пылезадержание на поверхности фасада, прежде всего, частиц крупной дисперсности, поскольку частицы свыше 10 мкм не способны задерживаться на вертикальной поверхности, лишенной рельефности. Главным критерием для выбора фактуры фасадной поверхности в условиях санации здания должен быть показатель высокой устойчивости поверхности к запылению. Здесь, необходимо учитывать неизбежность присутствия сильного запыления 1-го яруса здания в результате рефлексирования дождевых капель от поверхности отмостки дома. Российская строительная практика показывает преобладание примеров использования в качестве отмостки здания асфальтированной поверхности, которая не позволяет утилизировать пыль а, напротив, ведет к вторичному загрязнению 1-го яруса фасада. Такой критерий как способность поверхности к самоочищению представляется менее важным, так как поверхности 1-го и 2-го яруса фасада здания находятся в относительной доступности для проведения санитарной очистки. Кроме того, следует учитывать, что крупно- и среднедисперсная пыль откладывается преимущественно на нижних склонах макронеровностей, что препятствует самоочищению запыленных поверхностей при их естественном увлажнении. Это указывает на лучшую эффективность очистки фасада 1-го и 2-го яруса техническим способом.

Согласно результатам эксперимента, проведенным автором, мелкодисперсная пыль способна подниматься вверх и локализоваться на верхнем участке поверхности. Это означает, что для 3-го яруса здания характерно воздействие преимущественно мелкодисперсной пыли, представленной пылью техногенного происхождения и частично природной пылью. Здесь, необходимо применение фасадных строительных материалов, исключающих задержание

частиц пыли шероховатостью поверхностного слоя макронеровностей, поскольку такие загрязнения требуют проведения специальных технических мероприятий по очистке фасада. Рельефность поверхности оказывает незначительное влияние на запыленность поверхности 3-го яруса фасада здания, поскольку мелкодисперсная пыль осаждается в равной мере, как на гладкую, так и на рельефную поверхность. Причем мелкодисперсная пыль локализуется на верхних склонах макронеровностей поверхности и часто обладает сферической формой, что благоприятствует самоочищению поверхности под действием атмосферных осадков. Поэтому для фасада третьего яруса главным показателем является высокая способность поверхности к самоочищению.

Таким образом, для снижения запыленности среды, уменьшения вероятности ее вторичного запыления и повышения эффективности утилизации пыли автор рекомендует следующие характеристики фактуры поверхностей для 1, 2 и 3-го ярусов фасадов зданий.

Для 1-го и 2-го ярусов фасада рекомендуется: средняя способность к самоочищению от крупно- и среднелдисперсной пыли (песчаной пыли); предпочтение отсутствию рельефности поверхности; может присутствовать задержание частиц шероховатостью поверхностного слоя; необходимо предусмотреть очистку поверхности фасада техническими средствами.

Для 3-го яруса рекомендуется: высокая способность к самоочищению от мелкодисперсных частиц пыли (угольная пыль); рельефность может присутствовать; отсутствие задержания частиц шероховатостью поверхностного слоя макронеровностей.

На основании полученных экспериментальных данных и выводов автором определены рекомендуемые к использованию типы штукатурок и схемы их применения.

Таким образом, фасадные поверхности зданий необходимо дифференцировать по вертикали на 1, 2 и 3-й ярусы, а также определять стороны здания, находящиеся под постоянным пылеветровым воздействием. Мероприятия по санации фасадов зданий при реконструкции застройки следует проводить с учетом результатов исследований по определению степени пылеустойчивости поверхностей фасадов и их способности к самоочищению. Это позволит снизить вероятность вторичного запыления городской жилой среды, снизить расходы на поддержание эстетического вида фасадов и повысить комфортность жилой среды в условиях реконструкции застройки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Янди К. Смог над городом. М. : Стройиздат, 1978. 109 с.
2. Карамышев В.А. Город строится в пустыне. Алма-Ата : Казахстан, 1975. 128 с.

