Федеральное агентство по образованию

## **ВЕСТНИК**

# ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

# Серия: Строительство и архитектура

Выпуск 14 (33)

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

2009

Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroiteľnogo universiteta Seriya: Stroiteľstvo i arhitektura

(Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1999 г.

Волгоград ВолгГАСУ

# Содержание

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

| <b>Богомолов А.Н., Нестратов М.Ю., Соловьев А.В., Шиян С.И.</b> Новый критерий оценки длительной |    |
|--|----|
| устойчивости однородных откосов на основе анализа напряженно-деформированного состояния          | 5  |
| Олянский Ю.И., Щекочихина Е.В. Реологическая оценка сарматских глин как основа регио-            |    |
| нального прогноза оползней течения   | 13 |
| <b>Долганов А.П., Махова С.И., Синяков В.Н.</b> Петрографо-минералогическая характеристика       |    |
| грунтов мечеткинской свиты палеогена   | 17 |
| <b>Масляев А.В.</b> Основные критерии сейсмозащиты зданий и сооружений с большим числом          |    |
| людей при землетрясении  | 21 |
| <b>Матвеенко В.П., Клигман Е.П.</b> Анализ и развитие современных компьютерных методов расче-    |    |
| та узла плита — колонна в монолитных и сборно-монолитных конструкциях                            | 27 |
| <b>Офрихтер В.Г.</b> Особенности классификации твердых отходов                                   | 33 |
| СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА  |    |
| <b>Галишникова В.В.</b> Вывод разрешающих уравнений задачи геометрически нелинейного дефор-      |    |
| мирования пространственных ферм на основе унифицированного подхода                               | 39 |
| Галишникова В.В. Постановка задачи геометрически нелинейного деформирования простран-            |    |
| ственных ферм на основе метода конечных элементов  | 50 |
| Соколов О.Л. Пространственный расчет обделок тоннелей мелкого заложения                          | 59 |
| Жиделёв А.В. Расчет геометрически нелинейных стержневых систем с наличием наклонных связей       | 66 |
| <b>Игнатьев А.В., Габова В.В.</b> Алгоритм формирования глобальной матрицы откликов плоской      |    |
| стержневой системы   | 71 |
| Габова В.В., Игнатьев А.В. Получение матрицы откликов стержневого конечного элемента             |    |
| плоской стержневой системы на основе смешанного вариационного принципа                           | 75 |
|  |    |

| ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ   |            |
|--|------------|
| <b>Кочетков А.В., Чванов А.В., Аржанухина С.П.</b> Научные основы нормирования шероховатых   | 00         |
| поверхностей дорожных покрытий   | 80         |
| Ковалев Н.С. Исследование комплексного воздействия факторов на предельное относительное  | 87         |
| удлинение асфальтобетона из шлаковых материалов  | 94         |
| <b>Стадник Р.А.</b> Совершенствование методов расчета местного размыва у опор мостовых переходов   | 94         |
| ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА   |            |
| <b>Диденко В.Г., Мельникова Т.В.</b> Разработка и апробация технологии обеспечения экологиче-  | 100        |
| ской безопасности при строительстве и эксплуатации скважин   | 102        |
| <b>Стефаненко И.В.</b> Перспективы развития высоких технологий в строительной области и эколо-   | 108        |
| гии в XXI веке <b>Полковников Ю.Ф., Новиков В.С., Полковникова Л.С.</b> Нанотехнология сооружения инженер-   | 100        |
| ных сетей без труб методом плазменного обжига грунта с комплексной рекультивацией полосы   |            |
| отвода под трубопровод   | 112        |
| СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ   |            |
| **   |            |
| <b>Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Касьяненко Н.С., Смельцов В.Л.</b> Прогнозирование долговечности строительных конструкций с позиций расчетного и экспериментального                  |            |
| исследования процессов коррозии бетона   | 117        |
| <b>Фокин В.М., Ковылин А.В.</b> Теоретические основы определения теплопроводности, объемной  | 117        |
| теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности   |            |
| методом неразрушающего контроля  | 123        |
| Стефаненко И.В. Снижение радиационного фона в помещении  | 128        |
| ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ   |            |
| и освещение  |            |
| Голяк С.А., Пятачков В.В. Экспериментальное определение температур на гониальных участ-  |            |
| ках поверхностей производственного здания, отапливаемого газовыми инфракрасными излуча-  |            |
| телями   | 132        |
| <b>Пятачков В.В., Голяк С.А.</b> Экспериментальное исследование распределения температур в   |            |
| зонах обслуживания технологического оборудования в зданиях производственного назначения,   | 126        |
| отапливаемых газовыми инфракрасными излучателями   | 136        |
| <b>Мамедов Н.Я.</b> Применение теории интеллектуальных систем для управления режимом потребления тепловой энергии в зданиях  | 139        |
| <b>Гопций Е.П., Фокин В.М.</b> Оценка теплофизического потенциала геотермальных скважин Вол-   | 157        |
| гоградской области   | 145        |
| <b>Азаров В.Н., Лукьянсков А.С., Самарская Ю.Г.</b> Результаты испытаний аппаратов ПВ ВЗП с  |            |
| раскручивателями в системах обеспыливающей вентиляции  | 151        |
| Плеханова Л.И., Мензелинцева Н.В. Снижение запыленности воздуха рабочей зоны операто-  | 154        |
| ров асфальтобетонных заводов как профилактика профзаболеваний<br><b>Гвоздков М.А.</b> Механизм протекания процессов тепло- и влагообмена в системе воздух — LiCl                                   | 154<br>157 |
| <b>Геоздков м.А.</b> Механизм протекания процессов тепло- и влагообмена в системе воздух — Егст<br><b>Геоздков А.Н., Геоздков М.А.</b> Изучение процессов тепло- и влагообмена в форсуночной каме- | 137        |
| ре орошения капельно-пленочного типа   | 161        |
| • •  |            |
| ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ  |            |
| <b>Голованчиков А.Б., Сиволобова Н.О., Новиков М.Г.</b> Гидродинамический метод обеззаражива-  |            |
| ния воды <b>Фомин Д.П., Морозов Д.С., Цыганкова К.В.</b> К расчету количественных характеристик процес-  | 165        |
| сов струйной аэрации жидкости  | 170        |
| <b>Мусаелян С.М., Аверкова С.А., Петросян А.Б.</b> Антропогенное воздействие на водные объекты   | 170        |
| Волгоградской области  | 176        |
| ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО   |            |
| <b>Шубин А.М.</b> Экологическая безопасность прибрежных территорий и эффективность берегоук-   |            |
| репительных мероприятий  | 100        |
|  | 182        |
| ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ. АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ  |            |
| · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·  |            |
| <b>Янушкина Ю.В.</b> Образы пространственных построений в советской архитектуре 1930—1950-х гг.  | 188        |
| ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА. УПРАВЛЕНИЕ ИНВЕСТИЦИОННО-<br>ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ   |            |
| <b>Юшкова Н.Г.</b> Градостроительное развитие территории: проблемы пространственной политики и   |            |
| государственное регулирование  | 196        |

| ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА. ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА. ГОСТИНИЧНОЕ И КУРОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО   |                                  |
|---|----------------------------------|
| <b>Иванова Н.В., Тюкова (Тур) И.Н.</b> К вопросу об основах визуальной экологии открытых городских пространств, направленных на оптимизацию комфортности жителей <b>Бульчев Г.А., Воробьев В.И., Бульчев Ф.Г.</b> Гипотеза локальных газовых опасностей (к решению проблемы снижения газовой опасности) <b>Князев Д.К., Иванова Н.В.</b> Об эколого-гигиеническом благополучии зон отдыха как главной задаче планировки рекреационных зон <b>Иванова Ю.П., Полковникова Л.С.</b> Экологическая безопасность современного мегаполиса НАШИ АВТОРЫ   | 203<br>209<br>213<br>216<br>220  |
| Contens   |                                  |
| BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. BASEMENTS, FOUNDATIONS. UNDERGROUND STRUCTURES  |                                  |
| Bogomolov A.N., Nestratov M.U., Soloviev A.V., Shiyan S.I. The new criterion of evaluation of protracted stability of homogeneous slopes based on the analysis of tense deformed condition Olyansky Yu.I., Shchekochikhina E.V. Rheological evaluation of Sarmat clays as the basis for regional forecast of liquefaction landslides  Dolganov A.P., Makhova S.I., Sinyakov V.N. Petrography-mineralogical characteristics of Palaeogen series soils of Mechetka  Maslyaev A.V. Basic criteria for antiseismic protection of buildings and constructions with large number of people at earthquake  Matveyenko V.P., Kligman E.P. Study and development of modern computer methods for the analysis of slab-column node in cast-in-place and composite structures  Ofrikhter V.G. Peculiar features of solid waste classification | 5<br>13<br>17<br>21<br>27<br>33  |
| STRUCTURAL MECHANICS  Galishnikova V.V. Statement or the problem of geometrically non-linear deformation of space trusses on  |                                  |
| the basis of Finite Element Method  Galishnikova V.V. Development of the resulting equations for the problem of geometrically non-linear deformation of space trusses on the basis of a unified approach  Sokolov O.L. Spatial analysis of shallow tunnels lining  Zhidelyov A.V. Analysis of geometrically non-linear rod systems with diagonal bracing  Ignatyev A.V., Gabova V.V. An algorithm for generating global response matrices for 2-D framed systems  Gabova V.V., Ignatyev A.V. Generating a response matrix of a 2-D frame finite element using the mixed variational principle   | 39<br>50<br>59<br>66<br>71<br>75 |
| DESIGN, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF HIGHWAYS, SUBWAYS, AERODROMES, BRIDGES AND TRAFFIC TUNNELS  |                                  |
| Kochetkov A.V., Chvanov A.V., Arzhanukhina S.P. Scientific fundamentals of norm-setting for uneven surfaces of road pavement  Kovalev N.S. Investigation of the complex influence of factors on the limiting percentage elongation of asphalt concrete made of slag materials  Stadnik R.A. Improving the methods for the analysis of local washout at the supports of bridge crossing  | 80<br>87<br>94                   |
| TECHNOLOGY AND CONTROL IN CONSTRUCTION  |                                  |
| Didenko V.G., Melnikova T.V. Exploit and approbation of technology the providing of ecological security in building of oilwells  Stefanenko I.V. Outlook for high technologies development in the sphere of civil engineering and ecology in XXI century  Polkovnikov J.F., Novikov V.S., Polkovnikova L.S. The nanotechnology of the construction of enginering networks without pipes a method of plasma roasting of a ground with complex recultivation right-of-way under the pipeline  | 102<br>108<br>112                |
| BUILDING MATERIALS AND ARTICLES   |                                  |
| Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Khrunov V.A., Kasyanenko N.S., Smeltsov V.L. Forecasting the durability of building structures from the position of analytic and experimental investigation of corrosion processes in concrete  Fokin V.M., Kovylin A.V. Theoretical fundamentals of the determination of thermal conductivity, volu-   | 117                              |
| metric heat capacity and thermal diffusivity of materials according to surface thermal measurements through the method of nondestructive test   | 123                              |

| Stefanenko I.V. Reduction of indoor radioactive background  | 128   |
|---|---|
| HEAT SUPPLY, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY<br>AND ILLUMINATION  |   |
| Golyak S.A., Pyatachkov V.V. Temperatures experimental study on gonial sections of the inductrial building with gas infrared heating system  Pyatachkov V.V., Golyak S.A. Temperatures experimental study in technological equiopment service zones of inductrial buildings with gas infrared heating system  Mamedov N.Y. Application of the theory of intellectual systems for management mode of consumption of thermal energy in buildings  Goptsy E.P., Fokin V.M. Evaluation of thermalphysic potential of geothermal wells in Volgograd region  Azarov V.N., Lukyanskov A.S., Samarskaya Yu.G. Test results for vortex flows dust chambers with untwisters in the systems of dedusting ventilation  Plekhanova L.I., Menzelintseva N.V. Reduction of dust content in the air of coating plant operators' working area as means of occupational disease prophylaxis  Gvozdkov M.A. Mechanism of the progress of heat and moisture exchange processes in the "air-LiCl" system  Gvozdkov A.N., Gvozdkov M.A. Study of the processes of heat and moisture exchange in spray air washer of trickling-film type | 132<br>136<br>139<br>145<br>151<br>154<br>157 |
| WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTIONS FOR WATER RESOURCES PROTECTION  |   |
| Golovanchikov A.B., Sivolobova N.O., Novikov M.G. Hydrodynamic method of water disinfection Fomin D.P., Morozov D.S., Thygankova K.V. To calculation of the quantitative features of the processes to jet aeration to liquids  Musaelyan S.M., Averkova S.A., Petrosyan A.B. Man's impact on water bodies of the Volgograd Region   | 165<br>170<br>176                             |
| HIDROTECHNICAL CONSTRACTION   |   |
| Shubin A.M. Ecological safety of coastal territories and efficiency of bank protection  | 182   |
| THEORY AND HISTORY OF ARCHITECTURE, RESTORATION AND RECONSTRUCTION<br>OF THE HISTORIC AND ARCHITECTURAL HERITAGE. ARCHITECTURE OF BUILDINGS<br>AND CONSTRUCTIONS  |   |
| Yanushkina Yu.V. Images of spatial constructions in Soviet architecture of 1930–1950 years  | 188   |
| URBAN PLANNING. THEORY OF URBAN DEVELOPMENT. CONTROL OF INVESTMENT URBAN PLANNING ACTIVITY  |   |
| Yushkova N.G. Urban planning territory development: issues of space policy and government regulation  | 196   |
| ENVIRONMENTAL ISSUES IN URBAN PLANNING. LANDSCAPE ARCHITECTURE.<br>HOTEL AND HEALTH RESORT CONSTRUCTION AND TOURISM   |   |
| Ivanova N.V., Tyukova(Tur) I.N. Regarding the issue of fundamentals of visual ecology of open urban spaces, aimed for comport optimization for the residents  Bulychev G.A., Vorobyev V.I., Bulychev F.G. Local gas hazards hypothesis (To the solution of the problem of gas hazard reductioin)  Knyazev D.K., Ivanova N.V. On the ecosanitary wellbeing of recreational areas as a major problem for planning recreational zones  Ivanova J.P., Polkovníkova L.S. International environmental safety of the modern megacity   | 203<br>209<br>213<br>216                      |
| OUR AUTHORS   | 220   |

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131

А.Н. Богомолов, М.Ю. Нестратов, А.В. Соловьев, С.И. Шиян

# НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОРОДНЫХ ОТКОСОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Предложен новый критерий оценки длительной устойчивости однородных грунтовых откосов, основанный на анализе напряженно-деформированного состояния приоткосной зоны. Определены его качественный признак и количественный показатель. Получены графические зависимости и их математические аппроксимации, позволяющие использовать данный критерий.

К л ю ч е в ы е слова: критерий оценки длительной устойчивости, качественный признак, количественный показатель; напряженно-деформированное состояние; грунтовый откос.

The new criterion of evaluation of protracted stability of homogeneous soil slopes based on the analysis of tense deformed condition of near sloped zone is suggested. Its quality sign and quantity index are defined. Graphic dependences of their mathematical approximations, allowing using this criterion, are gotten.

K e y w o r d s: the criterion of evaluation of protracted stability, quality sign, quantity index, tense condition, a soil slope.

Количественная оценка кратковременной (мгновенной) устойчивости откосов и склонов заключается в отыскании величины коэффициента запаса устойчивости различными методами геомеханики.

На первое место по количеству обращений можно поставить методы, при реализации которых полагается, что положение и форма поверхностей скольжения заранее заданы. Все они являются в той или иной степени удачной интерпретацией метода Шведской геотехнической комиссии, предложенного К.Е. Паттерсоном в 1916 г. [1] и основанного на гипотезе о круглоцилиндрической форме поверхности скольжения и условии предельного равновесия грунтовых масс. Применение этих методов довольно часто бывает оправданным, т.к. позволяет получить адекватные результаты. Однако в ряде случаев результаты расчета кратковременной устойчивости методами этой группы для одного и того же объекта могут существенно отличаться и даже быть противоречивыми [2].

Для определения критических нагрузок и геометрических параметров устойчивых откосов и склонов могут быть использованы методы, получившие развитие в работах В.В. Соколовского [3] и С.С. Голушкевича [4]. Одна-

ко ввиду их значительной трудоемкости, связанной с необходимостью проведения сложных графических построений, эти методы в настоящее время применяются крайне редко.

В последнее время при решении задач о кратковременной устойчивости откосов и склонов все более часто применяются методы, основанные на оценке напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Для однородных откосов и склонов эта оценка проводится на основе аналитических решений краевых задач линейной теории упругости для односвязных областей со сложной криволинейной границей, а для откосов и склонов сложного инженерно-геологического строения — численными методами.

Основные положения расчетных методов этого направления изложены в работах Н.А. Цытовича, З.Г. Тер-Мартиросяна, Д.М. Ахпателова [5; 6], В.К. Цветкова [7], А.Н. Богомолова [2] и других исследователей.

Количественную оценку длительной устойчивости откосов и склонов традиционно связывают с расчетами величин оползневых смещений и скоростей их развития во времени на основе анализа напряженно-деформированного состояния массива и теории наследственной ползучести [8].

Если размеры областей пластических деформаций или, другими словами, зон, где полностью мобилизовано сопротивление сдвигу, достаточно малы, то для отыскания напряжений можно использовать «упругие решения», например [2], а деформации, смещения и их скорости вычислять по формулам

$$\varepsilon_{x} = \sigma_{x} \frac{1 - \mu^{2}}{E} - \sigma_{y} \frac{(1 + \mu)\mu}{E};$$

$$\varepsilon_{y} = \sigma_{y} \frac{1 - \mu^{2}}{E} - \sigma_{x} \frac{(1 + \mu)\mu}{E};$$

$$\varepsilon_{xy} = \tau_{xy} \frac{2(1 + \mu)}{E};$$
(1)

$$u(t) = \int_{0}^{t} \int_{x_0}^{x} \dot{\varepsilon}_x dx dt; \quad v(t) = \int_{0}^{t} \int_{y_0}^{y} \dot{\varepsilon}_x dy dt; \tag{2}$$

$$u(t) = \frac{t}{4\eta} \int_{x_0}^{x} \left(\sigma_x - \sigma_y\right) dx; \ v(t) = \frac{t}{4\eta} \int_{y_0}^{y} \left(\sigma_y - \sigma_x\right) dy; \tag{3}$$

$$\dot{u} = \int_{x_0}^x \dot{\varepsilon}_x dx \; ; \; \dot{v} = \int_{y_0}^y \dot{\varepsilon}_y dy, \tag{4}$$

где  $\sigma_y$ ;  $\sigma_x$ ;  $\tau_{xy}$ ;  $\mu$ ; E и  $\eta$  — соответственно компоненты напряжения, коэффициент Пуассона, модуль упругости и коэффициент вязкости; формулы (3) соответствуют стационарному полю напряжений

Процесс, которому при этом подвергнут весь грунтовый массив, нельзя, наверное, с достаточной полнотой назвать процессом разрушения. Если он протекает без нарушения сплошности грунтового массива, то это, скорее всего, будет процесс формоизменения, процесс изменения формы поперечного сечения объекта. Этот процесс будет протекать до тех пор, пока рассматриваемый объект не придет в равновесное состояние. Тем не менее возникновение и развитие самого этого процесса, неважно, как его назовем, может иметь

катастрофические последствия как для сооружений, расположенных на исследуемом объекте, так и для его окрестностей.

Если области пластических деформаций занимают существенный объем грунтового массива и наиболее вероятная поверхность скольжения частично расположена в этом объеме, то изложенный выше подход становится неприемлемым. В этом случае достоверное прогнозирование длительной устойчивости откосов и склонов является весьма затруднительным.

Известно [2], что величина коэффициента запаса устойчивости откоса при наличии в грунтовом массиве областей пластических деформаций может быть определена по формуле

$$K = \frac{\sum S_{yx} + \sum S'_{yx}}{\sum S_{cx} + \sum S'_{cx}},$$
 (5)

где  $\sum S'_{yz}$  и  $\sum S'_{cz}$  — суммарные площади эпюр удерживающих и сдвигающих сил, действующих вдоль участков наиболее вероятной поверхности скольжения, находящихся внутри областей пластических деформаций;  $\sum S_{yz}$  и  $\sum S_{cz}$  — то же для участков наиболее вероятной поверхности скольжения, находящихся вне границ областей пластических деформаций.

Анализ формулы (5) показывает, что время, которое должно пройти с момента начала наблюдения за откосом до момента его разрушения, равно времени протекания процесса перераспределения напряжений, в результате которого будет выполнено условие  $\sum S_{yz} = \sum S_{cz} = 0$ , так как всегда справедливы соотношения  $\sum S_{yz} / \sum S_{cz} > 1$  и  $\sum S_{yz}' / \sum S_{cz}' = 1$ .

В настоящее время задача об отыскании времени завершения процесса перераспределения напряжений не решена. Это объясняется тем, что закономерности разрушения грунтовых образцов, получаемые в условиях лабораторных испытаний при различных контролируемых режимах нагружения, не могут адекватно соответствовать природному механизму разрушения грунтового массива.

Установлено [9; 10], что процесс перераспределения напряжений автоматически «запускается» при определенных условиях: если сочетание физико-механических свойств и геометрических параметров грунтового откоса таково, что в нем предопределено возникновение областей предельного состояния грунта (ОПСГ), то обусловленный этим перманентный процесс перераспределения напряжений обязательно завершится его разрушением. Разрушение откоса произойдет тогда, когда область предельного состояния грунта достигнет определенного размера или, другими словами, произойдет достаточное накопление пластических деформаций.

Если ОПСГ изначально отсутствуют и нет причин для их образования, то целостности грунтового откоса ничто не угрожает, и он может существовать сколь угодно долго.

С целью определения таких сочетаний физико-механических свойств грунта и геометрических параметров однородного откоса, при которых заведомо отсутствуют области предельного состояния грунта, проведено численное моделирование процесса образования ОПСГ. Для этого использована

разработанная в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете компьютерная программа [11], в которой для определения напряжений формализован метод конечных элементов (МКЭ), а граница областей предельного состояния грунта определяется как геометрическое место точек, в каждой из которых выполняется условие

$$K_{m} = \frac{\left[\frac{1}{2}(\sigma_{Z} - \sigma_{X})\cos 2\alpha + \frac{1}{2}(\sigma_{X} - \sigma_{Z}) + \tau_{XZ}\sin 2\alpha + \sigma_{cB}\right] \operatorname{tg} \varphi}{\frac{1}{2}(\sigma_{X} - \sigma_{Z})\sin 2\alpha + \tau_{XZ}\cos 2\alpha} = 1, \tag{6}$$

где  $K_m$ ;  $\sigma_z$ ;  $\sigma_x$ ;  $\tau_{xz}$  и  $\alpha$  — соответственно коэффициент запаса устойчивости, компоненты безразмерных (в долях  $\gamma$  h) напряжений и угол наклона наиболее вероятной площадки сдвига в рассматриваемой точке грунтового массива;  $\sigma_{cb} = C(\gamma h t g \phi)^{-1}$  — приведенное давление связности; C;  $\phi$ ;  $\gamma$  — удельное сцепление, угол внутреннего трения, объемный вес грунта; h — высота откоса.