УДК 504.5

А.С. Мякинин, Э.С. Косицына

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Приведены данные оценки влияния сети АЗС для учета результатов при разработке планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории муниципального образования.

The authors estimated the influence of filling stations network in order to take the results into consideration when planning the measures of prevention and elimination of oil and oil products leakages in the territory of a municipal unit.

Динамика роста городского автотранспорта, работающего преимущественно на жидком моторном топливе, привела к развитию инфраструктуры сервисного и иного обслуживания автомобилей, к объектам которой относятся автомобильные заправочные станции, предназначенные для осуществления технологических операций по приему, хранению и реализации нефтепродуктов, служащих топливом для двигателей внутреннего сгорания легковых, грузовых автомобилей, мотоциклов и другой автотехники.

На сегодняшний день в Российской Федерации принят ряд законодательных документов, выделяющих объекты с нефтью и нефтепродуктами в отдельную группу. Целью этих документов является заблаговременное проведение мероприятий по предупреждению нефтеразливов, поддержанию в постоянной готовности сил и средств их ликвидации, а также максимально возможное снижение ущерба и потерь в случае их возникновения.

Автомобильные заправочные станции попадают в эту группу объектов, следовательно, оценка возможного их негативного влияния в результате аварий необходима и является показателем экологической опасности данного типа объектов.

В этой связи оценка сети АЗС, например, на территории города, оправдана и выступает в качестве показателя экологической опасности для территории, так как возможный ущерб от каждого объекта выбранной совокупности в сумме может быть больше, чем одна авария с большим ущербом.

Оценка возможного негативного влияния автомобильных заправочных станций в результате аварий, в рамках концепции приемлемого риска производится путем решения задач по предупреждению или уменьшению опасности для окружающей среды до приемлемого уровня. Приемлемый уровень риска, при реально имеющихся (ограниченных) ресурсах, оценивается следующим выражением [1]:

$$\begin{cases} z_j \rightarrow \min, \\ \Delta R_\tau = \int (\dots, \{z_j\} \rightarrow R_{\tau \max})', \\ \{z_j\} \in \{Z_m\}, \end{cases} \quad (1)$$

где z_j — меры безопасности; Z_m — максимально возможное количество мер безопасности; R_τ — допустимый риск аварии.

Допустимый риск аварии, в данном случае связанный с разливами нефтепродуктов на АЗС, определяется с учетом минимального количества мероприятий по снижению тяжести их последствий.

При формировании перечня мер, влияющих на безопасность АЗС, принимались в расчет меры технического и организационного характера.

Анализ возможных мер позволил выявить минимальное количество мероприятий, направленных на обеспечение безопасности, к которым относятся:

- 1) наличие сорбентов на территории АЗС;
- 2) заключение договора страхования финансовых резервов (дополнительных расходов) на локализацию и ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций;
- 3) заключение договора с аварийно-спасательным формированием.

При оценке степени экологического риска сети АЗС был проведен анализ: месторасположения автомобильных заправочных станций, размещенных на территории города Волгограда;

возможных причин возникновения специфических видов воздействия автомобильных заправочных станций в условиях сложившейся архитектурно-планировочной структуры города;

методов оценки негативного влияния на окружающую среду от специфических видов воздействия АЗС.

На основе определенных вероятностей возникновения аварий [2, 3], выявленных источников вторичного экологического воздействия (по функциональным зонам города [4]) и обоснованных методов оценки негативного влияния [5, 6] был проведен вычислительный эксперимент. Выборка составила 20 %.

При определении величины ущерба атмосферному воздуху учитывались экстремальные условия. Так для сценария с образованием пожара разлития принималось:

- участвует максимально возможное количество нефтепродуктов;
- для резервуаров площадь разлития нефтепродуктов ограничена горизонтальным сечением;
- при разлитии на площадке автомобильной заправочной станции форма разлитых нефтепродуктов в виде круга с толщиной слоя пять сантиметров;
- сгорание нефтепродуктов происходит полностью.

В случае развития сценария аварии без возгорания пролива формы и толщина разливов принимались такие же, как и при возгорании пролива. Время испарения нефтепродуктов составляет один час.

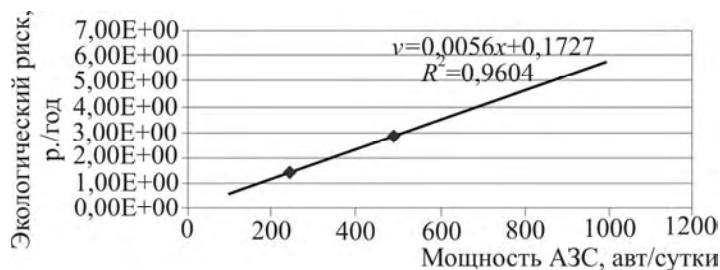
Математическая обработка полученных результатов позволила определить линейную зависимость величины экологического риска от мощности АЗС. Полученные результаты имеют практически достоверный коэффициент аппроксимации (рис. 1).

Удалось определить показатели АЗС, существенно влияющие на величину экологического риска, к которым отнесены:

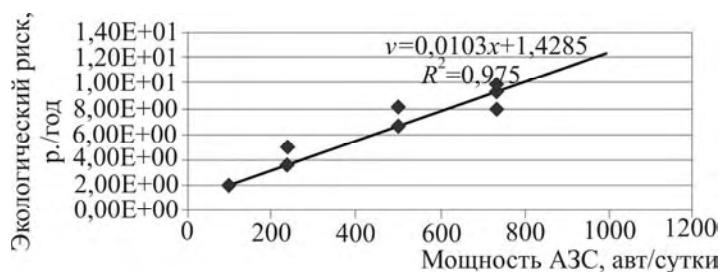
- мощность (изменение вероятность отказа устройств);
- вид нефтепродуктов (изменение величины ущерба);
- элементы технологического оборудования (изменение величины ущерба).

С использованием полученных закономерностей был определен суммарный экологический риск для АЗС города Волгограда, который составил

103,46 р/год (данная величина получена без учета источников вторичного экологического воздействия). Для сравнения полученный результат можно сопоставить, например, с Волгоградским нефтеперерабатывающим заводом где данный показатель больше на порядок и составляет до 4000 р/год.



а



б

Рис. 1. Зависимость экологического риска от мощности АЗС:
а — реализующих только бензин; б — реализующих бензин и дизельное топливо

Основными источниками неопределенностей проведенной оценки экологического риска являются:

неполнота информации по надежности оборудования и человеческим ошибкам, уровню безопасности исследуемых объектов;

принятое при оценке частот возникновения аварий предположение, что уровень безопасности на данном объекте — средний (соответствует среднему по России);

принимаемые предположения и допущения моделей аварийного процесса. Используемые модели развития аварийных процессов дают завышенные размеры зон поражения по сравнению с реальным развитием аварии в среднем на 20...30 %.

В последующем, после корректировки полученных результатов с учетом источников вторичного экологического воздействия будет произведена оценка полученных показателей риска, сопоставление их с уровнем допустимого риска.

Расчет величины экологического риска АЗС с учетом источников вторичного экологического воздействия будет проведен с использованием компьютерной программы (рис. 2), которая была создана коллективом сотрудников Главного управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям Волгоградской области, в который входил и автор.

Расчет | График воздействия | График поражения

Масса, кг: 1000 | Расстояние, м: 25

Взрыв ТВС | Огненный шар | Пожар пролива/факел

Пожар пролива | Факел (для природного газа) по Отраслевому руководству анализа риска "РАО ГАЗПРОМ"

Бензин | Высота слоя, м: 0,05 | Расчет площади | Площадь пролива, м²: 27,027027027027

Плотность, кг/м³: 740

ГОСТ 12.3.047-98
Приложение В (рекомендуемое)
МЕТОД РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОЖАРАХ ПРОЛИВОВ ЛВЖ И ГЖ
 используется также для ФАКЕЛА