Угол наклона наиболее вероятной площадки сдвига, площадки, по которой величина коэффициента запаса устойчивости минимальна, определяется исходя из условий [7]

$$\frac{\partial K}{\partial \alpha} = 0;$$

$$\frac{\partial^2 K}{\partial \alpha^2} > 0$$
(7)

по формуле

$$\sin 2\alpha_{1;2} = -\frac{2\tau_{xz}}{B} \pm (\sigma_z - \sigma_x) \sqrt{\frac{B^2 - D}{B^2 D}},$$
 (8)

где 
$$B = (\sigma_z + \sigma_x + 2\sigma_{cB}); D = 4\tau_{xz}^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2$$
.

Для проведения компьютерного моделирования процесса зарождения областей предельного состояния грунта необходимо определить пределы изменения переменных параметров, обусловливающих форму и размеры ОПСГ.

Анализ формул (6) и (8) показывает, что численное значение величины  $K_m$  в каждой точке грунтового массива однозначно определено численными значениями напряжений и физико-механических свойств грунта C и  $\sigma_{cb}$ . В свою очередь, напряжения в точках однородного откоса зависят от угла его заложения  $\beta$ , высоты h, коэффициента бокового давления  $\xi_0$  и удельного веса грунта  $\gamma$ .

На основе анализа значений величин удельного сцепления C, угла внутреннего трения  $\phi$  и объемного веса  $\gamma$  песчаных и пылевато-глинистых грунтов, приведенных в [12], с учетом реальных значений высот откосов и склонов принято, что величина приведенного давления связности при проведении компьютерного моделирования будет принимать десять значений в интервале  $\sigma_{cs} = C(\gamma h \text{tg} \, \phi)^{-1} \in [0,02...2]$ . Коэффициенту бокового давления будут поочередно присваиваться значения  $\xi_{o} = 0.3$ ; 0,5; 0,75; 0,9, а углу откоса  $\beta = 35$ ; 45; 60; 75; 90°.

При проведении компьютерного моделирования расчетные схемы МКЭ включали в себя от 8448 до 10752 элементов, сопряженных в 4369...5537 уз-

лах, ширина матрицы жесткости системы находилась в пределах 90...118. Размеры расчетных схем выбирались таким образом, чтобы исключить их влияние на результат процедуры вычисления напряжений. В результате проведенных вычислений построены графические зависимости вида  $\phi = f(\sigma_{cB})$  (рис. 1) для всех возможных сочетаний численных значений переменных параметров, которые оговорены выше.

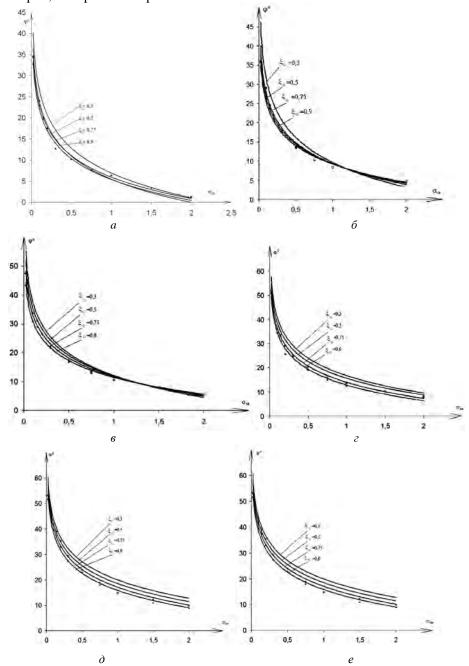


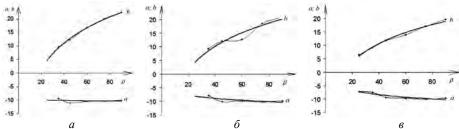
Рис. 1. Графики зависимостей вида  $\varphi = f(\sigma_{cs})$  для однородных откосов с углами  $\beta$ , равными  $25^{\circ}$  (a);  $35^{\circ}$  ( $\delta$ );  $45^{\circ}$  (s);  $60^{\circ}$  (s);  $75^{\circ}$  ( $\delta$ ) и  $90^{\circ}$  (s)

Оказалось, что все эти без исключения кривые могут быть с точностью до 5 % аппроксимированы следующей зависимостью

$$\varphi = a \ln(\sigma_{_{CB}}) + b \,, \tag{9}$$

где a и b — коэффициенты, определяемые по графикам, приведенным на рис. 2, и имеющие размерность [град].

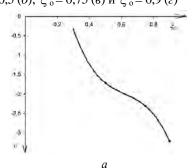
В свою очередь, кривые, приведенные на рис. 2, также могут быть с достаточной степенью точности аппроксимированы логарифмической зависимостью, аналогичной зависимости (9).

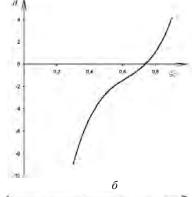


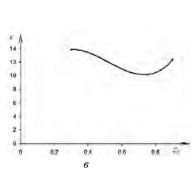
Тогда выражение (9) примет вид  $\varphi = -(c \ln(\beta) + d) \ln(\sigma_{cB}) + (e \ln(\beta) - k),$  (10)

где  $\beta$  — значение угла откоса в град, но без размерности; коэффициенты c; d; e и k определяются по графикам, приведенным на рис. 3, и имеют размерность [град].

Рис. 2. Графики зависимостей вида  $a=f(\beta)$  и  $b=f(\beta)$  при  $\xi_o=0.3$  (a);  $\xi_o=0.5$  (a);  $\xi_o=0.75$  (a) и  $\xi_o=0.9$  (a)







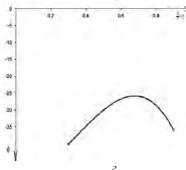


Рис. 3. Графические зависимости  $c = f(\xi_0)(a); d = f(\xi_0)(\delta); e = f(\xi_0)(\delta)$  и  $k = f(\xi_0)(\delta)$ 

Используя полиноминальную аппроксимацию, удалось записать уравнения кривых, изображенных на рис. 3, в следующем виде:

$$c = -32,017\xi_{0}^{3} + 59,733\xi_{0}^{2} - 39,039\xi_{0} + 6,8729;$$

$$d = 137,42\xi_{0}^{3} - 257,86\xi_{0}^{2} + 170,4\xi_{0} - 40,555;$$

$$e = 98,443\xi_{0}^{3} - 153,61\xi_{0}^{2} + 66,65\xi_{0} + 5,0414;$$

$$k = -168,89\xi_{0}^{3} + 179,47\xi_{0}^{2} - 10,615\xi_{0} - 48,522.$$

$$(11)$$

Теперь, используя полученные аналитические зависимости, совсем нетрудно определить предельно допустимую высоту однородного откоса, исходя из условия, что в грунтовом массиве отсутствуют области пластического состояния грунта.

П р и м е р. Пусть предполагается устроить однородный откос высотой H=20 м, с углом заложения  $\beta=45^\circ$  из суглинка с углом внутреннего трения  $\phi=16^\circ$ , удельным сцеплением C=0.016 МПа, коэффициентом бокового давления  $\xi_0=0.75$  и объемным весом  $\gamma=2$  т/м³. Требуется сделать прогноз о длительной устойчивости такого откоса и, в случае необходимости, дать рекомендации по максимально возможной высоте откоса, обеспечивающей его длительную устойчивость.

Подставляя значение  $\xi_o = 0.75$  в формулы (11) и проводя вычисления, получим: c = -2.31; d = 0.175; e = 10.15; k = -26.78. Полученные значения используем при вычислении значения  $\phi_{pac}$ , при котором в грунтовом массиве отсутствуют области пластического состояния грунта, по формуле (10). В результате имеем  $\phi_{pac} = 29^{\circ}$ , что не соответствует заданному проектному значению угла внутреннего трения, т.е. в грунтовом откосе с такими параметрами присутствуют значительные по размеру (об этом говорит разница между проектным значением угла внутреннего трения  $\phi_{np} = 16^{\circ}$ , и его расчетным значением  $\phi_{pac} = 29^{\circ}$ ) области предельного состояния грунта и его длительная устойчивость не гарантирована.

Проверим полученный результат расчетом, выполненным при помощи разработанной в ВолгГАСУ компьютерной программы [11].

На рис. 4, a приведена область предельного состояния грунта и наиболее вероятная линия скольжения, построенные в однородном откосе, сложенном суглинком с перечисленными выше свойствами. Из рисунка видно, что область предельного состояния грунта занимает около 40 % призмы скольжения. Расчетное значение величины коэффициента запаса устойчивости получено равным K=1,14. Как видно, полученный результат может оказаться неудовлетворительным и при расчете кратковременной устойчивости [12].

Максимально допустимая высота откоса определяется обратным расчетом, исходя из условия равенства величин проектного и расчетного приведенного давления связности (см. пояснение к формуле (6)). Выполнив вычисления, получим, что максимальная высота откоса, соответствующая выполнению условия отсутствия областей предельного состояния грунта а, значит, обеспечивающая его длительную устойчивость, равна  $H=10,5\,$  м. Это подтверждается также тем, что, как видно из рис. 4,  $\delta$ , область предельного со-

стояния грунта пренебрежимо мала. Расчетное значение величины коэффициента запаса устойчивости получено равным K = 1,69.

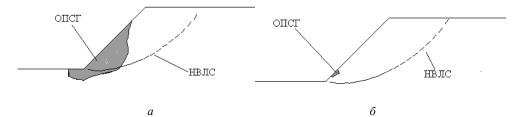


Рис. 4. Области предельного состояния грунта и наиболее вероятные линии скольжения в откосе высотой H, м: 20 (a) и 10,5 ( $\delta$ )

#### Выводы

- 1. Предложен новый критерий оценки длительной устойчивости грунтовых откосов, основанный на анализе напряженно-деформированного состояния приоткосной зоны и определении размеров областей предельного состояния грунта.
- 2. Получены графические зависимости и аппроксимирующие выражения, позволяющие определять параметры грунтового откоса, обеспечивающие его длительную устойчивость.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Petterson K.E. Kajraseti Goteborg des 5-te mars 1916 // Tekniske Tidskrift. V. 46. 1916.
- 2. *Богомолов А.Н.* Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь : ПГТУ, 1996.
  - 3. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: АН СССР, 1942.
- 4. *Голушкевич С.С.* Статика предельных состояний грунтовых масс. М.: Гостехтеориздат, 1957.
- 5. *Тер-Мартиросян З.Г., Ахпателов Д.М.* Расчет напряженно-деформированного состояния массивов многофазных грунтов. М.: МИСИ, 1982.
- 6. *Цытович Н.А.*, *Тер-Мартиросян З.Г.* Основы прикладной геомеханики в строительстве. М.: Высшая школа, 1981.
- 7. *Цветков В. К.* Расчет устойчивости откосов и склонов. Волгоград : Нижн.-Волж. кн. изд-во, 1979.
  - 8. Арутнонян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.: Гостехтеориздат, 1952.
- 9. К вопросу о величине коэффициента запаса устойчивости грунтового массива / А.Н. Богомолов, С.И. Шиян, О.А. Богомолова, Т.А. Сабитова // Геотехнические проблемы XXI века в строительстве зданий и сооружений : тр. Междунар. конфер. Пермь : ПГТУ, 2007.
- 10. К вопросу об обеспечении устойчивости насыпей грунтовых сооружений / А.Н. Богомолов, С.И. Шиян, О.А. Богомолова, Т.А. Сабитова // Геотехнические проблемы XXI века в строительстве зданий и сооружений : тр. Междунар. конфер. Пермь : ПГТУ, 2007.
- 11. *Богомолов А.Н.*, *Ушаков А.Н.*, *Редин А.В.* Программа «Stress-Plast» для ПЭВМ: информ. листок № 313-96. Нижн.-Волж. ЦНТИ. Волгоград, 1996.
- 12. СНиП 2.03.01— $83^*$ . Основания зданий и сооружений / Госстрой СССР. М. : Стройиздат, 1985.

© Богомолов А.Н., Нестратов М.Ю., Соловьев А.В., Шиян С.И., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

УДК 624.131

### Ю.И. Олянский, Е.В. Щекочихина

# РЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА САРМАТСКИХ ГЛИН КАК ОСНОВА РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕЙ ТЕЧЕНИЯ

Выполнены реологические исследования глин при влажности на пределе текучести. Анализ результатов позволил выделить типы глин, наиболее предрасположенные к образованию оползней течения.

Ключевые слова: оползни течения; сарматские глины.

Was study the reological propertys of sarmut clay. Distinguish the type of clay favourable for make lands lide.

K e y w o r d s: liquefaction landslides; Sarmat clays.

В результате выветривания глинистые породы активно разрушаются и часто образуют плащевидные скопления бесструктурных пород на склонах. При насыщении водой эти образования переходят в текучее состояние, возникают оползневые явления. Исследование реологических свойств глинистых пород с нарушенной структурой позволяет прогнозировать их способность к образованию оползней при увлажнении.

Исследования осуществлялись в лабораторных условиях на ротационном вискозиметре Воларовича (РВ-8) по методу установления изменения скорости деформации и эффективной вязкости с ростом действующего напряжения сдвига на образцах нарушенного сложения (пастах) с максимальным размером агрегатов, равным 1 мм, при влажности, соответствующей пределу текучести. Всего выполнено 50 опытов.

Для изученных глин были получены реологические кривые  $d\varepsilon | d\tau = f(P)$ , значения условного статического предела текучести  $P_{K-1}$ , условнодинамического предела текучести  $P_{K-2}$  и предела прочности  $P_m$ . Кроме того, получены кривые изменения эффективной вязкости в зависимости от изменения напряжения сдвига  $\eta = f(P)$ , определены значения вязкости близ условного предела текучести  $\eta_{P_{K-1}}$  и наименьшей вязкости нарушений структуры  $\eta_m$ . Вискозиметр позволил получить обратную ветвь реологической кривой — ветвь восстановления вязкости (структуры) по мере уменьшения действующего напряжения. На рис. 1 и 2 приведены типичные реологические кривые и кривые зависимости эффективной вязкости от действующего напряжения.

Анализ реологических кривых показал, что все изученные глины относятся к различным типам по реологическому поведению по классификации И.М. Горьковой [1]. Основными являются: структурно-вязкие, тиксотропные бингамовские, пластичные шведовские и эластично-пластично-вязкие.

Структурно-вязкий тип характерен для образцов глинистых пород с повышенным количеством дисперсных частиц, какими являются глины верхнего сармата и реже — среднего сармата. В нарушенном состоянии эти образцы обладают способностью к медленному течению типа ползучести практически

без нарушения структуры (рис. 1, обр. 248). После снятия напряжения глины остаются в разжиженном состоянии и обладают плывунными свойствами.

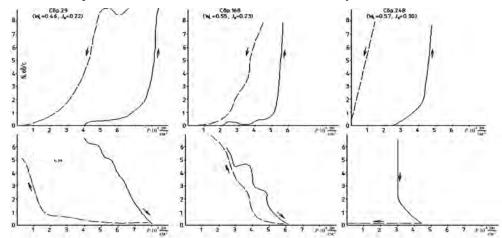


Рис. 1. Реологические кривые глинистых пород с ненарушенной структурой бингамовского и структурно-вязкого типов

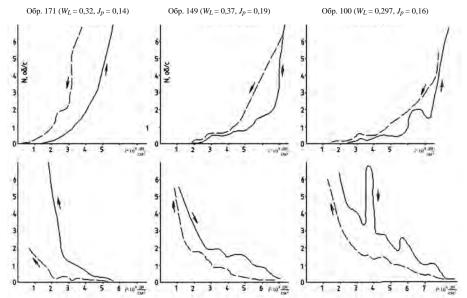


Рис. 2. Реологические кривые глинистых пород с ненарушенной структурой швеловского типа

Тиксотропный бингамовский тип наиболее распространен среди всех изученных регионально-генетических типов глинистых пород, характеризующихся влажностью предела текучести  $W_L$ , равной 0,40...0,55, и числом пластичности  $J_p = 0,22...0,28$ . Характерной особенностью этих пород является твердообразный облик реологических кривых (см. рис. 1, обр. 29, 168), обусловливающий большой гистерезис в восстановлении вязкости только при полном снятии напряжения. Средние значения условно статического предела текучести для таких пород составляют 2,5 и 2,79 кПа, условного динамического предела текучести — 5,01 и 5,06 кПа соответственно для глин с влажностью предела текучести, равной 0,4...0,5 и 0,5...0,6.

Пластичный шведовский тип наиболее характерен для образцов с пониженной пластичностью ( $W_L = 0.29...0.40$ ,  $J_p = 0.14...0.20$ ), какими являются в большей мере глины балтской свиты и среднего сармата, содержащие прослои обломочного материала. Реологические кривые этих пород характеризуются менее твердообразным обликом и меньшим гистерезисом в восстановлении вязкости (см. рис. 2, обр. 171, 149, 100). Средние значения условного статического и динамического пределов текучести составляют 0.33 и 4.99 кПа.

Переходными между двумя последними типами пород по реологическому поведению являются эластично-пластично-вязкие, встреченные среди всех изученных регионально-генетических типов глинистых пород и обладающие признаками пластичных и тиксотропных пород.

Характерной особенностью некоторых реологических кривых, изображенных на рис. 1 (обр. 168) и рис. 2 (обр. 100 и 149), являются слабо выраженные пределы текучести и прочности за счет эффекта дилатансии, проявляющегося в виде бугров и пиков на отрезках кривых, соответствующих течению со шведовской пластичной вязкостью. Это объясняется дилатантным упрочнением образца вследствие нагромождения песчаных зерен с ростом действующего напряжения. Явление дилатансии наиболее наглядно проявляется у образцов с пониженным значением числа пластичности (см. рис. 2, обр. 100) и за счет содержания в дисперсной массе пасты микроагрегатов со стабилизационными контактами (см. рис. 1, обр. 168), что приближает эти глины по реологическому поведению к суглинистым дисперсно-песчаным породам. Такие образцы распространены среди всех изученных типов глин, но наиболее широко они представлены среди балтских отложений.

В таблице приведены результаты статистической обработки реологических параметров описываемых регионально-генетических типов глинистых пород.

| Основные характеристики показателей реологических свойств |  |
|---|--|
| сарматских глин   |  |

|                                    | Регионально-генетические типы глин |                                      |                          |                               |
|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Показатель                         | Балтская свита<br><i>N</i> = 6     | Верхний сармат<br><i>N</i> = 17      | Средний сармат<br>N = 15 | Кагульская<br>свита<br>N = 13 |
| $P_{K-1}$ , кПа                    | $\frac{1,8-3,0}{2,47}$             | $\frac{1,7-3,8}{2,85}$               | $\frac{1,0-3,2}{2,42}$   | $\frac{1,9-5,1}{2,92}$        |
| $P_{K-2}$ , кПа                    | $\frac{5,0-6,8}{5,93}$             | 3,7 - 7,3<br>5,41                    | $\frac{2,8-6,6}{4,88}$   | $\frac{3,6-7,0}{5,47}$        |
| $P_m$ , к $\Pi$ а                  | $\frac{6,2-8,0}{7,30}$             | $\frac{4,6-8,7}{6,64}$               | $\frac{3,9-7,4}{5,92}$   | $\frac{4,8-8,0}{6,47}$        |
| $\eta_{P_{K-1}}$ , $\Pi a \cdot c$ | $\frac{0,64-7,71}{2,80}$           | $\frac{0,12-5,20}{1,72}$             | $\frac{0,30-12,3}{1,69}$ | $\frac{0,38-2,30}{1,51}$      |
| $\eta_m$ , $\Pi a \cdot c$         | $\frac{15,0-23,8}{19,70}$          | 9,3 – 27,7<br>19,70                  | 11,6 - 21,9<br>16,87     | $\frac{11,2-26,9}{19,83}$     |
| $\eta_{P_{K-1}}/\eta_m$            | 42,71 – 332,50<br>140,69           | <u>4,16 – 354,10</u><br><u>96,12</u> | 23,5 – 123,75<br>59,47   | 24,3 – 129,41<br>71,35        |

П р и м е ч а н и е. 1. В числителе — пределы колебания, в знаменателе — средние. 2. Другие обозначения даны в тексте.

#### Выводы

Анализ реологических параметров глинистых пород показал, что все описанные типы отложений включают образцы с различным реологическим поведением: от структурно-вязких до пластичных. Однако отмечается некоторая тенденция в изменении реологических особенностей с изменением возраста и типа отложений. Так, для более дисперсных глинистых пород верхнего сармата и кагульской свиты характерен структурно-вязкий и реже тиксотропный тип реологических кривых с высокими значениями условного динамического и условного статического пределов текучести, а у песчанистых и пылеватых глин балтской свиты наблюдается преимущественно пластичный и эластично-пластично-вязкий тип реологических кривых с низкими значениями пределов текучести.

Показателем потенциальной способности к пластическим деформациям является отношение  $\eta_{P_{k-1}}/\eta_m$ , характеризующее перепад вязкости мало и предельно нарушенного состояния грунта. Наиболее высокие значения данного показателя приурочены к глинам балтской свиты (среднее 140,69) и верхнего сармата (среднее 96,12). Для глин среднего сармата и кагульской свиты эти значения меньше в 2-3 раза и равны 59,47 и 71,35 соответственно. Следовательно, глины балтской породы и верхнего сармата обладают большой потенциальной способностью разжижаться и оплывать, образовывать оползни течения. В выветренном состоянии они будут оплывать с наименьшей влажностью и при меньших напряжениях по сравнению со среднесарматскими глинами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Горькова И.М.* Принципы комплексной оценки и инженерно-геологическая классификация глинистых и лессовых пород // Научные труды ПНИИИС. Т 4. М., 1971. С. 4—53.
- 2. Монюшко А.М., Олянский Ю.И. Инженерно-геологические особенности сарматмеотических глин Молдовы. Кишинев : Штиница, 1991. 173 с.
- 3. Быкодеров М.В., Щекочихина Е.В., Олянский Ю.И. Оценка прочности сарматских глин на оползневых склонах // Сергеевские чтения. Вып. 10. М.: Геос., 2008. С. 20—24.

© Олянский Ю.И., Щекочихина Е.В., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 УДК 624.131

#### А.П. Долганов, С.И. Махова, В.Н. Синяков

# ПЕТРОГРАФО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРУНТОВ МЕЧЕТКИНСКОЙ СВИТЫ ПАЛЕОГЕНА

Представлены петрографо-минералогические свойства пород палеогена в связи с инженерно-геологическими и геоэкологическими исследованиями в Нижнем Поволжье.

K л ю ч е в ы е с л о в а: палеогеновые породы; полускальные породы; минералогический состав пород.

Petrografical and mineralogical properties of Paleogenic grounds in connection with the engineering geological and geoecological investigation in Lower Volga region are presented.

K e y w o r d s: Paleogen rocks; semi-rock strata; mineralogical composition of rocks.

В последнее время в литературе все чаще появляются суждения о том, что при оценке инженерно-геологических свойств пород необходимо использовать геолого-петрографический метод их исследования. В самом деле, определяя прочность пород, геологи обычно учитывают всю совокупность их физических и физико-химических свойств. Эта совокупность свойств и отражается в петрографическом характере породы [1].

Особенно важно использовать петрографические характеристики при изучении инженерно-геологических свойств полускальных пород, для которых по существу еще не разработана методика изучения их физикомеханических свойств. К таким полускальным породам относятся мечеткинские породы, представляющие собой, кроме того, многослойную толщу, которую нельзя изучать по существующим методикам, разработанным применительно к однородным литологическим разностям грунтов. Геологопетрографический метод исследований, примененный на таком разрезе, может помочь наиболее правильно выбрать необходимые расчетные показатели.

Изучение под микроскопом выделенных типов пород позволило составить необходимые представления об их минералогическом составе и структурных особенностях, о пространственном размещении отдельных элементов в породах, о количественном их соотношении и т. п. Коллоидно-дисперсные минералы, составляющие тонкодисперсную часть пород, изучались рентгенографическим и термическим методом, а также при помощи органических красителей [1].