0,0617	Удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с)	60	Сред. поверх. плотн. тепл. изл., кВт/м²
1,2	Плотность окружающего воздуха, кг/(м³·с)	5	Скорость движения человека, м/с
9,81	Ускорение свободного падения, м/с²	5	Время обнаружения пожара, с
11,71	Высота пламени, м	2,088616339584513	Эффективное время экспозиции, с
5,87	Эффективный диаметр пролива, м	0,467413186334148	Интенсивность тепл. изл., кВт/м²
		0	Пробит функция
		0	Вероятность, %

1,4 кВт/м² | 4,2 кВт/м² | 7 кВт/м² | 10,5 кВт/м² | 44,5 кВт/м²

16,5 | 10,2 | 7,87 | 0 | 0

от 2 до 5000 м | 3D график | График воздействия | Строить график с шагом 5 | Зоны поражения

Цвет | Значение в точках | Фон | График поражения | Точечный расчет

☐ Многоцветные

Рис. 2. Пример ввода исходных данных и получения количественных показателей интенсивности теплового излучения при пожаре пролива бензина

Разработанная компьютерная программа позволяет оценить негативное влияние барического и термического характера в результате возможных аварий на компоненты окружающей природной среды, на источники вторичного экологического воздействия на эти компоненты. Созданный программный продукт позволяет:

провести количественную оценку различных параметров поражающих факторов;

определить степени вероятного поражения людей и повреждений зданий при авариях со взрывами топливно-воздушных смесей (ТВС) и пожарами легковоспламеняющихся или горючих жидкостей.

Работа с созданной компьютерной программой строится на последовательном проведении следующих этапов:

- 1) выбор направления расчета;
- 2) ввод исходных данных;
- 3) расчет.

Реализованные программно методики позволяют выбрать следующие направления расчета: взрыв ТВС, пожар пролива, факел, огненный шар.

После выбора направления расчета и ввода исходных данных производится расчет количественных показателей:

последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей легковоспламеняющихся и горючих жидкостей;

интенсивности теплового излучения при пожаре пролива легковоспламеняющихся и горючих жидкостей.

В результате расчета с использованием созданного программного продукта:

создаются отчеты по зонам поражения выбранного вида воздействия;
строятся графики зависимостей.

Получаемая таким образом оценка возможного воздействия на вторичные источники воздействия на окружающую природную среду позволит:

- 1) уточнить величину экологического риска;
- 2) определить меры безопасности, которые будут направлены на поддержание величины экологического риска на определенном (приемлемом) уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Можжаев И.Л.* Основные принципы оценивания и нормирования приемлемого риска / И.Л. Можжаев и др. // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 8.
2. Руководство по проектированию санитарно-защитных зон промышленных предприятий. М., 1984.
3. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. М. : Изд-во стандартов, 1996.
4. Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности (1-я ред.). М. : Олита, 1996.
5. *Акимов В.А.* Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В.А. Акимов, В.В.Лесных, Н.Н. Радаев. М. : Деловой экспресс, 2004.
6. РД 03-418-01. Методические требования по проведению анализа риска опасных производственных процессов : утв. постановлением Госгортехнадзора России от 10.07.2001г. № 30.