Обломочный материал пород, разделенный на фракции, изучался следующим образом: фракции крупнее 0,25 мм изучались под бинокуляром, фракции 0,25...0,01 мм делились на легкую и тяжелую части, последняя изучалась в имерсионных жидкостях. Тяжелая часть составляла обычно лишь около 1,5 % от общего количества обломков. В качестве примера в таблице приведен минералогический состав фракций 0,01...0,25 мм (легкой и тяжелой), полученных из образцов, взятых в районе Волго-Донского канала. В приведенной таблице видно, что глауконит входит в состав и легкой, и тяже-

лой фракций. Из акцессорных минералов в наибольшем количестве присутствует гранат.

| Тяжелая фракция   |   | Легкая фракция             |   |  |
|---|---|----------------------------|---|--|
| Минералогический<br>состав  | Содержание, % от общего количества обломков | Минералогический<br>состав | Содержание, % от общего количества обломков |  |
| Глауконит   | 38,08                                       | Кварц                      | 70,55                                       |  |
| Мусковит  | 15,14                                       | Глауконит                  | 25,86                                       |  |
| Гранат (альмандин)  | 5,50  | Мусковит                   | 1,34  |  |
| Турмалин  | 4,81  | Вулканическое              | 1,01  |  |
| Циркон  | 3,89  | стекло                     | 1,01  |  |
| Лимонит   | 3,44  | Плагиоклаз                 | 0,30  |  |
| Рутил   | 2,52  | Ортоклаз                   | 0,25  |  |
| Дистен  | 1,83  | Микроклин                  | 0,11  |  |
| Титанит (сфен)  | 1,83  | Минералы, остав-           |   |  |
| Хлорит  | 1,61  | шиеся неопреде-            | 0,56  |  |
| Биотит  | 1,15  | ленными                    |   |  |
| Ставролит   | 0,69  |                            |   |  |
| Роговая обманка   | 0,46  |                            |   |  |
| Эпидот  | 0,46  |                            |   |  |
| Минералы, оставшиеся неопределенными (разложенные и загрязненные) | 18,59                                       |                            |   |  |
|   | 100,0                                       |                            | 100,0                                       |  |

Минералогический состав обломочного материала. В изученных породах минералогический состав обломочного материала довольно однообразен. Основными породообразующими минералами во всех литологических разностях являются кварц и глауконит, но соотношение их непостоянно. Кроме кварца и глауконита, в песчаных и алевритовых породах присутствуют также полевые шпаты, слюды, пирит, акцессорные минералы и остатки организмов. Весь этот обломочный материал характеризуется различным размером и формой зерен, что особенно важно для основных породообразующих минералов: кварца и глауконита.

Кварц. Представлен главным образом прозрачной бесцветной разностью местами с волнистым угасанием. Окрашенные и матовые зерна единичны. Зерна кварца обычно имеют угловатоокруглую форму с серой и желтой интерференционной окраской. Некоторые зерна кварца слегка загрязнены, имеют царапины, трещины или шероховатую поверхность. Иногда на их поверхности наблюдаются следы игл микроорганизмов.

Крупные зерна кварца (0,5 мм) в большинстве случаев хорошо окатаны, средние его зерна (0,25...0,55 мм) полуокатаны или слабо окатаны, наиболее мелкие зерна обычно угловатые.

Глауконит присутствует в породе в виде светло-зеленых зерен (темные зерна единичны), они округлозернистой или пластинчатоспаянной формы с мягкими контурами. Большинство зерен рассечено многочисленными неглубокими трещинами. Зеленые зерна с желтым оттенком, подвергшиеся начальной стадии разложения, встречаются весьма редко, но если глауконит начинает разрушаться и заменяется лимонитом, это сказывается не только на его окраске — зерна становятся зеленовато-желтыми, бурыми и темными — но и на удельном весе. Последний резко увеличивается, и глауконит попадает в тяжелую фракцию.

В породах мечеткинской свиты содержание глауконита достигает довольно высоких процентов. Так, например, в образцах, взятых в районе шлюзов  $\mathbb{N}$  1—3 Волго-Донского канала, содержание глауконита в легкой фракции колеблется от 7 до 25,8 % [1]. Несмотря на то, что все пробы разделялись на тяжелую и легкую части при помощи тяжелой жидкости с удельным весом 2,9...3,0, глауконит был обнаружен и в легкой, и в тяжелой фракциях, следовательно, его удельный вес может быть и больше, и меньше 2,9. Следует лишь отметить, что в легких фракциях зерна глауконита отличаются большими размерами, кроме того, они обычно свежие, густой и сочной зеленой окраски.

Полевые шпаты представлены обычно микроклином, ортоклазом и кислыми плагиоклазами. Суммарное их содержание не превышает 1...2 %. Чаще всего зерна полевых шпатов угловатые и угловато-округленные, носят следы начальной стадии разложения.

Слюды представлены биотитом и мусковитом, имеют форму небольших пластинок, ориентированных по слоистости породы или же распределенных беспорядочно среди зерен кварца и глауконита. Наибольшее содержание слюд отмечено в песчано-алевритовых породах, но и здесь оно не превышает 2...5~%.

Окисление пирита приводит к образованию ярозита, который обычно хорошо заметен по своей яркой лимонно-желтой окраске, а также гипса. Гипс обычно развит по трещинам, покрывая их стенки мелкими кристалликами, реже он встречается внутри породы, где заполняет поры между зернами и играет роль вторичного цемента. Содержание гипса в зоне аэрации может достигать 2...3 %. В породах, залегающих на глубине и не подвергавшихся процессам выветривания, вторичные минералы отсутствуют.

#### Выводы

- 1. Главными породообразующими минералами пород мечеткинской свиты являются кварц и глауконит, в меньшем количестве присутствуют калиевые полевые шпаты и слюды.
- 2. Ассоциации акцессорных минералов более или менее постоянны, и в них входят такие минералы, как циркон, турмалин, дистен, ставролит, рутил, сфен и рудные минералы.
- 3. Содержание глауконита в большинстве пород колеблется в широких пределах от 5...10 до 25...30 %.

Минералогический состав цемента. Большое место в составе исследуемых пород занимают тонкодисперсные минералы, составляющие обычно цемент породы. Состав тонкодисперсных фракций, как и более крупных, неоднороден и выражен несколькими основными компонентами, соотношения

которых в разных слоях различны. Изучение тонкодисперсной части минералогического состава пород показало, что цементом в изучаемых породах являются глинистые частицы, опал и изредка халцедон.

В большинстве случаев наблюдаются породы со смешанным глинистоопаловым цементом. В очень редких случаях роль цемента в породах играет мелко раздробленный глауконит.

Наиболее важный минерал, составляющий цемент, — опал, он встречается в нескольких типоморфных проявлениях. Иногда в опаловом цементе наблюдается частичная раскристаллизация опала и переход его в халцедон, в этих случаях цемент становится опалово-халцедоновым.

В менее сцементированных породах наблюдается сростковосетчатый и жилковатый опал, который образуется по краям зерен кластогенного материала и в виде агрегатов заполняет наиболее узкие промежутки между зернами. Часто такие тонкие жилочки опала заполняют трещинки в глауконите и в других минералах.

Как показали исследования, степень цементации породы, а вместе с этим и ее прочность, обусловливается, во-первых, количеством опалового цемента, во-вторых, структурным характером содержащегося в них опала.

Типоморфные проявления опала в изученных разрезах Нижнего Поволжья оказались весьма разнообразными. Значительно распространена хорошо известная глобулярная форма опала, а также агрегатные сростковые формы и стекловидный тип опала.

Многочисленные микроскопические исследования палеогеновых пород показали, что наряду с неорганогенным опалом существует опал органогенный в виде отдельных частичек или тонких колониальных сростков. Остатки этих тонких организмов плохо сохраняются: на участках выходов пластов на дневную поверхность они быстро растворяются, а кремнезем переотлагается в виде глобулярных и других проявлений.

В целом опал, чрезвычайно распространенный в палеогеновых слоях и имеющий важное породообразующее значение, присутствует — и нередко в больших количествах — почти во всех слоях палеогеновой толщи в широкой полосе ее распространения в Нижнем Поволжье. Именно содержание опала в слоях является одним из важнейших признаков палеогеновой толщи в этой полосе [1].

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геология района сооружений Волго-Дона / Н.М. Покровская, Н.П. Синяков и др. М. : Госэнергоиздат, 1960. 416 с.

© Долганов А.П., Махова С.И., Синяков В.Н., 2009

Поступила в редакцию в ноябре 2008 г.

УДК 699.841(05)

#### А.В. Масляев

# ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ ЛЮДЕЙ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Обоснована необходимость учета воздействия повторных толчков и влияния объемнопланировочных и конструктивных решений зданий и сооружений на здоровье людей при землетрясении в нормах проектирования зданий и сооружений для строительства в сейсмоактивных районах.

Ключевые слова: сейсмозащита зданий; сейсмостойкость конструкций; здоровье людей, защита при землетрясениях.

The norms of designing of buildings and structures for construction in seismicactive areas are based taking into account only of one criterion – providing seismic stability of their constructions with influence only of one underground push. In addition to that there is no taking into consideration of influence three-dimensional-planning both constructive decisions of buildings and structures on health of the people while earthquake in norms.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : antiseismic protection of buildings; seismic resistance of structures; health of the people.

По статистике в последние годы на Земном шаре примерно через каждые 3 дня происходили сильные землетрясения. К счастью, очаги этих сильных землетрясений располагались в основном в пределах океанической земной коры и поэтому не приносили большого вреда человечеству. Но с непредсказуемой периодичностью очаги сильных землетрясений иногда «забегали» на территорию континентов, где их действие проявлялось в виде многочисленных разрушений зданий и сооружений, гибели многих тысяч людей. В нашей стране к последним подобным примерам можно отнести землетрясения на территории Корякского автономного округа в 2006 г., г. Невельска в 2007 г. (Сахалин), когда большая часть зданий и сооружений стала непригодной для дальнейшей эксплуатации. Отличительной чертой этих последних сильных землетрясений стало их проявление на определенной территории в виде многочисленных повторных сильных подземных толчков в течение нескольких десятков дней, от воздействия которых здания и сооружения превратились в развалины. Особенно опасными являются два первых сильных повторных толчка, которые происходят в то время, когда люди еще не успели выйти из зданий на открытое безопасное пространство. При условии примерного совпадения частот сейсмических воздействий от этих повторных сильных толчков с частотой колебания здания возникает вероятность его полного разрушения. Примерно так и произошло 12 мая 2008 г. на территории Китая. В 06 ч 28 мин по гринвичскому времени произошел первый основной подземный толчок с интенсивностью примерно 10 баллов (интенсивность по 12балльной шкале MSK-64 определялась автором по формуле H.B. Шебалина). Далее в течение примерно только одного часа произошло 6 сильных повторных толчков (время указывается между соседними толчками): первый — через 15 мин 14 с, второй — 11 мин 14 с, третий — 7 мин 17 с, четвертый — 20 мин 32 с, пятый — 8 мин 40 с, шестой — 3 мин 35 с. Или другой подобный

пример землетрясения с многочисленными повторными толчками в Японии. На границе континента и океана 7 мая 2008 г. в 16 ч 02 мин 01 с произошел первый основной толчок интенсивностью примерно 9 баллов. Далее в течение 43 мин произошло еще 4 сильных повторных толчка (время указывается между соседними толчками): первый — через 10 мин 27 с, второй — 4 мин 6 с, третий — 7 мин 37 с, четвертый — 21 мин 9 с. При вышеуказанных землетрясениях произошло еще множество других повторных сильных толчков, но они здесь специально не указаны потому, что произошли за пределами того времени, в течение которого люди в такой ситуации еще будут находиться в некоторых высоких зданиях. Вышеприведенная статистика двух сильных землетрясений позволяет сделать вывод, что общее количество повторных сильных подземных толчков (без основного) на одной территории в течение одного часа может быть равно шести и они могут следовать друг за другом примерно через каждые 10...15 мин. Так как каждый повторный сильный подземный толчок при землетрясении в железобетонных каркасных зданиях при определенных условиях (при совпадении частоты сейсмических воздействий с частотами колебаний зданий) может увеличить повреждения их конструкций примерно на одну степень, необходимо воздействия первых повторных толчков учитывать в соответствующих расчетах. Необходимость учета в расчетах зданий и сооружений воздействий первых сильных повторных подземных толчков исходит из физического смысла самого сейсмического воздействия, одной из важнейших характеристик которого является его длительность [2, 3]. Но для этого, прежде всего, необходимо определить наиболее вероятное время между первыми повторными сильными толчками. Этот вопрос стал особенно актуальным в настоящее время, когда в ряде сейсмоопасных регионов стали возводить высокие жилые здания, на эвакуацию из которых люди вынуждены тратить многие десятки минут (известно, что в таких случаях лифтом пользоваться запрещено). Если, например, в расчете примерного времени эвакуации людей из 24-этажного жилого здания на открытое безопасное пространство использовать среднюю скорость прохождения одного этажа (с учетом малоподвижной пожилой группы населения), равную 1 мин, то получим 24 мин (теоретические расчеты могут показать большее время). Но за время 24 мин (см. статистику выше) могут произойти целых два повторных сильных подземных толчка, которые в железобетонных каркасных зданиях, особенно возведенных на территории с мощным осадочным слоем грунта, как это имеет место на территории Волгограда, могут увеличить повреждения от основного толчка еще на 2 степени. Так как нормативный документ [1] допускает образование в конструкциях зданий от воздействия первого основного подземного толчка повреждений 3-й степени (по шкале MSK-64), то вышеприведенные расчеты показывают, что при условии воздействия еще двух повторных сильных толчков в здании может образоваться 5-я степень повреждения, т.е. полное обрушение. Конечно, каждое сильное землетрясение строго индивидуально. Поэтому и распределение по времени первых повторных сильных толчков у каждого землетрясения будет разное. Но по вышеприведенной статистике это различие во времени между первыми двумя повторными сильными толчками не превышает примерно 7 мин. Поэтому на сегодняшний день с некоторым увеличением усредненное время между первым и вторым повторными сильными толчками при земле-

трясении можно принять равным 15 мин. Ранее, в [4] автор на примере разрушительного воздействия первого повторного сильного толчка на многие здания на территории г. Ленинакана при спитакском (1988 г.) землетрясении предложил время более 4 мин считать усредненным расчетным временем между основным и первым сильным повторным толчком. Поэтому при времени эвакуации людей в 19 мин и более (4+15) в расчетах сейсмостойких зданий следует учитывать воздействие и второго сильного повторного толчка с ограничением образования в их конструкциях повреждений 1-й степени, а не 3-й степени, как этого сегодня требует нормативный документ [1]. Такой метод расчета зданий и сооружений в первую очередь следует применять в тех регионах, где прогнозируются очень сильные землетрясения (8 и более баллов). Однако следует помнить, что в последние годы сильные землетрясения редко проявляются в виде только одного сильного подземного толчка. При этом имеются примеры, когда первый повторный сильный подземный толчок происходит в первые минуты и по интенсивности равен основному толчку. То есть на сегодняшний день имеется статистика землетрясений с самым разнообразным набором повторных сильных толчков, воздействия которых на здания и сооружения не учитывает нормативный документ [1]. Предложенный в этой статье метод расчета зданий и сооружений с учетом времени эвакуации людей и воздействия первых двух повторных сильных толчков для значительного ограничения степеней повреждения конструкций зданий позволит компенсировать отсутствие надежной сейсмологической информации непосредственно в регионах, которую используют сегодня проектировіники.

В общей статистике землетрясений за последние годы на Земном шаре имеются и другие примеры, когда множество повторных сильных подземных толчков происходили в течение примерно одного часа. Именно поэтому основная концепция нормативного документа [1] по учету в расчетах конструкций зданий и сооружений воздействия только одного подземного толчка на сегодняшний день не отвечает более жестким условиям последних землетрясений. Недостаток этой нормативной концепции наиболее наглядно проявился еще при спитакском 9-балльном землетрясении 1988 г., когда на территории г. Ленинакана (Армения) через 4 мин 20 с произошел второй сильный подземный толчок, от воздействия которого, как считают авторы [5, 6], и разрушились многие десятки 5...9-этажных каркасно-панельных жилых домов, в которых погибли многие тысячи людей. Поэтому новая концепция нормативного документа [1] в зависимости от времени эвакуации людей на открытое безопасное пространство в расчетах конструкций зданий и сооружений должна учитывать воздействия первых двух повторных сильных подземных толчков: 1) при времени эвакуации людей более 4 и до 19 мин здание следует рассчитывать с учетом первого повторного толчка с образованием в его конструкциях повреждений до 2-й степени; 2) при времени эвакуации людей более 19 мин — с учетом воздействия второго повторного толчка с образованием в конструкциях здания повреждений до 1-й степени. Для получения соответствующей степени повреждения зданий и сооружений при землетрясении допускается в расчетах использовать соответствующие значения коэффициента К, изложенные в [7]. При этом следует помнить, что предельно допустимой степенью повреждения для всех типов сейсмостойких зданий и соору-

жений может быть только 3-я, так как следом за ней согласно положениям нормативной шкалы MSK-64 следует 4-я степень уже с обрушениями отдельных конструкций. Из вышеизложенного следует, что главным объектом сейсмозащиты в зданиях и сооружениях при воздействии землетрясения являются все же люди с их очень ранимой психикой в подобной экстремальной ситуации. Так, согласно выводам ученых-медиков, при сильных землетрясениях (б и более баллов) нормальные люди в зданиях паникуют и действуют только по одному правилу: стремятся как можно быстрее по наикратчайшим путям (даже через оконные проемы) выйти на открытое безопасное пространство. Люди действуют так потому, что хорошо знают (может быть, и на уровне подсознания), что каждое здание имеет конкретный предел прочностных возможностей с одной стороны, а, с другой стороны, согласно всем известной статистике землетрясений, существует большая вероятность повторных сильных подземных толчков, от воздействия которых их здание может разрушиться. Такие действия людей в зданиях при землетрясении следует признать разумными (медики такие действия людей признают «нормальными»), и поэтому проектировщики обязаны руководствоваться только ими при определении планировочной схемы эвакуационных путей в зданиях. В таких ситуациях людям нельзя запрещать быстро выходить из сейсмостойкого здания (в несейсмостойких зданиях другие правила), так как это может только усугубить последствия для них. Ведь люди при этом получают психическую травму (стресс), в результате которой у многих обостряются «старые» или возникают «новые» болезни. Люди при этом на длительное время теряют трудоспособность. Так, например, на сегодняшний день имеются выводы ученых-медиков о том, что в закрытых помещениях при землетрясении степень психической травмы у людей значительно увеличивается. Конечно, величину психической травмы у людей в зданиях и сооружениях предопределяет прежде всего сила (интенсивность) землетрясения. Однако, согласно исследованиям инженеров-сейсмологов и ученых-медиков, на реакцию людей при землетрясении (величину психической травмы) влияет и время их эвакуации из здания на открытое безопасное пространство. Чем протяженнее эвакуационный путь, который определяет проектировщик на стадии проектирования здания, тем больше времени необходимо людям для эвакуации на открытое безопасное пространство. Но особенно возрастает реакция людей в здании при землетрясении, когда в одном помещении находится примерно 30 и более человек. Как поясняют специалисты, при таком числе пребывания людей в одном помещении существует высокая вероятность того, что при землетрясении среди них окажется человек с неустойчивой психикой, который своим неадекватным поведением усилит паническое поведение других людей. В таких случаях, как говорят, срабатывает «эффект толпы». Так, по результатам исследования поведения людей в зрительных залах разных кинотеатров на территории Молдавской республики при 6-балльном землетрясении 1990 г. выявлено, что за время 60 с реакция людей увеличилась на одну степень, а следующее увеличение их реакции на одну степень произошло уже через следующие 30 с. Поэтому в [8] автором сделан вывод о том, что помещения с большим числом людей (зальные помещения) следует располагать только на первых этажах зданий с обеспечением эвакуации из них на открытое безопасное пространство за время не более 60 с. Такое ограничение времени эвакуации людей из зальных помещений при землетрясении позволяет не допустить увеличения их реакции еще на одну степень.

На степень реакции людей при землетрясении влияет и конструктивное решение зданий. Выполненные автором теоретические расчеты по поэтажной реакции людей в зданиях до пяти этажей с различными конструктивными решениями при интенсивности землетрясения 7... 9 баллов показали, что наименьший поэтажный рост реакции людей происходит в зданиях с периодами собственных колебаний в пределах от 0,1 до 0,2 с. Результаты теоретических расчетов были удовлетворительно подтверждены экспериментальными исследованиями автора по оценке поэтажной реакции людей в зданиях с разными конструктивными решениями при газлийском (1984 г.) и кайраккумском (1985 г.) землетрясениях. Группа специалистов при участии автора статьи опросила или проанкетировала в общей сложности около 3512 человек. В большей части объектов исследования степень реакции людей как случайная величина распределялась по нормальному закону, что говорит об удовлетворительности результатов анализа. Исследования показали, что в зданиях «жесткого типа» (панельные, кирпичные) реакция людей на первых и вторых этажах зданий была примерно одинаковая. Увеличение реакции людей на одну степень в этих типах зданий происходило только с третьего этажа. В зданиях же «гибкого типа» (каркасные) увеличение реакции людей на одну степень происходило сразу со второго этажа.

Для наглядности приведем такой пример. На территории Самаркандского военного училища стояли рядом два трехэтажных здания казармы, где проживали военные курсанты. Одно здание было каркасной конструкции, а другое из кирпича. При газлийском землетрясении 1984 г. все курсанты из каркасного здания выбежали на открытое пространство, а в кирпичном здании большая часть курсантов это сейсмическое воздействие даже не почувствовала. Конечно, на таком большом расстоянии от очага землетрясения частота сейсмического воздействия примерно совпала с частотой собственного колебания каркасного здания, и поэтому произошло усиление сейсмического эффекта в целом на это здание. Но это еще раз говорит о том, что здания «гибкого типа» в отличие от зданий «жесткого типа» очень чувствительны даже к воздействиям многих отдаленных сильных землетрясений, т.е. люди в этих типах зданий могут очень часто испытывать значительные сейсмические воздействия. К слову, к «гибкому типу» относятся все высокие (16 и более этажей) здания.

Как видим, разрабатывая объемно-планировочные и конструктивные решения зданий и сооружений с учетом изложенных в данной статье некоторых закономерностей поведения людей при землетрясении, проектировщик может снизить их ожидаемую реакцию примерно на 2 степени. Согласно заключению ученых, при землетрясении это приведет к сохранению примерно у 20...30 % населения здоровья на длительное время.

#### Выводы

- 1. В отличие от положений нормативного документа [1], главным объектом сейсмозащиты в зданиях и сооружениях при землетрясении следует считать людей.
- 2. Основными критериями сейсмозащиты зданий и сооружений с большим числом людей (100 и более человек) следует считать:

\_\_\_\_\_

сейсмостойкость конструкций зданий и сооружений с учетом воздействия и первых повторных сильных подземных толчков при землетрясении;

минимизация реакции людей при землетрясении за счет рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий.