© *Мякинин А.С., Косицына Э.С., 2006*

НАШИ АВТОРЫ

Акчурин Толгаты Кадимович	канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных материалов и специальных технологий ВолгГАСУ
Алексиков Андрей Евгеньевич	ассистент кафедры водоснабжения и водоотведения ВолгГАСУ
Алексиков Сергей Васильевич	канд. техн. наук, доцент кафедры изысканий и проектирования транспортных сооружений, декан факультета развития и безопасности транспортных систем ИТС ВолгГАСУ
Артюхин Александр Сергеевич	аспирант ВолгГАСУ
Баев Алексей Валерьевич	аспирант ВолгГАСУ
Барабаш Дмитрий Евгеньевич	канд. техн. наук, доцент, докторант Воронежского высшего авиационного инженерного училища (военного института)
Боглаев Василий Ильич	гл. инженер ОАО «Кубанский гипс Кнауф»
Богомолов Александр Николаевич	д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой информатики и вычислительной математики ВолгГАСУ
Бубнов Алексей Александрович	аспирант кафедры информатики Саратовского государственного университета
Быков Анатолий Александрович	руководитель Нижне-Волжского бассейнового управления
Вилкова Ирина Михайловна	канд. экон. наук, доц. кафедры изысканий и проектирования транспортных сооружений, ст. научный сотрудник дорожно-транспортного научно-образовательно-инженерного центра при ИТС ВолгГАСУ
Вихарева Оксана Александровна	аспирант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений ВолгГАСУ
Вовко Владимир Владимирович	канд. техн. наук, доц. кафедры строительных материалов и специальных технологий ВолгГАСУ
Галишникова Вера Владимировна	канд. техн. наук, Ph. D., доцент, проф. кафедры строительной механики, начальник управления международного образования и сотрудничества ВолгГАСУ
Гвоздков Александр Николаевич	канд. техн. наук, доц. кафедры отопления, вентиляции и экологической безопасности ВолгГАСУ, советник РААСН
Герашенко Алла Анатольевна	старший преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения ВолгГАСУ
Гришина Ирина Николаевна	аспирант кафедры строительной механики ВолгГАСУ
Грязнов Михаил Витальевич	ассистент кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета
Девятков Михаил Михайлович	канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой изысканий и проектирования транспортных сооружений, директор ИТС ВолгГАСУ
Ефанов Алексей Викторович	инженер, аспирант кафедры мостов и транспортных тоннелей Саратовского государственного технического университета
Ефремова Татьяна Васильевна	канд. техн. наук, доц. кафедры теплогазоснабжения ВолгГАСУ
Жарков Анатолий Федорович	канд. техн. наук, доц. кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений ВолгГАСУ
Жданкин Николай Юрьевич	соискатель, начальник учебной лаборатории кафедры военной архитектуры Военного инженерно-технического университета, г. Санкт-Петербург
Журбина Екатерина Игоревна	старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью ВолгГАСУ
Зеленев Григорий Викторович	адъюнкт Воронежского высшего военного авиационного инженерного училища (военного института)
Кабанин Владимир Вячеславович	канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник отдела прочности ОАО «НИИХиммаш», г. Москва
Кабанов Андрей Николаевич	адъюнкт кафедры военной архитектуры Военного инженерно-технического университета, г. Санкт-Петербург
Калгин Юрий Иванович	канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
Канаева Ольга Викторовна	канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник отдела прочности ОАО «НИИХиммаш», г. Москва
Карпов Владимир Васильевич	д-р техн. наук, профессор, проф. кафедры прикладной математики и информатики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета
Корнеев Александр Дмитриевич	д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных материалов Липецкого государственного технического университета
Королев Сергей Анатольевич	аспирант ВолгГАСУ