3. Здания и сооружения с большим числом людей (100 и более человек) при времени эвакуации на открытое безопасное пространство 19 мин и более рекомендуется рассчитывать с учетом второго повторного сильного толчка с образованием в их конструкциях повреждений 1-й степени.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. СНиП ІІ-7—81\*. Строительство в сейсмических районах / Госстрой России. М. : Госстрой России, 2001.
- 2. Штейнберг В.В. Параметры колебаний грунтов при сильных землетрясениях // Детальные инженерно-сейсмологические исследования. Вопр. инж. сейсмологии: сб. науч. тр. / АН СССР. Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М., 1986. Вып. 27. С. 7—22.
- 3. Аптикаев  $\Phi$ . $\Phi$ . Точность прогноза сейсмических воздействий в задачах сейсмостойкого строительства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 1. С. 40—43.
- 4. *Масляев А.В.* Сейсмостойкость зданий с учетом повторных сильных толчков при землетрясении // Жилищное строительство. 2007. № 10. С. 20—21.
- 5. Поляков С.В. Особенности и уроки спитакского землетрясения // Жилищное строительство. 1990. № 1. С. 14—16.
- 6. Уломов В.И. Землетрясение в Армении: стихия и ответственность // Архитектура и строительство Узбекистана. 1989. № 12. С. 1—4.
- 7. *Масляев В.Н.* Допустимые повреждения в зданиях и сооружениях с различной ответственностью при землетрясении // Жилищное строительство. 2008. № 11. С. 21—24.
- 8. *Масляев А.В.* Сейсмостойкость зданий и здоровье людей // Жилищное строительство. 2007. № 5. С. 23—24.

© Масляев А.В., 2009

Поступила в редакцию 04.05.09

УДК 624.074

#### В.П. Матвеенко, Е.П. Клигман

# АНАЛИЗ И РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УЗЛА ПЛИТА — КОЛОННА В МОНОЛИТНЫХ И СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ $^{\square}$

Анализ расчетных схем и численные эксперименты показали, что традиционные методы расчета не способны адекватно установить напряженное состояние узла плита — колонна в монолитных и сборно-монолитных конструкциях. Завышенные значения расчетных изгибающих моментов обусловлены математической моделью системы. Для оценки реальной картины напряженно-деформированного состояние узла предлагается конкретная расчетная схема объекта.

К л ю ч е в ы е с л о в а: монолитные конструкции; сборно-монолитные конструкции; математическое моделирование напряженно-деформированного состояния; компьютерные методы расчета строительных конструкций.

The analysis of design model and numerical experiments have shown, that traditional methods of calculation are not capable to establish adequately a stress condition of knot a plate - a column in monolithic and modular monolithic structures. The overestimated values of the calculated bending moments are caused by mathematical model of system. The concrete computing model of object is developed for obtain of the true stress-strained condition of knot.

K e y w o r d s: cast-in-place structure; composite structures; mathematical modeling of stress-strain state; computer methods for engineering structures analysis.

Расчет строительных конструкций из железобетона до недавнего времени основывался на моделировании конструкций пространственными статически определимыми системами в рамках теории стержней, пластин и оболочек. Это позволяло рассчитывать напряженно-деформированное состояние (НДС) систем без учета реальных свойств материала и его армирования. Такой подход применим при расчете так называемых балочно-ригельных конструкций. Новые технологии монолитных и сборно-монолитных каркасов позволяют создавать конструкции, представляющие собой пространственные системы нерегулярной структуры с высокой степенью статической неопределимости, которые чрезвычайно сложно рассчитывать традиционными методами. Поэтому в настоящее время широкое распространение получило использование конечно-элементных программных комплексов ЛИРА, SCAD, MicroFE, ANSYS-CivilFEM и др. Точность полученных результатов при использовании программных комплексов существенным образом зависит как от выбранной расчетной схемы, так и от размеров и формы применяемых конечных элементов. Опыт показывает, что применяемые расчетные схемы для проектирования строительных конструкций не в состоянии адекватно описать напряженно-деформированное состояние в зонах концентрации напряжений. Как правило, расчетные значения изгибающих моментов в этих зонах получаются сильно завышенными, что приводит к значительному перерасходу арматуры (в отдельных случаях до двух и более раз). Попытки скорректировать определяемые значения изгибающих моментов путем необоснованно-

\_

<sup>&</sup>lt;sup> $\square$ </sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 07-01-97621)

го выбора размеров конечных элементов, что часто применяется на практике, и изменением расчетных схем без научного анализа последних не обеспечивают получения достоверных результатов.

В настоящей работе проводится анализ распространенных методов расчета строительных конструкций, основанных на линейных теориях, с использованием различных программных комплексов с целью создания адекватных моделей некоторых наиболее ответственных напряженных узлов.

Особенности конструкции узла надколонная плита — колонна



Рис. 1. Узел плита — колонна в сборе

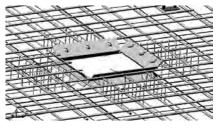


Рис. 2. Арматура плиты

Рассмотрим расчеты наиболее напряженного и ответственного элемента сборномонолитных систем — узла соединения плиты перекрытия с колонной (рис. 1).

Надколонная плита имеет размеры 3×3×0,16 м, квадратное отверстие в центре  $0,42 \times 0,42$  м и крепится непосредственно к колонне, образуя так называемый «гриб». Надколонная плита является наиболее нагруженным элементом конструкции, так как на нее передается нагрузка с площади  $6 \times 6 \text{ м}^2$ . При этом плита испытывает действие отрицательных изгибающих моментов в двух плоскостях, что требует закладки верхней рабочей арматуры. Силовой контакт плиты с колонной осуществляется через шпонку и закладной элемент, представляющий собой окаймляющее отверстие ребро из стального уголка 100×63×6, к которому привариваются арматурные выпуски колонны (рис. 2).

Анализ расчетных схем узла в программе SCAD

Метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программной среде SCAD, позволяет в рамках теории стержней, пластин и оболочек использовать несколько расчетных схем. Наиболее часто используются следующие схемы.

Контакт колонны и плиты в точке. Расчетная схема узла представляет собой пластинку и стержень, жестко связанные в одной точке (рис. 3). Это эквивалентно приложению в точке плиты силы реакции. На примере круглой пластины в [1] показано, что такая точка является особой, в которой изгибающие моменты будут иметь бесконечные значения.

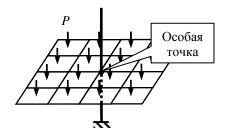


Рис. 3. Расчетная схема 1

Жесткое соединение колонны с плитой. Расчетная схема, изображенная на рис. 4, a, в геометрическом смысле наиболее близка к реальному объекту. Здесь плита рассматривается в рамках теории пластинок, а колонна — теории балок, основанной на гипотезе недеформируемых сечений (гипотеза Бернулли). Это эквивалентно заделке плиты по контуру отверстия. В классическом труде [2] показано, что в данном случае угловая точка внутреннего контура плиты (рис. 4,  $\delta$ ) будет особой.

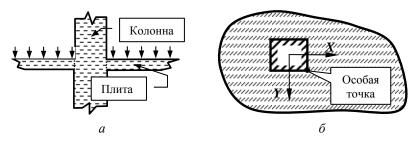


Рис. 4. Расчетная схема 2

При конечноэлементной реализации данных моделей неизбежно возникнут следующие проблемы. Сходимость МКЭ обычно контролируется путем сравнения результатов расчета на сетках различного размера. При постановке задачи в перемещениях, которая реализована почти во всех прикладных конечноэлементных программах, сходимость чаще всего контролируется по прогибам в определенных точках. Применение данного критерия к рассмотренной задаче может ошибочно показать, что необходимая точность может быть достигнута на грубой сетке (оценка сходимости по энергии приводит к аналогичному результату). Искомым результатом решения данной задачи являются изгибающие моменты, а, как известно, сходимость процедуры МКЭ, реализующей принцип возможных перемещений, по силовым факторам существенно хуже. С уменьшением размера элемента в окрестности особых точек указанного типа будет наблюдаться неограниченный рост изгибающих моментов. Сходимости по изгибающим моментам задача в данной постановке не имеет в принципе. Часто на практике проблема сходимости решения не рассматривается, а размеры конечных элементов выбирают исходя из рекомендаций разработчиков программных комплексов, которые носят общий характер и не учитывают особенности конкретных каркасов.

Численный эксперимент по расчету узла в программной среде SCAD. С помощью лицензионной программы SCAD был выполнен численный эксперимент по исследованию сходимости решения при определении НДС узла плита — колонна по расчетным схемам: контакт колонны и плиты в одной точке (схема 1) и жесткое соединение колонны с плитой (схема 2). Плита нагружалась распределенной нагрузкой интенсивностью  $14,4\,$  кН/м². Для этих схем на рис. 5 сплошной и штриховой линиями показаны графики зависимости максимальных по модулю изгибающих моментов  $M_x$  в окрестности особых точек от числа элементов на стороне плиты N.

Как видно из графиков, с увеличением числа элементов наблюдается неограниченный рост изгибающих моментов. Таким образом, результаты численного эксперимента отражают известные аналитические решения.

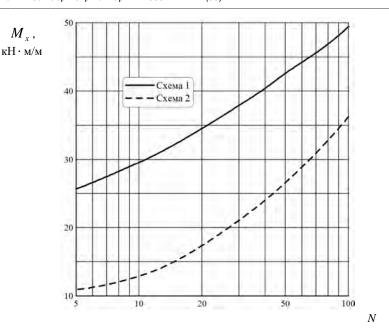


Рис. 5. Зависимость изгибающих моментов от числа элементов, рассчитанных в программе SCAD

## Расчет с помощью пакета ANSYS-CivilFEM

Для обеспечения сходимости решения и получения приемлемого результата был выполнен расчет плиты с использованием лицензионного программного комплекса ANSYS-CivilFEM. При этом осуществлялось достаточно подробное моделирование исследуемого объекта (рис. 6), основной арматуры и закладных элементов, схема которых приведена на рис. 2.

Тело плиты моделировалось квадратичными оболочечными элементами SHELL-93 (позиция 1 на рис. 7). По контуру отверстия эти элементы скреплялись с окаймляющим уголком. Колонна и окаймляющий уголок (поз. 2) моделировались балочными элементами BEAM-189 соответствующего сечения. Взаимодействие конечных элементов колонны и окаймляющего уголка осуществлялось через вспомогательные оболочечные элементы, моделирующие шпонку, с помощью которых было «заполнено» пространство отверстия плиты (поз. 3). Условия нагружения плиты соответствовали рассмотренному выше численному примеру в программе SCAD.

Расчет проводился на различных конечноэлементных сетках со сгущением к центру плиты. Число элементов по стороне плиты N варьировалось от 5 до 100. Наибольший изгибающий момент  $M_x$  возникает в точке A (рис. 6). На рис. 8 сплошной линией показан график зависимости модуля наибольшего изгибающего момента  $M_x$  от числа конечных элементов на стороне плиты N. Из этого графика видно, что с увеличением N от 20 до 100 элементов по стороне плиты уточнение величины максимального изгибающего момента не превышает одного процента. Это свидетельствует о том, что численная процедура по изгибающим моментам сходится, и инженерная точность решения достигается уже при 20 элементах на стороне.

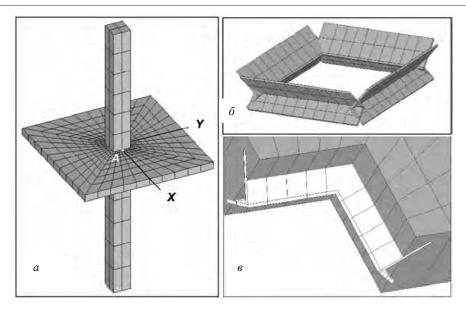


Рис. 6. Конечноэлементные модели плиты и колонны: a — общий вид;  $\delta$  — окаймляющий уголок;  $\epsilon$  — уголок в составе плиты (¼ общего вида)

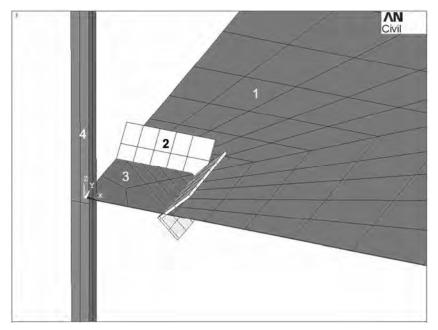


Рис. 7. Схема  $\frac{1}{4}$  конечноэлементной модели системы (толщина плиты и сечение колонны показаны в уменьшенном виде)

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что предложенная расчетная схема обеспечила равномерную сходимость значений изгибающих моментов в зоне концентрации напряжений надколонной плиты (узел соединения колонны и плиты) и позволяет оценить реальную картину напряженно-деформированного состояния узла, оставаясь в рамках моделей строительной механики.

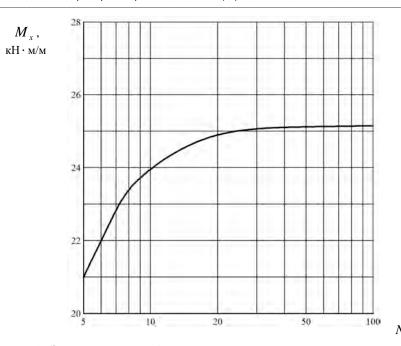


Рис. 8. Зависимость изгибающего момента от числа элементов, полученного в программе ANSYS

Bыводы. Как показали результаты анализа и численные эксперименты, традиционные расчетные схемы не способны адекватно описать напряженно-деформированное состояние узла плита — колонна. Расчетные значения изгибающих моментов получатся сильно завышенными. Это обстоятельство обусловлено математической моделью конструкции, а не численным методом.

Для получения реальной картины напряженно-деформированного состояния узла необходимо в математической модели учесть следующие факторы:

- 1) взаимодействие колонны с плитой осуществляется не непосредственно, а через закладной элемент и шпонку;
- 2) контакт колонны с закладным элементом осуществляется через арматурные выпуски колонны;
- 3) существенное влияние на напряженно-деформированное состояние узла оказывает деформируемость сечения колонны (в балочных моделях сечение считается абсолютно жестким).

В надколонной плите, в отличие от ригельных конструкций, поле изгибающих моментов существенно неоднородно и характеризуется большими градиентами. Это требует внесения дополнений в стандартную методику расчета армирования плиты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
- 2. *Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки : пер. с англ. / под ред. Г.С. Шапиро. М. : Наука, 1966. 636 с.

© Матвеенко В.П., Клигман Е.П., 2009

Поступила в редакцию 07.05.09

УДК 624.131.2:628.544

#### В.Г. Офрихтер

# ОСОБЕННОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

Освещены вопросы всестороннего исследования свойств ТБО с целью использования площадок отработанных полигонов для строительства зданий и сооружений.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы; основания зданий и сооружений; полигоны ТБО; геотехническая классификация отходов.

The paper covers the issues of thorough investigation of solid domestic waste properties in order to use the grounds of exhausted landfills for the erection of buildings and constructions.

K e y w o r d s: solid domestic waste; foundation beds of buildings and constructions; solid domestic waste landfills; geotechnical classification of wastes.

В настоящее время в связи с развитием разнообразных инвестиционных проектов постоянно растет спрос на земельные участки в городской черте. В то же время в каждом населенном пункте обязательно имеется полигон депонирования твердых бытовых отходов (далее ТБО), функционирование которого связано как с постоянным использованием дорогостоящих земельных участков в городской черте, так и с постоянной потребностью в новых площадках. Территории, занятые уже отработанными полигонами ТБО, практически не используются, поскольку отходы представляют собой специфическое основание для зданий и сооружений.

В последнее время, в связи с дефицитом и дороговизной земельных участков в городской черте, все чаще и чаще обосновывается использование площадок отработанных полигонов ТБО для строительства зданий и сооружений [1].

Для формирования задания на проектирование как для эксплуатируемых, так и для законченных эксплуатацией полигонов ТБО необходимы данные о составе, геометрии и свойствах отходов, которые можно получить по результатам инженерных изысканий, выполняемых с учетом специальных требований по определению физико-механических характеристик отходов. Для всестороннего изучения свойств ТБО может потребоваться выполнение различных процедур в полевых условиях (бурение, отбор проб, зондирование, штамповые испытания, устройство шурфов и приямков).

Для определения геотехнических свойств отходов необходимо отобрать пробы, чтобы геотехнически классифицировать отходы и получить данные для геотехнических расчетов — по результатам полевых исследований и лабораторных опытов.

Отобранные образцы должны характеризовать:

тип и возраст отходов;

технологию укладки;

кислотную фазу/стабильную метановую фазу (в случае полигонов депонирования ТБО).

Исследования должны проводиться в различных точках, разбросанных по всему полигону. Структура тела отходов должна идентифицироваться с

помощью комбинации различных методов (шурфование, бурение, зондирование), при этом необходимо отбирать характерные образцы.

Программу оценки площадки рекомендуется разрабатывать с учетом истории закладки отходов, изучения архивных документов, а также спутниковых и аэрофотоснимков.

При работе на полигонах и с образцами отходов персонал обязан выполнять требования стандартов безопасности.

Шурфы могут выполняться как с креплением, так и без него в зависимости от глубины и типа отходов.

Бурение позволяет исследовать более глубокие части полигона. В зависимости от типа отходов бурение может производиться без обсадки и с обсадкой. Применение обсадных труб позволяет определить удельный вес отходов. С помощью стандартных буровых систем на полигонах ТБО можно достичь глубины 50 и более метров при скважине диаметром от 600 до 900 мм [2].

Статическое зондирование применяется при исследовании полигонов ТБО для получения информации о структуре столба отходов и нижележащего грунта (толщина слоев), типе отходов и физико-механических характеристик отходов [2—6]. В некоторых случаях установки статического зондирования позволяют замерять не только сопротивление по острию и боковой поверхности, но также и поровое давление, температуру и электрическое сопротивление [7, 8].

Использование статического зондирования в комплексе полевых исследований требует опыта и внимательного изучения результатов. Результаты СРТ-тестов, полученные на различных полигонах ТБО, соответствуют типичным значениям для илистых глин, илов и супесей, а иногда и для песков с включениями глин или ила [9].

Образцы мусора можно отбирать из шурфов или скважин. Для классификации мусора, определения сдвиговых параметров, компрессионной зависимости в крупномасштабных лабораторных опытах необходимо израсходовать не менее  $1.5~{\rm m}^3$  отходов.

После отбора проб и гомогенизации отходы необходимо поместить в воздухо- и водонепроницаемые контейнеры. Все контейнеры должны быть промаркированы и немедленно направлены в лабораторию. В основном, чтобы избежать процесса разложения отходов, требуются превентивные мероприятия в зависимости от климатических условий. После окончания испытаний образцы отходов необходимо надлежащим образом утилизировать.

Классификация отмодов. В зависимости от состава отходов их механические характеристики отличаются от типичных грунтовых и требуют геотехнического осмысления. При определении механических свойств решающими могут быть как свойства отдельных компонентов отходов, так и свойства композитного материала. Отходы могут быть отнесены к одной из двух основных групп [10]:

грунтоподобные отходы, определяемые как материалы, состоящие из микрочастиц, для которых применимы принципы механики грунтов;

негрунтоподобные отходы, определяемые как материалы, для которых принципы механики грунтов неприменимы или имеют ограниченное применение.

Предложения по геотехнической классификации различных типов отходов приведены в таблице.

| 7  | 7                          | 1             |          | ``      | F 10 | 7 |
|----|----------------------------|---------------|----------|---------|------|---|
| -/ | <sup>¬</sup> еотехническая | классификация | เ ทามทดผ | omxodos | 1101 | / |
|    |                            |               |          |         |      |   |

| Грунтоподобный мусор                 | Негрунтоподобный мусор                      |
|--------------------------------------|---|
| Грунт выемки                         | Твердые бытовые отходы                      |
| Промышленный шлам                    | Объемные отходы                             |
| Отходы дорожного строительства       | «Зеленые» отходы                            |
| Продукты сгорания (шлак, зола, пыль) | ТБО-подобные промышленные отходы            |
| Строительные обломки                 | Отходы со строительных площадок             |
| Канализационный ил                   | Монолиты                                    |
|                                      | Отходы механобиологической обработки мусора |

В случае грунтоподобных отходов классификация и определение свойств должны осуществляться в соответствии с традиционными подходами механики грунтов. Отдельным грунтоподобным отходам могут быть присущи геотехнические свойства, которые не могут быть полностью объяснены законами механики грунтов. Тогда становится необходимой тщательная оценка влияния этих свойств на устойчивость полигона. Могут потребоваться дополнительные полевые или лабораторные исследования.

Для характеристики негрунтоподобных отходов на основе исследований образцов мусора, отобранных как из шурфов и скважин, так и из партий, непосредственно доставленных на полигон, необходимо выполнить [11]:

визуальную оценку, описание общего состояния образцов;

определение влажности и органической составляющей;

трехступенчатый классификационный анализ материала:

- 1 ступень рассортировка материала из образца по классам;
- 2 ступень определение грансостава для остатков размером до 120 мм из рассортированных материалов;
- *3 ступень* идентификация и описание каждого класса материалов (включая три фракции рассортированных остатков размером до 120 мм).

Для классификационного анализа материала отходов может быть предложена трехэтапная классификация.

- 1. Сортировка по классам материалов:
- 1.1. Объемные компоненты, бумага, картон.
- 1.2. Мягкие синтетические компоненты.
- 1.3. Твердые синтетические компоненты.
- 1.4. Металлические компоненты.
- 1.5. Минеральные компоненты.
- 1.6. Древесина.
- 1.7. Органические компоненты.
- 1.8. Шламы.
- 1.9. Рассортированные остатки размером < 120 мм.

- 2. Гранулометрический анализ рассортированных остатков < 120 мм требуется рассортировать по меньшей мере следующие фракции:
  - 2.1. < 8 MM.
  - 2.2. 8...40 мм.
  - 2.3. 40...120 мм.
  - 3. Идентификация и описание каждого класса материалов:
  - 3.1. Геометрия компонентов отходов:
  - 3.1.1. Типоразмер 1 (зерна).
  - 3.1.2. Типоразмер 2 (палки, фибры).
  - 3.1.3. Типоразмер 3 (фольгоподобные компоненты).
  - 3.1.4. Типоразмер 4 (коробки).
  - 3.2. Влажность при двухступенчатом анализе:
  - 3.2.1. При 70 °С;
  - 3.2.2. При 105 °C.
- 3.3. Содержание органического вещества (например, биохимическая устойчивость).

Рекомендуется определять влажность w образца отходов для двух ступеней (70 и 105 °C). Влажность определяется по аналогии с механикой грунтов.

Размеры образца ТБО должны назначаться в зависимости от гетерогенности и размера частиц материала отходов.

Характеристика негрунтоподобных отходов позволяет провести подробный анализ состава и состояния материала отходов и его различных компонентов. Взаимоотношение между характеристикой и геотехническими параметрами не может быть полностью описано до настоящего времени, за исключением некоторых общих закономерностей. В результате необходимы специальные исследования, например лабораторные опыты для определения геотехнических параметров различных отходов с механической точки зрения. Классификация промышленных отходов осуществляется с учетом их механических и гидравлических свойств, включая химическую совместимость с ограничивающим минеральным барьером [12]. Делается упор на следующие основные аспекты, характеризующие механическое поведение отходов.