Косицына Эльвира Сергеевна	канд. техн. наук, проф. кафедры экологического строительства и городского хозяйства ВолгГАСУ
Котляревский Александр Александрович	ассистент кафедры строительных материалов и специальных технологий ВолгГАСУ
Кофтин Виталий Викторович	соискатель ВолгГАСУ, менеджер ООО «Верго-С», г. Саратов
Крингс Вольфганг	доктор-инженер, профессор, Высшая техническая школа г. Кёльна (Университет прикладных наук), Германия
Кудрявцев Василий Константинович	аспирант кафедры прикладной математики и информатики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета
Куницын Андрей Александрович	аспирант кафедры строительной механики ВолгГАСУ
Лаврушин Евгений Евгеньевич	канд. архит., доцент, действительный член Академии проблем безопасности, обороны и правопорядка по секции «Градостроительство и архитектура», гл. архитектор Санкт-Петербургского гарнизона, нач. кафедры военной архитектуры Военного инженерно-технического университета
Лебедь Евгений Васильевич	канд. техн. наук, доцент, доц. кафедры информационных систем и математического моделирования ВолгГАСУ
Мариненко Елена Егоровна	канд. техн. наук, доцент, проф. кафедры теплогазоснабжения ВолгГАСУ
Мантуров Загир Абдулнасирович	канд. техн. наук, доцент, доц., зам. зав. кафедрой материаловедения и технологии конструкционных материалов Дагестанского государственного технического университета
Межнякова Анна Владимировна	аспирант кафедры мостов и транспортных сооружений Саратовского государственного технического университета
Москвичева Елена Викторовна	д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой водоснабжения и водоотведения ВолгГАСУ
Мякинин Алексей Сергеевич	бакалавр техники и технологий, начальник отдела декларирования и анализа риска Главного управления МЧС России по Волгоградской области
Наумова Галина Алексеевна	д-р техн. наук, профессор, проф. кафедры строительной механики, проректор по научной работе ВолгГАСУ
Овчинников Игорь Георгиевич	д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой мостов и транспортных тоннелей Саратовского государственного технического университета, заслуженный деятель науки РФ, академик МАН ВШ и Академии транспорта РФ, член Американского общества гражданских инженеров и Международной ассоциации по мостам и конструкциям
Овчинников Илья Игоревич	ассистент кафедры мостов и транспортных сооружений Саратовского государственного технического университета
Паль Петер Ян	профессор, Технический университет Берлина, Германия
Перехоженцев Анатолий Георгиевич	д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой архитектуры ВолгГАСУ
Россошанский Виталий Викторович	аспирант ВолгГАСУ
Рощина Светлана Ивановна	канд. техн. наук, доцент, зам. декана архитектурно-строительного факультета Владимирского государственного университета
Рушковский Павел Владимирович	аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения ВолгГАСУ
Сапрыкина Наталья Сергеевна	канд. архит., доцент, доц. кафедры архитектуры, зам. декана архитектурно-строительного факультета по науке Ярославского государственного технического университета
Стеценко Светлана Евгеньевна	ассистент кафедры экологического строительства и городского хозяйства ВолгГАСУ
Тетерев Максим Владимирович	аспирант ВолгГАСУ
Тотурбиев Адильбий Батырбиевич	ген. директор ЗАО «Сапфирстрой», соискатель Северо-Кавказского государственного технического университета
Тюрин Андрей Сергеевич	аспирант ВолгГАСУ
Ушаков Алексей Васильевич	инженер кафедры строительных материалов и специальных технологий ВолгГАСУ
Филин Геннадий Сергеевич	канд. экон. наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (СГАУ)
Христофорова Татьяна Николаевна	преподаватель кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета
Черкасов Андрей Валерьевич	ассистент кафедры теплогазоснабжения ВолгГАСУ
Шиян Станислав Иванович	канд. техн. наук, ген. директор ПИ «Укргазниипроект»
Шорстов Андрей Михайлович	гл. инженер МУ «Управление строительства г. Липецка»
Черешнев Игорь Владимирович	канд. архит., доцент, доц. кафедры дизайна и монументально-декоративного искусства ВолгГАСУ
Черешнева Нурия Варисовна	ст. преподаватель кафедры градостроительства ВолгГАСУ
Юшкова Наталия Геннадиевна	канд. архит., доц. кафедры градостроительства ВолгГАСУ

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

В соответствии с Положением о «Вестнике Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета» журнал выходит четырьмя сериями («Строительство и архитектура», «Технические науки», «Естественные науки» — по одному выпуску каждой серии ежегодно, «Гуманитарные науки» — ежеквартально).

Журнал входит в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Требования к оформлению статей. Статью необходимо представить на электронном носителе и в распечатанном виде (2 экз.) в сопровождении **выписки из решения совета института (для авторов из ВолгГАСУ), выписки из протокола заседания кафедры и одной рецензии. К статьям по разделам технических и естественных наук прилагается экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.**

В статье приводятся: *индекс УДК; на русском и английском языках: фамилия и инициалы автора, заглавие и аннотация (до 500 знаков). На отдельном листе помещаются сведения об авторах (фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звание, должность, место работы, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты для связи с редакцией); текст статьи и сведения об авторах заверяются личной подписью автора (авторов) статьи.*

Объем статьи — от 3 до 7 с. установленного формата «Вестника» (см. ниже), включая название, аннотации, текст, таблицы, рисунки, библиографический список. Последняя страница считается полной независимо от фактического заполнения.