- 1. Компоненты сопротивления сдвигу:
- 1) поровое трение;
- 2) дилатансия (свойство расширяться) или механизм сцепления;
- 3) осмотическое или кристаллическое всасывание;
- 4) цементация:
- 5) армирование фибрами или жесткими включениями.
- 2. Компоненты деформативности от изменения внешних усилий:
- 1) внутренняя деформативность и/или внутренние разрушения твердых частиц и жестких тел;
  - 2) деформативность твердого скелета.
  - 3. Компоненты напряжений:
  - 1) разрушающийся жесткий скелет;
  - 2) положительное или отрицательное давления;
  - 3) изменение содержания порового водонасыщения;
  - 4) изменение химического состава (осмотическое всасывание);
  - 5) биологическая и физико-химическая деградация;

- 6) «перепутывание» (перемещение частиц в большие пустоты);
- 7) вязкость твердого скелета или отдельных твердых частиц или включений. Процедуры испытаний. Процедуры испытаний для определения геотехнических параметров отходов должны назначаться с учетом их состава и свойств. В зависимости от типа отходов может быть недостаточным простое применение стандартных геотехнических процедур. Необходимо принимать в расчет следующие аспекты [4]:

геометрические размеры устройства для тестирования должны быть в 5...10 раз больше, чем максимальный размер частиц испытываемого материала;

испытательное оборудование должно быть коррозионностойким;

оборудование для испытаний ТБО должно воспринимать большие деформации, так как напряженно-деформированное состояние отходов может сильно отличаться от напряженно-деформированного состояния грунта;

в случае испытаний загрязненных материалов персонал должен быть гарантированно защищен.

Документация по испытаниям напряженно-деформированного состояния должна содержать следующую информацию:

описание и классификацию отходов в первоначальном состоянии (см. раздел «Классификация отходов»);

подготовку материала отходов;

начальные свойства образца отходов (влажность, плотность, напряженное состояние);

зависимость напряжения — деформации;

изменение объема в течение опыта.

Часто бывает необходимо и возможно приготовить испытываемый образец путем отсортировки больших компонентов либо разрушения материала. В этом случае необходимо проверить, как сильно подготовка образца влияет на результаты опытов и геотехнические параметры, полученные из этих результатов.

Выводы

Возрастающая стоимость земельных участков в городской черте стимулирует повторное использование рекультивированных площадок старых полигонов ТБО. Твердые бытовые отходы могут служить основанием зданий и сооружений. Геотехническая классификация ТБО позволяет применить к отходам принципы механики грунтов. Для использования массива ТБО в качестве основания требуется выполнение комплекса инженерных мероприятий по сохранению изолирующих и отводящих систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Savoikar R.D., Choudhury D. Post closure performance of MSW landfills under static and seismic conditions: An overview // Proceedings International Conference: Development of urban areas and geotechnical engineering / Ulitsky, V.M. (ed). Saint Petersburg, 2008. Vol. 1. P. 319—324.
- 2. Baerman A., Neumann-Peters W. Development of a Drilling and Sampling Method for Contaminated Sites // Proceedings "Sardinia'93", 4th International Landfill Simposium / Christensen H.L., Cossu R., Stegmann R. (eds). Cagliari, Italy, 1993. Vol. 2.
- 3. Bratton W.L., Bratton J.L., Shinn J.D. Direct Penetration Technology for Geotechnical and Environmental Site Characterization // Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics / Acar Y., Daniel D. (eds.). New York: ASCE, GSP46, 1995. P. 105—122.

4. *Jessberger H.L., Kockel R.* Mechanical properties of waste materials // Proceedings of the XV CGT Ciclo di conferenze di Geotechnoca di Torino, 19—22.11.1991. Torino, Italy, 1991.

- 5. *Klopp R.A.*, *Walter J.M.* The use of cone penetration testing for evaluation of waste disposal alternatives // Geotechnical practice for waste disposal'87 / Woods R.D. (ed). // Geotechnical special publication. № 13. 1987. P. 596—610.
- 6. *Van Impe W.F.*, *Haegeman W.* Quality Control of Dynamic Compaction in Waste Fills // Proceedings 2nd International Congress on Environmental Geotechnics / Kamon M. (ed). Rotterdam: A.A. Balkema, 1996. Vol. 2. P. 635—640.
- 7. Jessberger H.L. Influence of waste properties on the stability of landfills // Proceedings of the II Bochum Disposal Seminar on New Disposal Techniques. Bochum, Germany, 1990. P. 93—98.
- 8. Cone Penetrometer Surveys of Soil Contamination / P. Malone, G.D. Comes, A.M. Chrestman, A.G. Franklin // Environmental Geotechnology / Usmen & Acar (eds.). Rotterdam: A.A. Balkema, 1992. P. 251—257.
- 9. Electronic penetration testing // FUGRO Information Bulletin. FUGRO Geotechnik, GmbH, Germany, 1993.
- 10. Geotechnics of landfill design and remedial Works, Technical Recommendations // German Geotechnical Society (ed): GLR-Recommendations for the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Berlin: Ernst & Sohn, 1993.
- 11. Kockel R., Konig D., Syllwasschy O. Three basic topics on waste mechanics // Proceedings of the XTV International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. Vol. 3. P. 1831—1837.
- 12. Manassero M., Shackelford C.D. Classification of Industrial Wastes for Re-use and Landfilling // Proceedings 1st International Congress on Environmental Geotechnics. Edmonton, Alberta, Canada, 1994. P. 103—114.

© Офрихтер В.Г., 2009

Поступила в редакцию 07.05.09

#### СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 624.04:514

#### В.В. Галишникова

# ВЫВОД РАЗРЕШАЮЩИХ УРАВНЕНИЙ ЗАДАЧИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФЕРМ НА ОСНОВЕ УНИФИЦИРОВАННОГО ПОДХОДА

Содержится дальнейшее развитие унифицированного подхода к геометрически нелинейному расчету конструкций при произвольно больших перемещениях и углах поворота, разрабатываемого автором. Нелинейная теория расчета ферм выводится как частный случай трехмерной геометрически нелинейной теории упругости путем использования соответствующих гипотез поведения и выполнения полуаналитического интегрирования разрешающих уравнений.

K л ю ч е в ы е с л о в а: пространственные фермы; геометрически нелинейное деформирование.

A unified and general concept for the geometrically nonlinear analysis of structures with large displacements and rotations is further developed in this article. The governing equations for the determination of the displacements and the reactions at the nodes of the truss as well as the load factor for the load pattern are derived. Truss hypotheses and semi-analytical integration are used to reduce the three-dimensional nonlinear theory of elasticity to a space truss theory.

K e y w o r d s: space trusses; geometrically non-linear deformation.

Пространственные шарнирно-стержневые системы, или пространственные фермы, получают все более широкое распространение в строительной практике. Их популярность обусловливается следующими техническими, экономическими и эстетическими факторами:

легкостью и жесткостью конструкции при больших перекрываемых пролетах:

возможностью использования законов геометрии и кристаллографии, а также свойств регулярности;

высокой унификацией элементов и узлов, возможностью заводского поточного изготовления элементов;

высокой скоростью возведения;

неограниченными возможностями формообразования покрытий или иных сооружений.

Однако пространственные фермы представляют собой облегченные конструкции, деформации и устойчивость которых могут быть надежно предсказаны лишь с использованием геометрически нелинейного анализа. Унифицированный подход, развиваемый в данной работе, обеспечивает надежную основу для выявления геометрически нелинейного поведения, угрожающего

появлением чрезмерных деформаций или потерей устойчивости пространственной фермы.

Исследования, выполненные в рамках данной работы, представляют собой часть более широкой концепции, направленной на развитие унифицированного набора теорий для нескольких типов конструктивных элементов. Эти теории выводятся из общей геометрически нелинейной теории упругих тел, формулировка которой выполнена автором в [1].

При построении теории приняты следующие допущения. Полагается, что пространственная ферма состоит из стержней с прямолинейными осями, шарнирно связанных между собой по концам и образующих геометрически неизменяемую решетку. Концевые точки оси стержня называются узлами. В одном узле могут соединяться несколько стержней. Полагается, что стержень не может иметь внутренних узлов. Узловые шарниры считаются идеально гладкими, лишенными трения. Поперечное сечение стержня постоянно по длине, его размеры существенно меньше длины оси, а центр тяжести сечения лежит на оси стержня. Оси всех стержней проходят через геометрические центры шарниров. Внешние воздействия на ферму сводятся к заданным перемещениям и силам, которые прикладываются исключительно в узлах. Внешние связи (опоры) также накладываются в узлах системы. В стержнях пространственной фермы возникают только осевые внутренние усилия.

# 1. Деформации пространственных ферм

Системы координат. Нелинейное поведение пространственных ферм описывается при помощи четырех декартовых систем координат, показанных на рис. 1.1, и одной нормализованной системы координат.

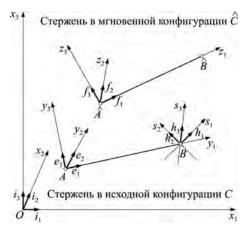


Рис. 1.1. Координатные системы для нелинейного расчета ферм:  $x_1, x_2, x_3$  — глобальные координаты с базой  $i_1, i_2, i_3; y_1, y_2, y_3$  — исходные координаты с базой  $e_1, e_2, e_3; z_1, z_2, z_3$  — мгновенные координаты с базой  $f_1, f_2, f_3; s_1, s_2, s_3$  — узловые координаты с базой  $h_1, h_2, h_3$ 

Глобальная система координат используется для описания геометрии фермы и для задания положения начала координат и координат базовых векторов прочих координатных систем. Некоторые нагрузки задаются в глобальной координатной системе. Глобальные координаты положения точки P в пространстве обозначаются как  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ :

$$x = x_1 i_1 + x_2 i_2 + x_3 i_3$$
.

Исходная система координат. Каждый стержень фермы имеет свою исходную локальную систему координат. Исходная система координат используется для интерполяции перемещений между узлами стержня. Координаты матрицы жесткости элемента определяются в исходном пространстве.

Рассмотрим стержень AB в исходной конфигурации фермы, как показано на рис. 1.1. Пусть заданы глобальные координаты точек A и B:

$$\boldsymbol{x}_{A} = \begin{bmatrix} x_{1A} \\ x_{2A} \\ x_{3A} \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{x}_{B} = \begin{bmatrix} x_{1B} \\ x_{2B} \\ x_{3B} \end{bmatrix}, \tag{1.2}$$

где  $\boldsymbol{x}_A$  и  $\boldsymbol{x}_B$  — исходные радиус-векторы узлов A и B соответственно.

Примем узел A за начало исходной системы координат стержня. Единичный базовый вектор  $e_1$  для оси  $y_1$  направлен от начального узла A к конечному узлу B стержня. Глобальные координаты вектора  $e_1$  вычисляются следующим образом:

$$e_{1} := \begin{array}{|c|c|} \hline e_{11} \\ \hline e_{21} \\ \hline e_{31} \\ \hline \end{array} = \frac{1}{L} \begin{array}{|c|c|} \hline (x_{1B} - x_{1A}) \\ \hline (x_{2B} - x_{2A}) \\ \hline (x_{3B} - x_{3A}) \\ \hline \end{array}, \tag{1.3}$$

где 
$$L = \sqrt{\left(x_{1B} - x_{1A}\right)^2 + \left(x_{2B} - x_{2A}\right)^2 + \left(x_{3B} - x_{3A}\right)^2}$$
.

Единичный базовый вектор  $e_2$  выбирается таким образом, чтобы он был параллелен глобальной координатной плоскости, заданной базовыми векторами  $i_1$  и  $i_2$ , и ортогонален вектору  $e_1$ , а единичный базовый вектор  $e_3$  вычисляется как векторное произведение  $e_1 \times e_2$ :

$$e_{2} = c_{1}i_{1} + c_{2}i_{2}$$
, где
 $e_{2}^{T}e_{2} = 1 \quad \land \quad e_{1}^{T}e_{2} = 0$ 
 $e_{2} := \begin{bmatrix} e_{12} \\ e_{22} \\ e_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1} \\ c_{2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad e_{3} := \begin{bmatrix} e_{13} \\ e_{23} \\ e_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_{2}e_{31} \\ c_{1}e_{31} \\ c_{2}e_{11} - c_{1}e_{21} \end{bmatrix}.$ 
(1.4)

Значения коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$  определяются через значения координат  $e_{11}$  и  $e_{21}$  следующим образом:

случай 
$$(a)$$
:  $t=\sqrt{e_{11}^2+e_{21}^2}\neq 0$ :  $c_1=\frac{e_{21}}{t}$ ,  $c_2=-\frac{e_{11}}{t}$ , случай  $(\delta)$ :  $e_{11}=e_{21}=0$ :  $c_1=0$ ,  $c_2=1,0$ .

Столбцы матрицы поворота  $\mathbf{R}_{xy}$  для преобразования координат точки между глобальным и исходным пространствами содержат базовые векторы:

$$x = x_A + R_{xy}y, (1.5)$$

или в развернутом виде

$$\begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_{1A} \\ x_{2A} \\ x_{3A} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{vmatrix} .$$

*Мгновенная система координат*. Каждый стержень фермы имеет свою мгновенную систему координат для каждой мгновенной конфигурации фер-

мы. Мгновенная система координат используется для интерполирования перемещений между узлами фермы. Осевое усилие в стержне определяется в мгновенной системе координат.

Единичные базовые векторы и матрица поворота для мгновенной системы координат вычисляются по правилам, изложенным для исходной координатной системы. Преобразование координат точки из мгновенного в глобальное пространство производится по следующему правилу:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_A + \mathbf{R}_{xz} \mathbf{z} \,. \tag{1.6}$$

Формула преобразования между исходным и мгновенным пространствами получается подстановкой значения x из выражения (1.5) в выражение (1.6):

$$\mathbf{x}_A + \mathbf{R}_{xy} \mathbf{y} = \hat{\mathbf{x}}_A + \mathbf{R}_{xz} \mathbf{z} ,$$
  
$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_A + \mathbf{R}_{yz} \mathbf{z} ,$$
 (1.7)

где

$$\mathbf{y}_A = \mathbf{R}_{xy}^T (\hat{\mathbf{x}}_A - \mathbf{x}_A), \ \mathbf{R}_{yz} = \mathbf{R}_{xy}^T \mathbf{R}_{xz}.$$

Узловая система координати. В общем случае координаты перемещений и сил в узлах фермы записываются в глобальном пространстве. Если в некотором узле заданы условия закрепления (связи) по направлениям, не совпадающим с направлениями глобальных осей, то в этом узле вводится декартово координатное пространство, направление осей  $s_1,\ s_2,\ s_3$  которого совпадает с направлениями связей. При этом преобразование координат точки между глобальным пространством и пространством, связанным с опорой, выполняется следующим образом:

$$x = x_s + R_{xs} s , \qquad (1.8)$$

где  ${\it R}_{xs}$  — матрица поворота из узлового в глобальное пространство;  $h_{im}$  — координаты базовых векторов  ${\it h}_1$ ,  ${\it h}_2$ ,  ${\it h}_3$  узлового пространства.

*Нормализованная координата*. Положение точки на оси стержня характеризуется нормализованной координатой z, не зависящей от конфигурации фермы:

$$y_1 = 0.5(1+z)a$$
  $-1 \le z \le 1$ ,  
 $z_1 = 0.5(1+z)\hat{a}$   $-1 \le z \le 1$ , (1.9)

где z — нормализованная осевая координата стержня; a — длина стержня в исходной конфигурации;  $\hat{a}$  — длина стержня в мгновенной конфигурации.

Векторы перемещений узла и элемента. Рассмотрим узел B стержня, показанный на рис. 1.1. Разность радиус-векторов узла в мгновенной и исходной конфигурациях фермы будем называть перемещением узла B в мгновенной конфигурации:

$$\boldsymbol{u}_{B} := \hat{\boldsymbol{x}}_{B} - \boldsymbol{x}_{B}. \tag{1.10}$$

Вектор перемещений узла может быть обозначен различными символами, в зависимости от того, в какой системе заданы его координаты:

$$\mathbf{u}_{n} = \begin{bmatrix} u_{1n} \\ u_{2n} \\ u_{3n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_{n} = \begin{bmatrix} v_{1n} \\ v_{2n} \\ v_{3n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}_{n} = \begin{bmatrix} w_{1n} \\ w_{2n} \\ w_{3n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d}_{n} = \begin{bmatrix} d_{1n} \\ d_{2n} \\ d_{3n} \end{bmatrix}. \quad (1.11)$$

Здесь  $u_n$  — вектор перемещений узла n, заданный в глобальном пространстве;  $v_n$ ,  $w_n$ ,  $d_n$  — тот же вектор, координаты которого заданы в исходном, мгновенном или узловом пространстве соответственно.

Правила преобразования координат векторов в выражении (1.11) следуют из правил преобразования координат радиус-векторов:

$$u_n = R_{xy}v_n$$
,  $u_n = R_{xz}w_n$ ,  $v_n = R_{yz}w_n$ ,  $u_n = R_{xn}d_n$ . (1.12)

Узловые векторы перемещений узлов A и B стержня, показанного на рис. 1.1, сводятся в вектор перемещений стержня. Вектор перемещений стержня может обозначаться четырьмя различными символами, определяющими, в каком координатном пространстве заданы его координаты:  $u_e$ ,  $v_e$ ,  $w_e$ ,  $d_e$ .

Правила преобразования координат вектора перемещений стержня следуют из правил преобразования, записанных для узловых векторов перемещений.

$$u_e = R_{exy} v_e$$
,  $u_e = R_{exz} w_e$ ,  $v_e = R_{eyz} w_e$ ,  $v_e = R_{eys} d_e$ , (1.13)

где  ${\it R}_{exy}$  — матрица поворота из исходного локального в глобальное пространство;  ${\it R}_{exz}$  — матрица поворота из мгновенного локального в глобальное пространство;  ${\it R}_{eyz}$  — матрица поворота из локального мгновенного в исходное пространство;  ${\it R}_{eys}$  — матрица поворота из локального мгновенного в локальное узловое пространство.

Каждая из матриц поворота элемента в выражениях (1.13) является блочно-диагональной матрицей, в которой диагональными блоками являются соответствующие матрицы поворота.

Так как матрицы поворота ортонормальны, то и матрицы поворота элемента также будут являться ортонормальными:

$$\boldsymbol{R}_{exy}^T \boldsymbol{R}_{exy} = \boldsymbol{I} . \tag{1.14}$$

Деформированное состояние конструкции. На рис. 1.2 показан стержень пространственной фермы в исходной и мгновенной конфигурациях фермы. Поперечное сечение PQRS в исходной конфигурации является плоским. Нормаль к плоскости сечения сонаправлена с осью  $y_1$  стержня. В мгновенной конфигурации материальные точки сечения PQRS перемещаются в точки поперечного сечения  $\hat{P}\hat{Q}\hat{R}\hat{S}$  стержня.

Для того чтобы свести трехмерную теорию упругости к одномерной теории деформации отдельного стержня пространственной фермы, вводятся гипотезы поведения фермы. Они задают следующие свойства стержня и его поперечного сечения в мгновенной конфигурации:

ось стержня в мгновенной конфигурации является прямой линией;

поперечное сечение является плоским;

форма поперечного сечения остается неизменной;

нормаль к поперечному сечению сонаправлена оси  $z_1$  стержня.

Перемещение стержня раскладывается на перемещение абсолютно жесткого тела, при котором узел A перемещается в положение  $\hat{A}$ , поворот абсолютно жесткого тела, при котором ось стержня принимает направление от  $\hat{A}$ 

к  $\hat{B}$ , и осевую деформацию стержня, при которой узел B перемещается в положение  $\hat{B}$ . Тогда, в соответствии с принятыми гипотезами, деформированное состояние стержня будет иметь следующие особенности:

так как форма поперечного сечения остается неизменной, то координаты  $e_{22}$ ,  $e_{23}$  и  $e_{33}$  тензора деформаций Грина равны нулю;

так как поперечное сечение остается плоским и его нормаль сонаправлена с осью стержня, то координаты  $e_{12}\,$  и  $e_{13}\,$  тензора Грина равны нулю.

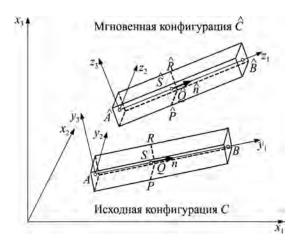


Рис. 1.2. Перемещение стержня

Единственной компонентой тензора деформаций, отличной от нуля, является осевая деформация  $e_{11}$ , величина которой постоянна по всему поперечному сечению. Она имеет обозначение  $\varepsilon$  и определяется по общей формуле теории упругости:

$$\varepsilon = v_{1,1} + \frac{1}{2} \left( v_{1,1}^2 + v_{2,1}^2 + v_{3,1}^2 \right), \ v_{i,m} := \frac{\partial v_i}{\partial y_m}, \tag{1.15}$$

где  $v_i$  — координата перемещения, определенная в исходном пространстве.

2. Нелинейные уравнения статики пространственных ферм

Векторы системы уравнений. При выводе системы разрешающих уравнений используются следующие виды векторов, задаваемые в узловой системе координат:  $d_s$  — вектор перемещений системы,  $q_s$  — вектор нагрузок системы,  $r_s$  — вектор реакций системы,  $s_s$  — статус-вектор системы.

Вектор перемещений элемента  $\mathbf{v}_e$  отображается в вектор перемещений системы  $\mathbf{d}_s$  при помощи топологической матрицы  $\mathbf{T}_e$ , которая не зависит от системы координат.

$$\boldsymbol{v}_e = \boldsymbol{R}_{esy}^T \boldsymbol{d}_e = \boldsymbol{R}_{esy}^T \boldsymbol{T}_e \, \boldsymbol{d}_s \,. \tag{2.1}$$

В каждом узле фермы по каждому направлению координат, связанных с этим узлом, могут быть заданы либо сила, либо перемещение. Неизвестная компонента этой пары определяется в процессе расчета. Заданные силы на-

зываются нагрузками, вычисляемые силы — реакциями. Различие между заданными и вычисленными координатами перемещений и сил устанавливается при помощи вектора состояния системы (статус-вектора)  $s_s$ , размерность которого равна размерности вектора перемещений. Значение коэффициента статус-вектора равно «true», если по направлению данной степени свободы задано перемещение, и «false», если задана нагрузка.

Координаты узловой нагрузки записываются в узловой системе координат. Векторы узловых нагрузок в порядке нумерации узлов заносятся в вектор нагрузки  $\boldsymbol{q}_s$  системы. Реакции в узлах в порядке нумерации узлов заносятся в вектор реакций  $\boldsymbol{r}_s$  системы. Если по направлению данной степени свободы отсутствуют нагрузка и реакция, то соответствующие координаты векторов полагаются равными нулю.

Интегральная форма разрешающих уравнений. Интегральная форма разрешающих уравнений, описывающих нелинейное поведение упругих тел, применяется к случаю пространственной фермы. Каждый интеграл по объему тела заменяется суммой интегралов по объемам отдельных стержней. Так как в стержнях присутствуют только осевые деформации  $\varepsilon$  и осевые напряжения s, то скалярное умножение вариаций деформаций на напряжения сводится к произведению  $\delta \varepsilon s$ . Так как считается, что нагрузки приложены в узлах фермы, то член, содержащий объемную нагрузку, равен нулю. Поверхностные нагрузки и реакции заменяются нагрузками и реакциями в узлах фермы.

Таким образом, интегральная форма разрешающих уравнений для описания нелинейного поведения пространственных ферм сводится к виду

$$\sum_{e} \int_{C_a} \delta \varepsilon \, s \, dv = \delta (\Delta \boldsymbol{d}_s)^T (\boldsymbol{q}_s + \boldsymbol{r}_s), \qquad (2.2)$$

где  $C_e$  — объем, занимаемый стержнем e в исходной конфигурации;  $\epsilon$  — осевая деформация в стержне (координата  $e_{11}$  тензора деформаций Грина); s — осевое напряжение в стержне (координата  $s_{11}$  второго тензора напряжений Пиолы — Кирхгофа);  $\Delta d_s$  — инкремент вектора перемещений системы, заданного в узловой системе координат.

Осевое усилие в стержне. Осевая деформация є в стержне задана выражением (1.15). Произведение относительной деформации є и модуля упругости E дает напряжение s второго тензора напряжений Пиолы — Кирхгофа, отнесенное к базовому вектору  $\boldsymbol{b}_1$  мгновенной конфигурации. Вектор осевых сил  $\boldsymbol{a}_1$  и величина  $a_1$  осевого усилия в стержне определяются следующими выражениями:

$$\mathbf{a}_1 = A s \mathbf{b}_1 = E \varepsilon (\mathbf{e}_1 + v_{1,1} \mathbf{e}_1 + v_{2,1} \mathbf{e}_2 + v_{3,1} \mathbf{e}_3),$$
 (2.3)

$$a_1 = A E \varepsilon \sqrt{(1 + v_{1,1})^2 + v_{2,1}^2 + v_{3,1}^2}.$$
 (2.4)

 $\it Инкременты$   $\it перемещений.$  Инкрементальная форма разрешающих уравнений, описывающих нелинейное поведение упругих тел, приводится к случаю пространственной фермы. Вектор перемещений материальной точки в неизвестной мгновенной конфигурации  $\it C^{(s+1)}$  фермы записывается как

сумма вектора перемещений в известной мгновенной конфигурации  $C^{(s)}$  и инкремента перемещений между конфигурациями  $C^{(s)}$  и  $C^{(s+1)}$ . Если координаты узла записаны в глобальном пространстве, то его вектор перемещений может быть описан следующими уравнениями:

$$\mathbf{x}^{(s)} = \mathbf{x} + \mathbf{u} \,, \tag{2.5}$$

$$x^{(s+1)} = x^{(s)} + \Delta u \ . \tag{2.6}$$

Если координаты перемещения точки P на оси стержня записаны в исходном пространстве, то инкремент перемещения определится следующими уравнениями:

$$\mathbf{y}^{(s)} = \mathbf{y} + \mathbf{v} \,, \tag{2.7}$$

$$\mathbf{v}^{(s+1)} = \mathbf{v}^{(s)} + \Delta \mathbf{v} \ . \tag{2.8}$$

*Инкременты деформаций*. Деформация в мгновенной конфигурации  $C^{(s)}$  задается выражением (1.15):

$$\varepsilon = v_{1,1} + \frac{1}{2} \left( v_{1,1}^2 + v_{2,1}^2 + v_{3,1}^2 \right).$$

Деформация в неизвестной мгновенной конфигурации  $C^{(s+1)}$  задается по аналогии:

$$\varepsilon + \Delta \varepsilon = \left(v_{1,1} + \Delta v_{1,1}\right) + \frac{1}{2}\left(v_{1,1} + \Delta v_{1,1}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(v_{2,1} + \Delta v_{2,1}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(v_{3,1} + \Delta v_{3,1}\right)^2.$$

Вычтя первое уравнение из второго, получим инкремент деформации

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon^0 + \Delta \varepsilon^n, \tag{2.9}$$

где 
$$\Delta \epsilon^0 = (1 + v_{1,1}) \Delta v_{1,1} + v_{2,1} \Delta v_{2,1} + v_{3,1} \Delta v_{3,1}$$
, (2.10)

$$\Delta \varepsilon^{n} = \frac{1}{2} \left( \Delta v_{1,1}^{2} + \Delta v_{2,1}^{2} + \Delta v_{3,1}^{2} \right). \tag{2.11}$$

Здесь  $\Delta \varepsilon$  — инкремент деформации при переходе из конфигурации  $C^{(s)}$  в конфигурацию  $C^{(s+1)}$ ;  $\Delta \varepsilon^0$  — линейная компонента инкремента деформации;  $\Delta \varepsilon^n$  — нелинейная компонента инкремента деформации.

Вариации инкрементальных переменных. Предположим, что необходимо определить состояние фермы в мгновенной конфигурации  $C^{(s+1)}$ . В качестве весовой функции для невязки дифференциальных разрешающих уравнений принимается вариация полных перемещений в конфигурации  $C^{(s+1)}$ . Вариация координат перемещения, записанных для опорного пространства, определяется выражением

$$\delta(d + \Delta d) = \delta d + \delta(\Delta d). \tag{2.12}$$

Так как состояние фермы в конфигурации  $C^{(s)}$  известно, то перемещение в этом состоянии варьировать не нужно, и вариация перемещения запишется как

$$\delta(\mathbf{d} + \Delta \mathbf{d}) = \delta(\Delta \mathbf{d}) . \tag{2.13}$$

Вариация вектора перемещений стержня, заданного в исходном или мгновенном пространстве, записывается по аналогии:

$$\delta(\mathbf{v}_{e} + \Delta \mathbf{v}_{e}) = \delta(\Delta \mathbf{v}_{e}) , \qquad (2.14)$$

$$\delta(\mathbf{w}_{\rho} + \Delta \mathbf{w}_{\rho}) = \delta(\Delta \mathbf{w}_{\rho}). \tag{2.15}$$

Вариация деформации следует из выражений (2.10) и (2.11):

$$\delta(\Delta \varepsilon^{0}) = (1 + v_{1,1})\delta(\Delta v_{1,1}) + v_{2,1}\delta(\Delta v_{2,1}) + v_{3,1}\delta(\Delta v_{3,1}), \qquad (2.16)$$

$$\delta(\Delta \varepsilon^n) = \Delta v_{1,1} \delta(\Delta v_{1,1}) + \Delta v_{2,1} \delta(\Delta v_{2,1}) + \Delta v_{3,1} \delta(\Delta v_{3,1}). \tag{2.17}$$

Разрешающие уравнения в инкрементах перемещений. Разрешающее уравнение (2.2), описывающее поведение пространственной фермы, записывается для конфигурации  $C^{(s+1)}$ . Левая часть уравнения (2.2) дает:

$$\sum_{e} \int_{C_{e}} \delta(\varepsilon + \Delta \varepsilon)(s + \Delta s) \, dv = \sum_{e} \int_{C_{e}} \delta(\Delta \varepsilon^{0} + \Delta \varepsilon^{n})(s + \Delta s) \, dv ,$$
или 
$$\sum_{e} \int_{C_{e}} \delta(\varepsilon + \Delta \varepsilon)(s + \Delta s) \, dv =$$

$$= \sum_{e} \int_{C_{e}} \delta(\Delta \varepsilon^{0}) \, s \, dv + \sum_{e} \int_{C_{e}} \delta(\Delta \varepsilon^{n}) \, s \, dv + \sum_{e} \int_{C_{e}} \delta(\Delta \varepsilon) \Delta s \, dv.$$
(2.18)

Из правой части уравнения (2.2) получим

$$\delta(\boldsymbol{d}_{s} + \Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T}(\boldsymbol{q}_{s} + \Delta \boldsymbol{q}_{s}) + \delta(\boldsymbol{d}_{s} + \Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T}(\boldsymbol{r}_{s} + \Delta \boldsymbol{r}_{s}) =$$

$$= \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \boldsymbol{q}_{s} + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \Delta \boldsymbol{q}_{s} + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \boldsymbol{r}_{s} + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \Delta \boldsymbol{r}_{s}. \tag{2.19}$$

Рассмотрим в уравнениях (2.18) и (2.19) члены, описывающие перемещения, нагрузки и реакции в конфигурации  $C^{(s)}$ . Если бы решение для конфигурации  $C^{(s)}$  было точным, эти члены должны были бы взаимно уничтожиться. Из-за аппроксимаций, вводимых на предыдущих шагах, решение не является точным, и эти члены в совокупности дают невязку  $\delta e$ , значение которой определяется выражением

$$\delta e = -\sum_{e} \int_{C_e} \delta(\Delta \epsilon^0) s \, dv + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_s)^T \boldsymbol{q}_s + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_s)^T \boldsymbol{r}_s . \tag{2.20}$$

Подставив в выражение (2.20) вариацию инкремента деформации  $\Delta \epsilon^0$  из выражения (2.16) и выполнив аналитическое интегрирование полученного выражения по объему стержня, получим

$$\delta e = -\sum_{e} A a s \left( (1 + v_{1,1}) \delta(\Delta v_{1,1}) + v_{2,1} \delta(\Delta v_{2,1}) + v_{3,1} \delta(\Delta v_{3,1}) \right) +$$

$$+ \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \boldsymbol{q}_{s} + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \boldsymbol{r}_{s} , \qquad (2.21)$$

где *а* — длина стержня в исходной конфигурации.

Вариация нелинейного компонента инкремента деформации подставляется из выражения (2.17) во второй член правой части уравнения (2.18), после чего выполняется интегрирование по объему стержня:

$$\sum_{e} \int\limits_{C_e} \delta(\triangle \varepsilon^n) \, s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \Big( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \Big) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,2} \, \delta(\triangle v_{3,2}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{2,2}) + \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{2,2}) + \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{1,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) + \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) + \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) + \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left( \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) + \triangle v_{2,2} \, \delta(\triangle v_{2,2}) \right) s \, dv = \sum_{e} \int\limits_{C_e} \left($$

$$= \sum_{e} A E a \varepsilon \left( \triangle v_{1,1} \, \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle v_{2,1} \, \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle v_{3,1} \, \delta(\triangle v_{3,1}) \right). \tag{2.22}$$

Третий член правой части уравнения (2.18) является нелинейным относительно инкрементов производных перемещений  $\Delta v_{k,1}$ . Этот член аппроксимируется итерационно на каждом шаге нагружения. На нулевой итерации нелинейная часть принимается равной нулю. На последующих итерациях для аппроксимации нелинейного члена используются приближенные значения производных перемещения, полученные на предыдущей итерации. Приближенные значения переменных обозначены чертой над знаком переменной. Инкремент деформации  $\Delta \varepsilon$  и его вариации  $\delta(\Delta \varepsilon)$  аппроксимируются при помощи выражений (2.10), (2.11) и (2.16), (2.17):

$$\begin{split} & \Delta \varepsilon = \left(1 + v_{1,1} + \frac{1}{2} \triangle \overline{v}_{1,1}\right) \triangle v_{1,1} + \left(v_{2,1} + \frac{1}{2} \triangle \overline{v}_{2,1}\right) \triangle v_{2,1} + \left(v_{3,1} + \frac{1}{2} \triangle \overline{v}_{3,1}\right) \triangle v_{3,1} \ , (2.23) \\ & \delta(\triangle \varepsilon) = \left(1 + v_{1,1} + \frac{1}{2} \triangle \overline{v}_{1,1}\right) \delta\left(\triangle v_{1,1}\right) + \left(v_{2,1} + \frac{1}{2} \triangle \overline{v}_{2,1}\right) \delta\left(\triangle v_{2,1}\right) + \\ & + \left(v_{3,1} + \frac{1}{2} \triangle \overline{v}_{3,1}\right) \delta\left(\triangle v_{3,1}\right) + \frac{1}{2} \left(\triangle \overline{v}_{1,1} \delta(\triangle v_{1,1}) + \triangle \overline{v}_{2,1} \delta(\triangle v_{2,1}) + \triangle \overline{v}_{3,1} \delta(\triangle v_{3,1})\right). \end{aligned}$$

Здесь  $v_{m,1}$  — производные координат перемещений в конфигурации  $C^{(s)}$  по переменной  $y_1$ ;  $\triangle v_{m,1}$  — производные инкрементов перемещений при переходе из конфигурации  $C^{(s)}$  в конфигурацию  $C^{(s+1)}$ ;  $\triangle \overline{v}_{m,1}$  — приближенные значения производных инкрементов перемещений.

Подставляя полученные выражения (2.23) и (2.24) для инкремента деформаций и его вариации в третий член правой части уравнения (2.18) и выполняя аналитическое интегрирование, получим:

$$\sum_{e} \int_{C_{e}} E \,\delta(\triangle E) \,\triangle E \,dV =$$

$$= \sum_{e} A E \,a \left( \delta(\triangle V_{1,1}) + \sum_{i=1}^{3} V_{i,1} \,\delta(\triangle V_{i,1}) \right) \left( \triangle V_{1,1} + \sum_{i=1}^{3} V_{i,1} \,\triangle V_{i,1} \right) +$$

$$+ \sum_{e} \frac{1}{2} A E \,a \left( \delta(\triangle V_{1,1}) + \sum_{i=1}^{3} V_{i,1} \,\delta(\triangle V_{i,1}) \right) \left( \sum_{i=1}^{3} \triangle \overline{V}_{i,1} \,\triangle V_{i,1} \right) +$$

$$+ \sum_{e} \frac{1}{2} A E \,a \left( \sum_{i=1}^{3} \triangle \overline{V}_{i,1} \,\delta(\triangle V_{i,1}) \right) \left( \triangle V_{1,1} + \sum_{i=1}^{3} V_{i,1} \,\triangle V_{i,1} \right) +$$

$$+ \sum_{e} \frac{1}{2} A E \,a \left( \sum_{i=1}^{3} \triangle \overline{V}_{i,1} \,\delta(\triangle V_{i,1}) \right) \left( \sum_{i=1}^{3} \triangle \overline{V}_{i,1} \,\triangle V_{i,1} \right) +$$

$$+ \sum_{e} A E \,a \overline{h} \left( \sum_{i=1}^{3} \triangle V_{i,1} \,\delta(\triangle V_{i,1}) \right), \qquad (2.25)$$

где 
$$\overline{h} = \frac{1}{2} \left( \Delta \overline{v}_{1,1} + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \Delta \overline{v}_{i,1} \right).$$
 (2.26)

Подстановка выражений с (2.21) по (2.26) в уравнения (2.18) и (2.19) дает инкрементальное разрешающее уравнение для пространственных ферм.

$$\sum_{e} A E a \left( \delta(\Delta v_{1,1}) + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \delta(\Delta v_{i,1}) \right) \left( \Delta v_{1,1} + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \Delta v_{i,1} \right) +$$

$$+ \sum_{e} A E a \varepsilon \sum_{i=1}^{3} \Delta v_{i,1} \delta(\Delta v_{i,1}) +$$

$$+ \sum_{e} \frac{1}{2} A E a \left( \delta(\Delta v_{1,1}) + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \delta(\Delta v_{i,1}) \right) \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \Delta v_{i,1} \right) +$$

$$+ \sum_{e} \frac{1}{2} A E a \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \delta(\Delta v_{i,1}) \right) \left( \Delta v_{1,1} + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \Delta v_{i,1} \right) +$$

$$+ \sum_{e} \frac{1}{2} A E a \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \delta(\Delta v_{i,1}) \right) \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \Delta v_{i,1} \right) +$$

$$+ \sum_{e} A E a \overline{h} \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta v_{i,1} \delta(\Delta v_{i,1}) \right) = \delta e + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \Delta \boldsymbol{q}_{s} + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \Delta \boldsymbol{r}_{s}.$$

$$(2.27)$$

Уравнения (2.27) линейны относительно неизвестных инкрементов перемещений  $\Delta v_1$ ,  $\Delta v_2$  и  $\Delta v_3$ . Эти уравнения являются приближенными, так как производные  $\Delta \overline{v}_{1,1}$ ,  $\Delta \overline{v}_{2,1}$  и  $\Delta \overline{v}_{3,1}$  аппроксимируются значениями, взятыми из предыдущих итераций на шаге нагружения. Ни один из членов точного разрешающего уравнения (2.2) не опускается.

# Выводы

Получена аналитическая формулировка инкрементальных разрешающих уравнений, описывающих нелинейное поведение пространственных ферм. Разрешающие уравнения получены на основе общей геометрически нелинейной теории упругости с использованием унифицированного подхода к геометрически нелинейному расчету конструкций, разрабатываемого автором.

Полученные аналитические инкрементальные уравнения отличаются тем, что в них сохранены все члены исходного точного разрешающего уравнения. В последующей статье будет описан переход от инкрементальных уравнений к системе алгебраических разрешающих уравнений на основе метода конечных элементов и алгоритм деформационного анализа пространственных ферм.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Галишникова В.В.* Унифицированный и общий подход к геометрически нелинейному расчету строительных конструкций // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2006. Вып. 6 (20). С. 42—66.

© Галишникова В.В., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 УДК 624.04:514

#### В.В. Галишникова

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФЕРМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На основе метода конечных элементов получены алгебраические разрешающие уравнения задачи геометрически нелинейного деформирования пространственных ферм. Показана процедура получения матрицы полной жесткости конструкции с сохранением всех нелинейных членов уравнений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пространственные фермы; метод конечных элементов; геометрически нелинейное деформирование.

The algebraic governing equations for the geometrically nonlinear deformation analysis are obtained using the finite element approach. The procedure for the assembly of the total stiffness matrix of the structure retaining all nonlinear terms is demonstrated.

K e y w o r d s: space trusses; Finite Element Method; geometrically non-linear deformation.

В [1] на основе общей геометрически нелинейной теории упругости получены разрешающие инкрементальные уравнения, описывающие нелинейное поведение пространственных ферм. Полученные аналитические инкрементальные уравнения отличаются тем, что в них сохранены все члены исходного точного разрешающего уравнения. В настоящей работе выполнена формулировка алгебраических разрешающих уравнений задачи в матричной форме метода конечных элементов.

# 1. Алгебраические разрешающие уравнения

Интерполяция перемещения. Интерполяция перемещений точек на оси стержня выполняется в соответствии с принятыми гипотезами. Так как ось стержня в мгновенной конфигурации представляет собой прямую линию, а нагрузка приложена в узлах, то координаты перемещения изменяются вдоль оси линейно:

$$\mathbf{v} = \mathbf{S} \, \mathbf{v}_{\rho} \,, \tag{1.1}$$

где v — вектор перемещения некоторой точки оси стержня при переходе фермы из исходной в мгновенную конфигурацию;  $v_e$  — вектор перемещений элемента из исходной в мгновенную конфигурацию; S — матрица интерполяции координат перемещения в мгновенной конфигурации.

Матрица интерполяции содержит линейные функции нормализованной осевой координаты z:

Интерполяция координаты перемещения  $v_m$  задается соответствующей строкой матрицы S , обозначаемой  $s_m^T$  :

$$v_m = \mathbf{s}_m^T \mathbf{v}_e \,, \tag{1.3}$$

здесь  $s_m$  — интерполирующий вектор координаты перемещения  $v_m$  .

Интерполяция производных перемещений. Первые производные координат перемещения по переменной  $y_1$  получаются из выражения (1.1):

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y_1} = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial y_1} \mathbf{v}_e := \mathbf{S}_{,1} \mathbf{v}_e, 
\mathbf{S}_{,1} = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial y_1} = \frac{2}{a} \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial z}, 
(1.4)$$

$$S_{,1} = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{1}^{T} \\ \mathbf{g}_{2}^{T} \\ \mathbf{g}_{3}^{T} \end{bmatrix}.$$

Здесь  $S_{,1}$  — матрица интерполяции производных координат перемещения;  $g_m$  — интерполирующий вектор производной координаты перемещения  $v_m$  по переменной  $y_1$ ; a — длина стержня в мгновенной конфигурации.

Интерполяция производной координаты перемещения  $v_{m,1}$  вдоль оси стержня задается выражением:

$$v_{m,1} = \frac{1}{a} \mathbf{g}_{m}^{T} \mathbf{v}_{e} \,. \tag{1.5}$$

*Интерполяция деформаций*. Интерполяция осевой деформации вдоль оси стержня определяется подстановкой выражения (1.5) в формулу осевой деформации нелинейной теории упругости:

$$\varepsilon = v_{1,1} + \frac{1}{2} \left( v_{1,1}^2 + v_{2,1}^2 + v_{3,1}^2 \right) =$$

$$= \frac{1}{a} \mathbf{g}_1^T \mathbf{v}_e + \frac{1}{2a^2} \left( \left( \mathbf{g}_1^T \mathbf{v}_e \right)^2 + \left( \mathbf{g}_2^T \mathbf{v}_e \right)^2 + \left( \mathbf{g}_3^T \mathbf{v}_e \right)^2 \right). \tag{1.6}$$

Интерполяция инкрементов перемещений. Пусть стержень, показанный на рис. 1.1, перемещается вначале из положения AB в исходной конфигурации C в положение  $A^{(s)}B^{(s)}$  мгновенной конфигурации  $C^{(s)}$ , а затем — в положение  $A^{(s+1)}B^{(s+1)}$  следующей мгновенной конфигурации  $C^{(s+1)}$ .

Инкременты  $\triangle w_1$ ,  $\triangle w_2$  и  $\triangle w_3$  координат перемещения точки P на оси стержня в мгновенном пространстве интерполируются линейно при помощи нормализованной координаты z:

$$\Delta \mathbf{w} = \mathbf{S} \,\Delta \mathbf{w}_{o},\tag{1.7}$$

где  $\triangle w$  — инкремент перемещений точки z при переходе из конфигурации  $C^{(s)}$  в конфигурацию  $C^{(s+1)}$ ;  $\triangle w_e$  — инкремент вектора перемещений элемента при переходе из конфигурации  $C^{(s)}$  в конфигурацию  $C^{(s+1)}$ .

Выражение для координат инкрементов перемещений имеет вид:

$$\Delta w_m = \mathbf{s}_m^T \Delta \mathbf{w}_e \ . \tag{1.8}$$

Преобразования координат перемещения преобразуются между исходным и мгновенным пространствами и задаются следующими выражениями:

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{R}_{yz} \Delta \mathbf{w}, \qquad \Delta \mathbf{w} = \mathbf{R}_{yz}^{T} \Delta \mathbf{v} ,$$

$$\Delta \mathbf{v}_{A} = \mathbf{R}_{yz} \Delta \mathbf{w}_{A}, \quad \Delta \mathbf{w}_{A} = \mathbf{R}_{yz}^{T} \Delta \mathbf{v}_{A} ,$$

$$\Delta \mathbf{v}_{B} = \mathbf{R}_{yz} \Delta \mathbf{w}_{B}, \quad \Delta \mathbf{w}_{B} = \mathbf{R}_{yz}^{T} \Delta \mathbf{v}_{B} .$$

$$(1.9)$$

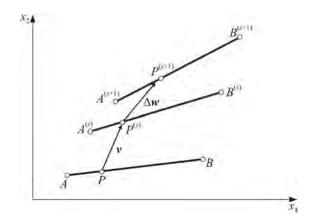


Рис. 1.1. Инкрементальное перемещение стержня

Умножив выражение (1.7) слева на матрицу поворота  ${\pmb R}_{yz}$  и подставив в правую часть выражения для  ${}_\Delta {\pmb w}_A$  и  ${}_\Delta {\pmb w}_B$  из (1.9), получим:

$$\Delta \mathbf{v} = \boxed{\mathbf{R}_{yz}} \cdot \boxed{0,5(1-z) \mathbf{I} \quad 0,5(1+z) \mathbf{I}} \cdot \boxed{\mathbf{R}_{yz}^T \Delta \mathbf{v}_A} \\ \boxed{\mathbf{R}_{yz}^T \Delta \mathbf{v}_B}$$
 (1.10)

Так как матрица поворота  $\mathbf{R}_{yz}$  ортонормальна, то произведение  $\mathbf{R}_{yz}$   $\mathbf{R}_{yz}^T$  в выражении (1.10) даст единичную матрицу. Таким образом, в исходном пространстве инкременты перемещения изменяются линейно между узлами A и B элемента:

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{S} \Delta \mathbf{v}_{\rho}, \tag{1.11}$$

где  $\triangle v$  — инкремент вектора перемещений точки z из конфигурации  $C^{(s)}$  в  $C^{(s+1)}$ ;  $\triangle v_e$  — инкремент вектора перемещений элемента из конфигурации  $C^{(s)}$  в  $C^{(s+1)}$ ; S — матрица интерполяции координат перемещения в мгновенной конфигурации.