Оригинал статьи должен быть набран с помощью пакета программ *Microsoft Office (Word 2003)*; шрифт *основного текста* — Times New Roman (Сур) № 11 (11 пунктов). Параметры страницы — поля, см: верхнее — 3,7; нижнее — 4,5; левое — 2,0; правое — 6,0; переплет — 0, поля зеркальные. Расстояние от края до верхнего колонтитула, см — 3,0, от края до нижнего колонтитула — 3,7. Абзацный отступ равен 0,75 см. Межстрочный интервал одинарный. Автоматически устанавливаются переносы (не более 4 подряд в одном абзаце). Автоматически устанавливается запрет висячих строк.

Для набора формул используется только редактор формул *Microsoft Equation*; по умолчанию устанавливаются размеры шрифта для одно- и двухстрочных формул: обычного — 11 пт, крупного и мелкого индекса — соответственно 8 и 6 пунктов, крупного и мелкого символа — соответственно 16 и 11 пунктов. Греческие и русские буквы набираются прямым шрифтом, латинские — курсивом. Если написание в формулах отличается от традиционного, автор должен сделать соответствующие пометки на полях распечатанной статьи, при этом греческие буквы обводятся красным карандашом, готические — синим. Формулы выключаются в левый край с абзацным отступом. Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

Векторные рисунки, сохраненные в формате WMF, *растровые* — в TIF или BMP, *графики и диаграммы*, построенные в *Microsoft Excel*, помещаются на электронный носитель отдельными файлами. Имя файла должно соответствовать наименованию или номеру рисунка в тексте статьи. Кроме того, *иллюстрации* обязательно присылаются распечатанными на отдельных листах формата A4 в масштабе 1:1, в пригодном для сканирования виде. Размер шрифта текста в рисунках — 9-10 пт. *Подписи к рисункам* выполняются непосредственно в тексте статьи шрифтом Times № 10 (10 пт), *экспликация в подрисуночной подписи* — Times № 9 (9 пт). Для сжатия больших файлов использовать архиваторы Arj и WinZip, WinRAR.

Цветные и черно-белые фотографии присылать в оригинальном виде с подписями на обороте. Цифровые фотографии выполнять с разрешением не менее 300...600 dpi, присылать в электронном виде в любом графическом формате, кроме .jpg.

Текст *таблиц* набирается шрифтом Times New Roman (Сур) № 10 (10 пунктов).

В *библиографическом списке* приводится только цитируемая в статье литература. Источники группируются в списке в порядке упоминания в тексте. Ссылки на источники приводятся в тексте в квадратных скобках. В библиографическую запись включаются только основные элементы библиографического описания (ГОСТ 7.1—2003). Разделительные знаки «тире» между областями опускаются. Шрифт Times New Roman (Сур) № 9 (9 пунктов).

Статьи, не отвечающие изложенным требованиям, редколлегией не принимаются. Материалы, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются.

Статьи могут быть направлены редакцией на дополнительную экспертизу (рецензирование) и опубликованы только при положительном заключении.

Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста. Корректур статей авторам не предоставляется. Согласование редакционных и авторских изменений текста статьи (переписка, тел. переговоры) производится за счет автора.

Гонорар за опубликование статьи не выплачивается.

КОМПЛЕКТОВАНИЕ ОЧЕРЕДНОГО НОМЕРА ЗАВЕРШАЕТСЯ ЗА 3 МЕСЯЦА ДО ПЛАНИРУЕМОГО ВЫХОДА В СВЕТ.

Примерный график выпуска журнала по сериям:

«Естественные науки» — март (прием статей до 1 декабря);

«Гуманитарные науки» — март, июнь, сентябрь, декабрь;

«Технические науки» — сентябрь (прием статей до 1 июня);

«Строительство и архитектура» — декабрь (прием статей до 1 сентября).