Выполненные преобразования показывают, что интерполяция перемещений элемента может выполняться в исходной системе координат, что позволяет существенно упростить построение алгоритмов решения задачи.

Инкременты координат перемещения элемента задаются строками матрицы интерполяции S:

$$\Delta v_i = \mathbf{s}_i^T \Delta \mathbf{v}_e \,, \tag{1.12}$$

где  $s_i$  — интерполирующий вектор координаты перемещения  $v_i$ .

Интерполяция производных инкрементов перемещений. Производные инкрементов перемещений в выражении (1.11) определяются по аналогии с производными полных перемещений в выражении (1.5):

$$\Delta V_{m,1} = \frac{1}{a} \mathbf{g}_m^T \Delta \mathbf{v}_e \,. \tag{1.13}$$

*Вариации инкрементальных переменных*. Вариация инкремента перемещения следует из выражения (1.12):

$$\delta(\Delta v_m) = s_m^T \delta(\Delta v_e), \qquad m \in \{1, 2, 3\}. \tag{1.14}$$

Вариация производных инкрементов перемещения следует из (1.13):

$$\delta(\Delta v_{m,1}) = \frac{1}{a} \mathbf{g}_{m}^{T} \delta(\Delta \mathbf{v}_{e}), \qquad m \in \{1, 2, 3\}.$$

$$(1.15)$$

Подставляя полученные значения в выражения инкрементов деформаций [3], получим вариации инкрементов деформаций в виде

$$\delta(\Delta \varepsilon^0) = \frac{1}{a} \Big( (1 + v_{1,1}) \, \boldsymbol{g}_1^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + v_{2,1} \, \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + v_{3,1} \, \boldsymbol{g}_3^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) \Big), \tag{1.16}$$

$$\delta(\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^n) = \frac{1}{a} \left( \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e)^T \boldsymbol{g}_1 \boldsymbol{g}_1^T \Delta \boldsymbol{v}_e + \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e)^T \boldsymbol{g}_2 \boldsymbol{g}_2^T \Delta \boldsymbol{v}_e + \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e)^T \boldsymbol{g}_3 \boldsymbol{g}_3^T \Delta \boldsymbol{v}_e \right), (1.17)$$

$$\delta(\Delta \varepsilon) = \frac{1}{a} \left( 1 + v_{1,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{1,1} \right) \boldsymbol{g}_1^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol{v}_e) + \frac{1}{a} \left( v_{2,1} + \frac{1}{2} \Delta \overline{v}_{2,1} \right) \boldsymbol{g}_2^T \delta(\Delta \boldsymbol$$

$$+\frac{1}{a}\left(v_{3,1}+\frac{1}{2}\triangle\overline{v}_{3,1}\right)g_{3}^{T}\delta(\triangle v_{e})+\frac{1}{2a}\delta(\triangle v_{e}^{T})\left(\triangle\overline{v}_{1,1}g_{1}+\triangle\overline{v}_{2,1}g_{2}+\triangle\overline{v}_{3,1}g_{3}\right). (1.18)$$

Вектор невязки разрешающих уравнений. Инкременты производных перемещений (1.13) подставляются в выражение невязки инкрементальных разрешающих уравнений, полученное в [1]:

$$\delta e = -\sum_{e} A a s \left( \delta(\Delta v_{1,1}) + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \delta(\Delta v_{i,1}) \right) + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \boldsymbol{q}_{s} + \delta(\Delta \boldsymbol{d}_{s})^{T} \boldsymbol{r}_{s}.$$

Вариация вектора перемещений элемента  $\delta(\Delta v_e)$  заменяется вариацией инкремента вектора перемещений системы  $\delta(\Delta d_s)$  при помощи преобразования  $v_e = \mathbf{R}_{esv}^T \mathbf{T}_e d_s$ :

$$\delta e = \delta (\Delta \boldsymbol{d}_s)^T e_s \,, \tag{1.19}$$

$$\boldsymbol{e}_{s} = \sum_{e} \boldsymbol{T}_{e}^{T} \boldsymbol{R}_{esy} \boldsymbol{e}_{e} + \boldsymbol{q}_{s} + \boldsymbol{r}_{s} , \qquad (1.20)$$

$$\boldsymbol{e}_{e} = -AE \varepsilon \left( (1 + v_{1,1}) \, \boldsymbol{g}_{1} + v_{2,1} \, \boldsymbol{g}_{2} + v_{3,1} \, \boldsymbol{g}_{3} \right). \tag{1.21}$$

Алгебраические инкрементальные уравнения выводятся из инкрементальных разрешающих уравнений, полученных в [1]. Производные инкрементов перемещений и их вариации из выражений (1.13) и (1.15) подставляются в слагаемые левой части разрешающего уравнения:

$$\begin{split} \sum_{e} AE \, a \left( \delta(\Delta v_{1,1}) + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \, \delta(\Delta v_{i,1}) \right) \left( \Delta v_{1,1} + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \, \Delta v_{i,1} \right) = \\ &= \sum_{e} \delta(\Delta v_{e})^{T} \left( \frac{AE}{a} \left( \mathbf{g}_{1} \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \mathbf{g}_{i} \right) \left( \mathbf{g}_{1}^{T} \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \mathbf{g}_{i}^{T} \right) \Delta v_{e}; \end{split}$$
(1.22)
$$\begin{split} \sum_{e} AE \, a\varepsilon \sum_{i=1}^{3} \Delta v_{i,1} \, \delta(\Delta v_{i,1}) = \\ &= \sum_{e} \delta(\Delta v_{e})^{T} \left( \frac{AE}{a} \varepsilon \left( \mathbf{g}_{1} \mathbf{g}_{1}^{T} + \mathbf{g}_{2} \mathbf{g}_{2}^{T} + \mathbf{g}_{3} \mathbf{g}_{3}^{T} \right) \right) \Delta v_{e}; \end{cases}$$
(1.23)
$$\begin{split} \sum_{e} \frac{1}{2} AE \, a \left( \delta(\Delta v_{1,1}) + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \, \delta(\Delta v_{i,1}) \right) \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \, \Delta v_{i,1} \right) = \\ &= \sum_{e} \delta(\Delta v_{e})^{T} \left( \frac{AE}{2a} \left( \mathbf{g}_{1} \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \mathbf{g}_{i} \right) \left( \sum_{i=1}^{3} \overline{v}_{i,1} \mathbf{g}_{i}^{T} \right) \right) \Delta v_{e}; \end{cases}$$
(1.24)
$$\begin{split} \sum_{e} \frac{1}{2} AE \, a \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \, \delta(\Delta v_{i,1}) \right) \left( \Delta v_{1,1} + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \, \Delta v_{i,1} \right) = \\ &= \sum_{e} \delta(\Delta v_{e})^{T} \left( \frac{AE}{2a} \left( \sum_{i=1}^{3} \overline{v}_{i,1} \mathbf{g}_{i} \right) \left( \mathbf{g}_{1}^{T} \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \mathbf{g}_{i}^{T} \right) \right) \Delta v_{e}; \end{cases}$$
(1.25)
$$\begin{split} \sum_{e} \frac{1}{2} AE \, a \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \, \delta(\Delta v_{i,1}) \right) \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \, \Delta v_{i,1} \right) = \\ &= \sum_{e} \delta(\Delta v_{e})^{T} \left( \frac{AE}{2a} \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \mathbf{g}_{i} \right) \left( \mathbf{g}_{1}^{T} \sum_{i=1}^{3} \Delta \overline{v}_{i,1} \mathbf{g}_{i}^{T} \right) \Delta v_{e}; \end{cases}$$
(1.26)
$$\begin{split} \sum_{e} AE \, a\overline{h} \left( \sum_{i=1}^{3} \Delta v_{i,1} \, \delta(\Delta v_{i,1}) \right) = \\ &= \sum_{e} \delta(\Delta v_{e})^{T} \left( \frac{AE}{a} \overline{h} \left( \mathbf{g}_{1} \mathbf{g}_{1}^{T} + \mathbf{g}_{2} \mathbf{g}_{2}^{T} + \mathbf{g}_{3} \mathbf{g}_{3}^{T} \right) \right) \Delta v_{e}, \end{cases}$$
(1.27)
$$\Gamma \Pi e \, \overline{h} = 0.5 \left( \Delta \overline{v}_{1,1} + \sum_{i=1}^{3} v_{i,1} \Delta \overline{v}_{i,1} \right). \end{split}$$

Вариация вектора перемещений элемента заменяется вариацией вектора перемещений системы и выражения с (1.22) по (1.27) подставляются в разрешающее уравнение:

$$\delta(\Delta \boldsymbol{d}_s)^T \boldsymbol{K}_s \Delta \boldsymbol{d}_s = \delta(\Delta \boldsymbol{d}_s)^T (\boldsymbol{e}_s + \Delta \boldsymbol{q}_s + \Delta \boldsymbol{r}_s), \qquad (1.28)$$

где  $\pmb{K}_s$  — матрица жесткости системы;  ${}_{\Delta}\pmb{d}_s$  — вектор инкрементов перемещений системы;  ${}_{\mathcal{S}}$  — вектор невязки системы;  ${}_{\Delta}\pmb{q}_s$  — вектор инкрементов нагрузок системы;  ${}_{\Delta}\pmb{r}_s$  — вектор инкрементов реакций системы.

Матрица жесткости системы компонуется из матриц отдельных элементов:

$$\boldsymbol{K}_{s} = \sum \boldsymbol{T}_{e}^{T} \boldsymbol{R}_{esy} \boldsymbol{K}_{e} \boldsymbol{R}_{esy}^{T} \boldsymbol{T}_{e} , \qquad (1.29)$$

где 
$$K_e = K_c + K_d + K_g + K_m + K_n + K_r$$
. (1.30)

Введем следующие обозначения для произведений интерполирующих векторов производных перемещений  $\mathbf{g}_m$ :

$$G_{kk} := g_k g_k^T, \qquad k, m \in \{1, 2, 3\},$$

$$G_{km} := g_k g_m^T + g_m g_k^T, \quad k \neq m. \qquad (1.31)$$

Постоянная составляющая  $\mathbfilde K_c$  матрицы жесткости стержня определяется из выражения (1.22):

$$\boldsymbol{K}_{c} = \frac{AE}{a}\boldsymbol{G}_{11} \ . \tag{1.32}$$

Девиаторная составляющая  $\mathbfilde{K}_d$  матрицы жесткости стержня также определяется из выражения (1.22):

$$\mathbf{K}_{d} = \frac{AE}{a} \left( c_{1}\mathbf{G}_{11} + c_{2}\mathbf{G}_{22} + c_{3}\mathbf{G}_{33} + c_{4}\mathbf{G}_{12} + c_{5}\mathbf{G}_{13} + c_{6}\mathbf{G}_{23} \right), \tag{1.33}$$

где 
$$c_1 = v_{1,1} (2 + v_{1,1}), \quad c_2 = v_{2,1}^2, \qquad c_3 = v_{3,1}^2,$$

$$c_4 = v_{2,1}(1 + v_{1,1}), \quad c_5 = v_{3,1}(1 + v_{1,1}), \quad c_6 = v_{2,1}v_{3,1}.$$

Геометрическая составляющая  ${\pmb K}_g$  матрицы жесткости стержня определяется из выражения (1.23):

$$\mathbf{K}_{g} = \frac{AE}{a} c_{7} \left( \mathbf{G}_{11} + \mathbf{G}_{22} + \mathbf{G}_{33} \right), \tag{1.34}$$

где 
$$c_7 = v_{1,1} + \frac{1}{2} \left( v_{1,1}^2 + v_{2,1}^2 + v_{3,1}^2 \right).$$

Корректирующая составляющая матрицы жесткости стержня  $\boldsymbol{K}_m$  определяется из выражений (1.24) и (1.25):

$$\boldsymbol{K}_{m} = \frac{AE}{a} (c_{8}\boldsymbol{G}_{11} + c_{9}\boldsymbol{G}_{22} + c_{10}\boldsymbol{G}_{33} + c_{11}\boldsymbol{G}_{12} + c_{12}\boldsymbol{G}_{13} + c_{13}\boldsymbol{G}_{23}), \tag{1.35}$$

где 
$$c_8 = \Delta \overline{v}_{1,1} (1 + v_{1,1}), \quad c_9 = \Delta \overline{v}_{2,1} v_{2,1}, \quad c_{10} = \Delta \overline{v}_{3,1} v_{3,1},$$

$$c_{11} = 0.5 \left( \Delta \overline{v}_{2,1} (1 + v_{1,1}) + \Delta \overline{v}_{1,1} v_{2,1} \right), \quad c_{12} = 0.5 \left( \Delta \overline{v}_{3,1} (1 + v_{1,1}) + \Delta \overline{v}_{1,1} v_{3,1} \right),$$

$$c_{13} = 0.5 \left( \triangle \overline{v}_{2,1} v_{3,1} + \triangle \overline{v}_{3,1} v_{2,1} \right).$$

Корректирующая составляющая матрицы жесткости стержня  $\boldsymbol{K}_n$  определяется из выражения (1.26):

$$\boldsymbol{K}_{n} = \frac{AE}{a} \left( c_{14} \boldsymbol{G}_{11} + c_{15} \boldsymbol{G}_{22} + c_{16} \boldsymbol{G}_{33} + c_{17} \boldsymbol{G}_{12} + c_{18} \boldsymbol{G}_{13} + c_{19} \boldsymbol{G}_{23} \right), \tag{1.36}$$

где 
$$c_{14}=0,5$$
а $\overline{v}_{1,1}^2$ ,  $c_{15}=0,5$ а $\overline{v}_{2,1}^2$ ,  $c_{16}=0,5$ а $\overline{v}_{3,1}^2$ ,

$$c_{17} = 0.5 \,\Delta \overline{v}_{11} \,\Delta \overline{v}_{21}, \quad c_{18} = 0.5 \,\Delta \overline{v}_{11} \,\Delta \overline{v}_{31}, \quad c_{19} = 0.5 \,\Delta \overline{v}_{21} \,\Delta \overline{v}_{31}.$$

Корректирующая составляющая матрицы жесткости стержня  $\boldsymbol{K}_r$  определяется из выражения (1.27):

$$\boldsymbol{K}_{r} = \frac{AE}{a} c_{20} \left( \boldsymbol{G}_{11} + \boldsymbol{G}_{22} + \boldsymbol{G}_{33} \right), \tag{1.37}$$

где  $c_{20} = \overline{h}$ .

Вычисляя произведения векторов (1.31) в выражениях с (1.32) по (1.37), получим следующий вид матрицы жесткости элемента  $\mathbf{K}_{\rho}$ :

$$\boldsymbol{K}_{e} = \frac{AE}{a} \begin{bmatrix} a_{1} & a_{4} & a_{5} & -a_{1} & -a_{4} & -a_{5} \\ a_{4} & a_{2} & a_{6} & -a_{4} & -a_{2} & -a_{6} \\ a_{5} & a_{6} & a_{3} & -a_{5} & -a_{6} & -a_{3} \\ -a_{1} & -a_{4} & -a_{5} & a_{1} & a_{4} & a_{5} \\ -a_{4} & -a_{2} & -a_{6} & a_{4} & a_{2} & a_{6} \\ -a_{5} & -a_{6} & -a_{3} & a_{5} & a_{6} & a_{3} \end{bmatrix},$$

$$(1.38)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 + c_1 + c_7 + c_8 + c_{14} + c_{20}; & a_4 &= c_4 + c_{11} + c_{17}; \\ a_2 &= c_2 + c_7 + c_9 + c_{15} + c_{20}; & a_5 &= c_5 + c_{12} + c_{18}; \\ a_3 &= c_3 + c_7 + c_{10} + c_{16} + c_{20}; & a_6 &= c_6 + c_{13} + c_{19}. \end{aligned}$$

В качестве вариаций системного вектора перемещений в выражении (1.28) примем единичные значения перемещений в узлах фермы. Каждая вариация дает одно уравнение. В результате получим следующую систему алгебраических разрешающих уравнений относительно инкрементов перемещений и реакций пространственной фермы на шаге нагружения:

$$\mathbf{K}_{s} \triangle \mathbf{d}_{s} = \mathbf{e}_{s} + \triangle \mathbf{q}_{s} + \triangle \mathbf{r}_{s}. \tag{1.39}$$

Разрешающие уравнения (1.39) являются линеаризованными.

2. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений

Традиционно в современных методах расчета по деформациям используется последовательная линеаризация инкрементальных разрешающих уравнений на шаге нагружения. В конце каждого шага вычисляются неуравновешенные силы, возникающие вследствие линейной аппроксимации матрицы жесткости, и используются в виде поправочного вектора сил для итерационного уточнения решения. В данной работе использован новый подход к решению основных уравнений, при котором в инкрементальной матрице жесткости (1.38) сохранены все нелинейные члены. Первоначально инкрементальная матрица жесткости аппроксимируется матрицей касательной жесткости в начале шага, а затем уточняется в процессе итераций. В качестве параметра продолжения решения использована постоянная длина дуги кривой равновесных состояний. Размер шага определяется в соответствии с методом постоянных дуг.

Шаговый алгоритм решения основных уравнений задачи нелинейного деформирования конструкций описан в п. 4 [3].

3. Точность и эффективность метода

Исследования точности, устойчивости и надежности метода выполнены при помощи разработанного программного приложения на объектно-

ориентированной платформе Java. В качестве тестового примера рассматривалась задача нелинейного деформирования симметричной пространственной трехстержневой фермы, для которой в [4] получено точное аналитическое решение.

Расчетная модель симметричной пологой пространственной трехстержневой фермы показана на рис. 3.1. Опоры в узлах A, B и C представляют собой шаровые шарниры. Стержни фермы воспринимают только осевые усилия. Площадь поперечного сечения всех стержней равна  $10 \text{ см}^2$ . Модуль упругости материала принят равным  $2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ . В верхнем шарнирном узле D ферма загружена вертикальной силой P = -10.0 кH.

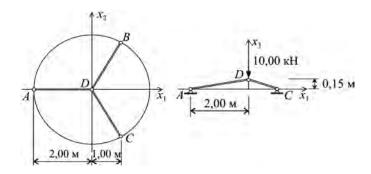


Рис. 3.1. Пологая симметричная пространственная трехстержневая ферма

Нагрузка прикладывается в 65 ступеней, во время которых ферма проходит полный цикл загружения — разгрузки. Расчет полностью охватывает нелинейную диаграмму работы конструкции, показанную на рис. 3.2. Результаты расчета приведены в таблице с интервалом в 5 шагов. Погрешности в определении перемещений и реакций очень малы и не зависят от величин перемещений.

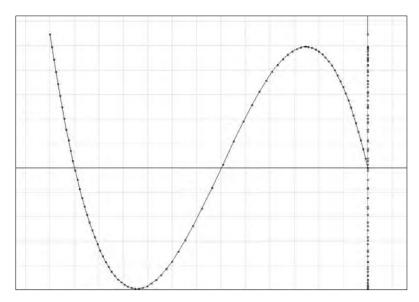


Рис. 3.2. Диаграмма перемещения вершины фермы

Погрешность вычисления траектории нагружения фермы

| <b>№</b><br>шага | Перемещение $u_3$ , м | Нагрузка $P_3$ , кН | Точное значение $P_3$ , кН | Погрешность<br>ε,% |
|------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|--------------------|
| 1                | -0,003082264          | -5,000000000        | -4,999854298               | 0,002914125        |
| 5                | -0,016185170          | -22,858054820       | -22,857765439              | 0,001266007        |
| 10               | -0,034951366          | -39,633274572       | -39,632216805              | 0,002668957        |
| 15               | -0,060788321          | -48,295855224       | -48,239346556              | 0,117142275        |
| 20               | -0,078854674          | -46,14152722        | -46,13481196               | 0,014555718        |
| 25               | -0,111247574          | -30,26025916        | -30,25931986               | 0,003104151        |
| 30               | -0,172802252          | 18,63782577         | 18,6373315                 | 0,002652021        |
| 35               | -0,22123336           | 46,1693256          | 46,15869695                | 0,023026335        |
| 40               | -0,241526461          | 48,06152525         | 48,06710242                | -0,011602873       |
| 45               | -0,261347109          | 41,82901148         | 41,82691188                | 0,005019737        |
| 50               | -0,278910691          | 28,1970399          | 28,19639703                | 0,002279947        |
| 55               | -0,294715769          | 8,380986459         | 8,380659194                | 0,003905003        |
| 60               | -0,309085064          | -16,61143186        | -16,61164357               | -0,001274461       |
| 65               | -0,32230765           | -46,06856653        | -46,06872352               | -0,000340782       |

#### Выводы

На основе метода конечных элементов получены алгебраические разрешающие уравнения задачи геометрически нелинейного деформирования пространственных ферм. Описана процедура получения инкрементальной матрицы жесткости конструкции, сохраняющей все нелинейные члены исходных разрешающих уравнений. На тестовом примере продемонстрирована точность алгоритма расчета, основанного на полученных формулировках.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Галишникова В.В.* Вывод разрешающих уравнений задачи геометрически нелинейного деформирования пространственных ферм на основе унифицированного подхода // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2009. Вып. 14 (33). С. 39—49.
- 2. Галишникова В.В., Паль П.Я. Геометрически нелинейный расчет плоских рам // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2006. Вып. 6 (21). С. 24—52.
- 3. *Галишникова В.В.* Унифицированный и общий подход к геометрически нелинейному расчету строительных конструкций // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2006. Вып. 6 (20). С. 42—66.
- 4. *Галишникова В.В.* Аналитическое решение нелинейной задачи устойчивости и исследование закритического поведения трехстержневой фермы // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2007. Вып. 6 (23). С. 53—64.

© Галишникова В.В., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 УДК 624.074:624.19.035.4

#### О.Л. Соколов

### ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ РАСЧЕТ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

Предлагается алгоритм пространственного расчета, учитывающий депланацию поперечных сечений конструкций обделок тоннелей мелкого заложения как призматических оболочек средней длины в податливой среде. Результаты показывают необходимость существенного изменения традиционной схемы армирования и позволяют создавать более совершенные конструкции.

Ключевые слова: оболочка призматическая; вариационная теория; упругое основание; дифференциальное уравнение; деформация контура; статическая аппроксимация; плоская деформация; пространственный расчет.

The paper suggest the method for the analysis with calculation of deplane transverse constructions tunnels at small depth as of prismatic shells of medium length in flexible environment. Results show the obgligatory of essential alter traditional schem of armature and allow create more perfect constructions.

K e y w o r d s: prismatic shell; variational theory; elastic foundation; differential equation; contour deformation; static approximation; spatial analysis.

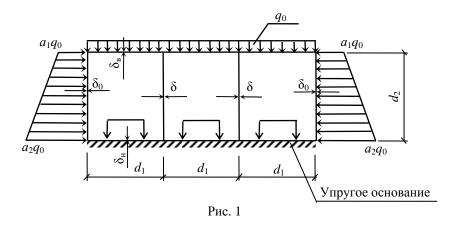
Рост автомобильного парка и интенсивности движения в современных городах заставляет проектировать и сооружать все большее количество подземных проездов и переходов. Сооружения эти располагаются на малой глубине и покоятся на податливых грунтах основания, протяженность их весьма невелика, а нагрузки по длине непостоянны, что ставит под серьезные сомнения приемлемость расчетной модели плоской деформации, которая занимает монопольное положение во всех существующих методиках расчета и используется как единственно возможная при проектировании горных тоннелей и метрополитенов [1, 2].