Рубрики тематических серий журнала

ISSN 1815-4344. Серия «Гуманитарные науки»

Экономические науки. Педагогические науки. Проблемы организации высшего профессионального образования. Философские науки. Социологические науки. Социальная психология. Культурология. Исторические науки. Политические науки. Архитектура. Искусствоведение. Филологические науки. Хроника.

ISSN 1815-4360. Серия «Строительство и архитектура»

Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания, фундаменты, подземные сооружения. Строительная механика. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов. Строительные материалы и изделия. Гидротехническое строительство. Технология и организация строительства. Гидравлика и инженерная гидрология. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. Градостроительство. Теория развития города. Управление инвестиционно-градоостроительной деятельностью. Экологические проблемы градостроительства. Научно-методический раздел. Методика преподавания дисциплин строительного и архитектурного направлений в вузе. Хроника.

ISSN 1815-4336. Серия «Естественные науки»

Физико-математические науки. Химические науки. Биологические науки. Экология. Науки о Земле. Минералогия. Инженерная геология. Гидрогеология. Строительство и эксплуатации нефтегазопроводов, баз и хранилищ. Геомеханика. Разрушение горных пород. Геотехнология (физ.-техн., физ.-хим., строительная). География почв и геохимия ландшафтов. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. Гидрология суши. Водные ресурсы, гидрохимия. Геодезия. Геоинформатика. Геоэкология. Научно-методический раздел. Методика преподавания дисциплин естественно-научного цикла в вузе. Хроника

ISSN 1815-4352. Серия «Технические науки»

Инженерная геометрия и компьютерная графика. Машиностроение. Транспортное, горное и строительное машиностроение. Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины. Информатика, вычислительная техника и управление. Энергетика. Metallургия. Химическая технология. Транспорт. Документальная информация. Библиотечное дело, библиографоведение. Безопасность деятельности человека. Организация высшего образования в области техники и технологий. Методика преподавания технических дисциплин. Строительство (некоторые разделы — только по специально принятому решению редколлегии и гл. редактора журнала). Хроника.

По вопросам подготовки авторского оригинала статьи к печати обращаться по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. В-210, Редакционно-издательский отдел ВолгГАСУ. Тел. (8-442)-96-98-28. E-mail: gorachevae@mail.ru.

Статьи направлять по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. Б-314а. Отв. секретарю редсовета «Вестника ВолгГАСУ» Воробьеву В.И. (Тел. (8-442)-96-98-46).

Уточнить условия публикации статей и приобретения очередного номера журнала можно по тел. (8-442)-96-98-46.

Информация о журнале представлена на сайте ВолгГАСУ www.vgasu.ru.

Вниманию читателей и авторов!

На очередные выпуски журнала

первого полугодия 2007 г.

(серии «Естественные науки», «Гуманитарные науки»)

можно подписаться

по каталогу «ПРЕССА РОССИИ», индекс 85343,

по Интернет-каталогу агентства «Книга-Сервис», индекс E85343.

Обращайтесь в отделения ФГУП «Почта России».

Дополнительная информация о подписке и приобретении выпусков журнала по телефону редакции **(8-844-2)-96-98-46**

Научное издание

ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Строительство и архитектура
2006. Вып. 6 (21)

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

Редактор *О.Е. Горячева*
Перевод на английский язык *Н.В. Бирюкова*
Компьютерная правка и верстка *Е.Л. Песчаная, О.Е. Горячева*
Компьютерный дизайн *О.Ю. Мелешин*
Информационно-библиографическое обслуживание выпуска *С.И. Гулина*

Подписано в печать 20.11.06. Формат 70х108/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Уч.-изд. л. 15,46. Усл. печ. л. 18,9. Тираж 500 экз. (1-й завод — 120 экз.) Заказ №

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
Редакционно-издательский отдел
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Отпечатано в ОАО «ИПК «Царицын»»
г. Волгоград, ул. Коммунистическая, 11