Между тем подземные сооружения, такие как автомобильные проезды и переходы, многоочковые дорожные трубы и тракторные проезды под насыпями по существу представляют собой призматические оболочки средней длины в податливой среде, чем они и являются с точки зрения строительной механики. Следовательно, к их расчету необходимо подходить именно с этих позиций, рассматривая пространственный характер работы сооружений. Область применимости и необходимость подобного расчета, учитывающего депланацию поперечных сечений конструкции, показаны в [3, 4], а настоящая статья посвящается сжатому принципиальному изложению алгоритма расчета.

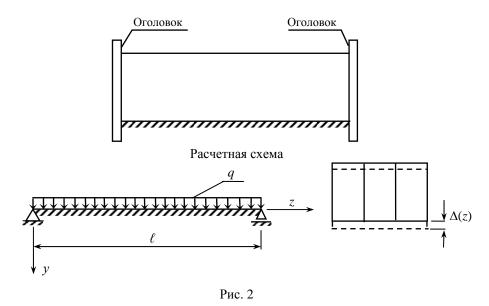
Параметры прочности и жесткости сооружения предлагается рассматривать как результат суммирования двух состояний: изгиба как балки на упругом основании с недеформируемым контуром поперечного сечения (зад. I) и изгиба призматической оболочки за счет деформации контура вследствие взаимного смещения стенок тоннеля (задача II).

Для учета влияния податливости подстилающего грунта воспользуемся простейшей моделью Винклера.

Поперечное сечение тоннеля и нагрузки показаны на рис. 1.



Задача І. Изгиб обделки тоннеля как балки с жестким контуром



Принятие модели Винклера позволяет воспользоваться методом начальных параметров в его классическом варианте А.Н. Крылова [5].

3 а д а ч а II. Изгиб обделки тоннеля как призматической оболочки за счет деформации контура. Для решения этой задачи применяем вариационную теорию призматических оболочек В.З. Власова [6] в сочетании со статической аппроксимацией базисных функций. Статическая аппроксимация рассматривалась и ранее самим В.З. Власовым в виде так называемой «функции поперечного распределения прогибов» от действия нагрузки, подобной заданной. Однако возможен и более простой путь статической аппроксимации, разработанный и обоснованный автором [7], который обеспечивает приемлемую точность, подтвержденную многочисленными контрольными расчетами по теории В.З. Власова и И.Е. Милейковского. В этом случае сначала аппроксимируется функция поперечных перемещений  $\Psi(s)$  как эпюра осевых перемещений элементов рамы-полоски dz = 1, выделенной из оболочки, от вспомога-

тельного нагружения «единичными» сосредоточенными силами в узлах, а затем определяется функция, аппроксимирующая продольные перемещения узлов, из соотношения:

$$\varphi'(s) = \varphi(s)$$
.

Соответствующая иллюстрация приведена на рис. 3.

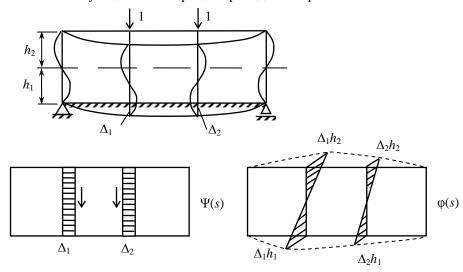


Рис. 3

При таком способе аппроксимации система разрешающих уравнений теории В.З. Власова, как показано в [7], вырождается в одно-единственное дифференциальное уравнение четвертого порядка при любом количестве контуров в поперечном сечении оболочки:

$$a_0 V^{\text{IV}}(z) + s_0 V(z) = \frac{q_{\text{II}}(z)}{E}$$
 или  $V^{\text{IV}}(z) + 4\beta^4 V(z) = \frac{q_{\text{II}}(z)}{Ea_0}$ , (1)

где  $a_0=\delta\int\limits_{\cup}\phi^2(s)\cdot ds$  ,  $s_0=rac{1}{E}\int\limits_{\cup}rac{\overline{M}^{\,2}(s)}{EI_1}ds$  и  $\overline{M}(s)$  — изгибающие моменты в

элементарной раме-полоске во вспомогательном состоянии;  $\beta = \sqrt[4]{\frac{s_0}{4a_0}}$ ,

$$q_{\Pi}(z) = \int_{\mathcal{Q}} q(z) \cdot \psi(s) \cdot ds = \int_{\mathcal{Q}} q(z) \cdot \overline{y}(s) \cdot ds$$
 и  $\overline{y}(s)$  — уравнения изогнутых осей элементов рамы-полоски во вспомогательном состоянии.

Уравнение (1) по форме представляет собой уравнение изгиба балки на некоем упругом «основании» Винклеровского типа с параметром податливости  $\beta$  и имеет то колоссальное преимущество перед классическими решениями по-Власову, что сразу дает замкнутое решение при любых имеющихся граничных условиях, поскольку не требует никакой аппроксимации тригонометрическими рядами искомых функций обобщенных перемещений V(z) и U(z).

Проиллюстрируем сказанное на примере тоннельной обделки, состоящей из двух одинаковых контуров (n=2) с размерами  $d_1=4$  м,  $d_2=5$  м. Толщины всех граней  $\delta=0,2$  м, т.е.  $\delta=\frac{1}{20}d$  . При толщине засыпки 1,5 м грунтом с объемным весом  $\gamma_{\rm rp}=1,5$  т/м³ и углом внутреннего трения  $\phi=30^\circ$  при наличии дорожной одежды над тоннелем 2 т/м² нагрузка на кровлю составит  $q_0=3,5$  т/м² . Интенсивность бокового давления грунта на уровне кровли тоннеля  $q_{\rm B}=\gamma_{\rm rp}(h_{\rm B}+h_0)\cdot {\rm tg}^2\bigg(45^\circ-\frac{\phi}{2}\bigg)$ , где  $h_0=\frac{2}{\gamma_{\rm rp}}=\frac{2}{1,5}=1,33$  м , составляет  $q_{\rm B}=0,405q_0$  , и тогда коэффициент  $a_1=\frac{q_{\rm B}}{q_0}=0,405$  . Рассуждая аналогично, находим  $a_2=\frac{q_{\rm H}}{q_0}=\frac{1,12q_0}{q_0}=1,12$  . Полезную нагрузку представим в виде полосовой автомобильной нагрузки  $\nu_{\rm a}=1,1$  т/м . Собственный вес обделки  $q_{\rm c.B.}=14,8$  т/м , а полная вертикальная нагрузка при ширине тоннеля  $b=2d_1=8$  м:

$$q = \left(q_0 + \frac{v_a}{d_1}\right)b + q_{c.b.} = \left(3, 5 + \frac{1,1}{4}\right) \cdot 8 + 14, 8 = 45 \text{ T/M}.$$

Пусть основанием тоннеля служит грунт средней плотности с коэффициентом постели  $k=1\cdot 10^3~{\rm T/m}^3$  , а  $\ell/b=5$  . Тогда  $\ell=5\cdot 8=40~{\rm M}$  .

Р е ш е н и е задачи І. При расчете тоннеля как балки с жестким контуром момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси  $I=26,04~{\rm M}^4$ . Если модуль упругости бетона  $E_6=332\cdot10^4~{\rm T/M}^2$ , то изгибная жесткость балки  $EI_6=8645,3\cdot104~{\rm T\cdot M}^2$ . Тогда параметр податливости основания,  $1/{\rm M}$ ,

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{kb}{4EI_6}} = \sqrt[4]{\frac{1 \cdot 10^3 \cdot 8}{4 \cdot 8645, 3 \cdot 10^4}} = 0,0694,$$

$$\alpha \ell = 2,7474$$
:  $A_1 = -7,464$ ;  $B_1 = -2,248$ ;  $C_1 = 1,443$ ;  $D_1 = 2,579$ .

Из граничных условий имеем:  $y_0 = 0$ ,  $M_0 = 0$ , а  $\phi_0$  и  $Q_0$  определяются из системы уравнений

$$\frac{B_1}{\alpha} \varphi_0 - \frac{4\alpha}{kb} D_1 \cdot Q_0 = -\frac{q}{kb} (1 - A_1),$$

$$\frac{kb}{\alpha^3} D_1 \cdot \varphi_0 + \frac{B_1}{\alpha} \cdot Q_0 = \frac{q}{\alpha^2} \cdot C_1.$$

При 
$$kb = 1 \cdot 10^3 \cdot 8 = 8 \cdot 103 \text{ т/м}^2$$
  
 $\phi_0 = 0.41818 \cdot 10^{-3}$ ;  $Q_0 = 380.652$ .

Тогда

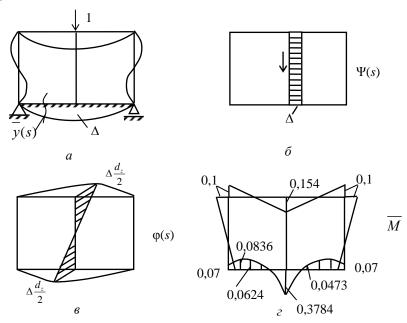
$$y(z) = \frac{\varphi_0}{\alpha} B(\alpha z) - \frac{4\alpha}{kh} Q_0 \cdot D(\alpha z) + \frac{q}{kh} [1 - A(\alpha z)],$$

$$M(z) = \frac{Q_0}{\alpha} \cdot B(\alpha z) + \frac{kb}{\alpha^3} \varphi_0 \cdot D(\alpha z) - \frac{q}{\alpha^2} C(\alpha z).$$

В среднем сечении  $z=\ell/2$ :  $\alpha \cdot \ell/2=1,387$ ; A=0,383; B=1,218; C=0,926; D=0,440;  $y(\ell/2)=50\cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}$ ;  $M(\ell/2)=2432,655\,\mathrm{тm}$ , а нормальное напряжение продольного направления,  $\mathrm{Kr/cm^2}$ ,

$$\sigma_z(\ell/2) = \frac{2432,655 \cdot 10^5}{26,04 \cdot 10^8} \cdot \frac{5,2}{2} \cdot 10^2 = 39,43.$$

Р е ш е н и е задачи II с применением статической аппроксимации автора. Элементарная рама-полоска загружается единичной силой в узле (рис. 5, a) и расчетом, например, методом перемещений с учетом наличия упругого основания, находим величину вертикального смещения средней стенки, м/н ,  $\Delta = 0,2512 \cdot 10^{-3}$ . Тогда ординаты эпюры  $\phi(s)$ , м²/н , получаются равными:  $\Delta \cdot \frac{d_2}{2} = 0,2512 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{5}{2} = 0,628 \cdot 10^{-3}$  , эпюра изгибающих моментов  $\overline{M}$  показана на рис. 5,  $\varepsilon$ .



Значения коэффициентов уравнения (1) будут:

$$a_0 = \delta \int \varphi^2(s) \cdot ds = 0,1315 \cdot 10^{-6} \; ; \; s_0 = \frac{1}{E} \int \frac{\overline{M}^2}{EI_1} ds = 0,255 \cdot 10^{-10} \; ;$$

Рис. 5

 $q_{\Pi} = \int_{0}^{\infty} q(z) \cdot \overline{y}(s) \cdot ds = 3,916 \cdot 10^{-3}$ ; параметр «упругого основания» —  $\beta = 0,08344$ .

При рассматриваемых граничных условиях начальные параметры:

$$\overline{y}_0 = 0$$
;  $\overline{M}_0 = 0$ ;  $\overline{\varphi}_0 = -\frac{q_{II}}{ES_0} \cdot \frac{(1 - A_1)B_1 - 4C_1D_1}{B_1^2 + 4D_1^2}$ ,

$$\overline{Q}_0 = -rac{q_{ ext{II}}}{E s_0} \cdot 4 \cdot rac{\left(1-A_{ ext{I}}
ight)D_{ ext{I}} + B_{ ext{I}}C_{ ext{I}}}{B_{ ext{I}}^2 + 4D_{ ext{I}}^2}$$
, и тогда искомая функция обобщенного

поперечного перемещения

$$V(z) = \overline{\varphi}_0 \cdot B(\beta z) + \overline{Q}_0 \cdot D(\beta z) + \frac{q_{II}}{Es_0} \left[ 1 - A(\beta z) \right].$$

Нормальные напряжения продольного направления:

$$\sigma_z(z,s) = -E \cdot V''(z) \cdot \varphi(s)$$
,

где 
$$V''(z) = 4\beta^2 \left[ \frac{q_{\scriptscriptstyle \Pi}}{Es_{\scriptscriptstyle 0}} C(\beta z) - \overline{\varphi}_{\scriptscriptstyle 0} D(\beta z) + \frac{\overline{Q}_{\scriptscriptstyle 0}}{4} \cdot B(\beta z) \right].$$

В рассматриваемом примере  $\overline{\phi}_0 = 50,235$ ;  $\overline{Q}_0 = -97,8$ ;  $V(\ell/2) = 48,1$ ;  $V''(\ell/2) = 0,24913$ .

Тогда прогиб в середине пролета, м,

$$v(\ell/2) = V(\ell/2)\psi(s) = 48.1 \cdot 0.2512 \cdot 10^{-3} = 120.8 \cdot 10^{-4}$$

а продольное нормальное напряжение

$$\sigma_z \left(\frac{\ell}{2}\right) = 332 \cdot 10^4 \cdot 0,24913 \cdot 0,628 \cdot 10^{-3} = 519,6 \text{ T/M}^2 = 51,96 \text{ KG/cm}^2$$
.

Суммарное нормальное напряжение продольного направления от изгиба оболочки как балки на упругом основании с жестким контуром сечения и от изгиба за счет деформации контура вследствие взаимного смещения стенок:

$$\sigma_z = 39,43 + 51,96 = 91,4 \text{ KG/cm}^2$$
.

Если же рассматриваемую конструкцию обделки тоннеля рассчитать по общепринятой схеме плоской деформации, то продольное нормальное напряжение составит лишь часть поперечного нормального напряжения, численно равную коэффициенту Пуассона:

$$\sigma_z^o = \mu \cdot \sigma_{non}$$
.

Опуская здесь выкладки по элементарному расчету рамы dz = 1 на действие заданной нагрузки, имеем:

$$\sigma_{\text{поп}} = 105.6 \text{ kg/cm}^2$$
,

и тогда  $\sigma_z^{o} = 0.15 \cdot 105, 6 = 15.84 \text{ кг/см}^2$ .

Таким образом, во-первых, действительное продольное нормальное напряжение как результат пространственного расчета  $\sigma_z$  превысило его значение  $\sigma_z^0$ , предсказываемое расчетом по схеме плоской деформации в 5,77 раз,

во-вторых, действительное продольное напряжение составило  $\frac{91,4}{105,6} = 0,866$ 

от поперечного напряжения, определенного расчетом по схеме плоской деформации, с чем, совершенно очевидно, нельзя не считаться при разработке схемы армирования. Существующую схему необходимо менять.

- В заключение отметим преимущества предложенного варианта теории пространственного расчета в сочетании со статической аппроксимацией базисных функций.
- 1. Простота математической стороны задачи: при любом количестве контуров в поперечном сечении оболочки расчет сводится к решению всего одного уравнения, совпадающего с уравнением изгиба балки на упругом основании.
- 2. Возможны любые граничные условия на торцах оболочки, поскольку разрешающее уравнение задачи интегрируется в функциях А.Н. Крылова.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Давыдов С.С. Расчет и проектирование подземных конструкций. М.: Стройиздат, 1950. 376 с.
- 2. Бакиров Р.О., Лой  $\Phi$ .В. Динамический расчет и оптимальное проектирование подземных сооружений. М.: Стройиздат, 2002. 463 с.
- 3. *Соколов О.Л.* О необходимости пространственного расчета тоннельных обделок мелкого заложения // Тезисы VII Международной конференции «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте». СПб, 2008. С. 155—157.
- 4. Соколов О.Л. К теории пространственного расчета обделок тоннелей мелкого заложения // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2008. Вып. 12 (31). С. 20-23.
- 5. *Крылов А.Н.* Расчет балок, лежащих на упругом основании. М. : Изд-во АН СССР, 1931. 136 с.
  - 6. Власов В.З. Тонкостенные пространственные системы. М.: Горстройиздат, 1958. 502 с.
- 7. Расчет тонкостенных пространственных конструкций пластинчатой и пластинчатостержневой структуры / В.А. Игнатьев, О.Л. Соколов, И. Альтенбах, В. Киссинг. М.: Стройиздат, 1996. 560 с.

© Соколов О.Л., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 20011/M 20111 7107: COp.: CTP 20 71 dp.XIII. 2000: B2III. 1 1 (CO)

УДК 624.04

#### А.В. Жиделёв

# РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С НАЛИЧИЕМ НАКЛОННЫХ СВЯЗЕЙ

Предложен численный метод решения системы канонических уравнений расчета плоских геометрически нелинейных стержневых систем с наличием наклонных связей, составленной в динамической постановке задачи по смешанной форме МКЭ в приращениях вектора перемещений. Рассмотрен пример расчета плоской стержневой системы с наличием наклонных связей.

К лючевые слова: МКЭ; динамика; геометрически нелинейные системы; стержень; численный метод.

The author propose the numerical method of approximation computation of the canonical equations system in case of calculation of plane geometric nonlinear rod systems in the presence of slanted ties. The system based on dynamic target setting is written for mixed form of the Finite Element Method using displacement vector increments. The paper gives the results of the solution of the plane geometric nonlinear rod system in the presence of slanted ties.

K e y w o r d s: FEM (Finite Element Method), dynamic, geometric nonlinear systems, rod, numerical method.

Система канонических уравнений смешанного метода расчета геометрически нелинейных стержневых систем в приращениях —

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{m} r_{Z_{1}Z_{j}} \Delta Z_{j} + \sum_{i=1}^{n} r_{Z_{1}X_{i}} \Delta X_{i} + \sum_{j=1}^{m} r_{Z_{1}P_{j}} \Delta P_{j} - \\ -\sum_{j=1}^{m} r_{Z_{1}F_{j}} C_{j,j} \Delta \dot{Z}_{j} - \sum_{j=1}^{m} r_{Z_{1}W_{j}} M_{j,j} \Delta \ddot{Z}_{j} = 0, \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{j=1}^{m} r_{Z_{m}Z_{j}} \Delta Z_{j} + \sum_{i=1}^{n} r_{Z_{m}X_{i}} \Delta X_{i} + \sum_{j=1}^{m} r_{Z_{m}P_{j}} \Delta P_{j} - \\ -\sum_{j=1}^{m} r_{Z_{m}F_{j}} C_{j,j} \Delta \dot{Z}_{j} - \sum_{j=1}^{m} r_{Z_{m}W_{j}} M_{j,j} \Delta \ddot{Z}_{j} = 0, \\ \sum_{j=1}^{m} \delta_{X_{1}Z_{j}} \Delta Z_{j} + \sum_{i=1}^{n} \delta_{X_{1}X_{i}} \Delta X_{i} + \sum_{j=1}^{m} \delta_{X_{1}P_{j}} \Delta P_{j} - \\ -\sum_{j=1}^{m} \delta_{X_{1}K_{j}} C_{j,j} \Delta \dot{Z}_{j} - \sum_{j=1}^{m} \delta_{X_{1}W_{j}} M_{j,j} \Delta \ddot{Z}_{j} = 0, \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{j=1}^{m} \delta_{X_{n}Z_{j}} \Delta Z_{j} + \sum_{i=1}^{n} \delta_{X_{n}X_{i}} \Delta X_{i} + \sum_{j=1}^{m} \delta_{X_{n}P_{j}} \Delta P_{j} - \\ -\sum_{j=1}^{m} \delta_{X_{n}K_{j}} \Delta \dot{Z}_{j} - \sum_{j=1}^{m} \delta_{X_{n}W_{j}} M_{j,j} \Delta \ddot{Z}_{j} = 0, \end{cases}$$

$$(1)$$

или в матричном виде —

$$\begin{bmatrix} r_{ZZ} & r_{ZX} \\ \delta_{XZ} & \delta_{XX} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \delta_{XP} \\ r_{ZP} \end{bmatrix} \{\Delta P\}_k - \\ - \begin{bmatrix} \delta_{XF} \\ r_{ZF} \end{bmatrix} [C] \{\Delta \dot{Z}\}_k - \begin{bmatrix} \delta_{XW} \\ r_{ZW} \end{bmatrix} [M] \{\Delta \ddot{Z}\}_k = 0,$$
(2)

где  $\begin{bmatrix} r_{ZZ} & r_{ZX} \\ \delta_{XZ} & \delta_{XX} \end{bmatrix}$  — матрица откликов систем;  $\begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}_k$  — вектор неизвестных смешанного метода [2].

Система связей в узле k в общем случае может быть расположена в некоторой локальной системе  $X_R 0 Y_R$ , повернутой относительно глобальной системы координат X 0 Y на некоторый угол  $\xi_R^{(k)}$ . В соответствии с рис. 1 связь реакций в глобальной и локальной системах координат в матричной форме имеет вид

$$\begin{cases}
R_{1}^{\Gamma\Pi} \\
R_{2}^{\Gamma\Pi} \\
R_{3}^{\Gamma\Pi}
\end{cases} = \begin{bmatrix}
\cos \xi_{R}^{(k)} & -\sin \xi_{R}^{(k)} & 0 \\
\sin \xi_{R}^{(k)} & \cos \xi_{R}^{(k)} & 0 \\
0 & 0 & 1
\end{bmatrix} \cdot \begin{cases}
R_{1}^{\Pi O K} \\
R_{2}^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R^{\Pi O K} \\
R_{3}^{\Pi O K}
\end{cases} \cdot \begin{cases}
R$$

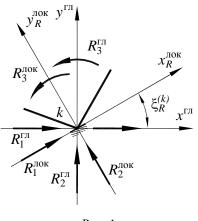


Рис. 1

Выделяют следующие типы связей:

- 1) ортогональные:  $\xi_R^{(k)}(t) = 0$ , матрица  $[A_R]$  вырождается в единичную;
- 2) наклонные:  $\xi_R^{(k)}(t) = {\rm const} \neq 0$ , матрица  $\left[A_R\right]$  остается постоянной на всем рассматриваемом интервале;
- 3) следящие:  $\xi_R^{(k)}(t) = \xi_R^{(k)}(Z(t))$ , матрица  $[A_R]$  меняется на каждом шаге расчета; в частности, в ограничителях реакция направлена перпендикулярно оси стержня.

При наличии в расчетной схеме наклонных связей следует рассматривать перемещения точек системы не в глобальной системе координат, а в локальных, связанных с направлениями опорных связей. Неизвестные, входящие в систему (1), можно разделить на 2 группы. Первую группу образуют внутренние усилия  $\left\{\Delta X\right\}_k$  и внешняя нагрузка  $\left\{\Delta P^{\text{гл}}\right\}_k$ , не зависящие от топологии связей системы. Неизвестные  $\left\{\Delta Z^{\text{лок}}\right\}_k$ ,  $\left\{\Delta \dot{Z}^{\text{лок}}\right\}_k$ , образуют вторую группу и представляют собой векторы, составленные в локальных системах координат опорных связей.

Для локальных параметров  $\left\{\Delta Z^{\text{лок}}\right\}_k$ ,  $\left\{\Delta \dot{Z}^{\text{лок}}\right\}_k$ ,  $\left\{\Delta \ddot{Z}^{\text{лок}}\right\}_k$  необходимо выполнить переход в глобальную систему координат, т.е.

$$\{\Delta_{X\Psi}\} = [\delta_{X\Psi}][A_R] \{\Delta\Psi^{\text{nok}}\}_k. \tag{4}$$

Верхняя часть системы (1) представляет собой сумму реакций  $\left\{R_{Z\Psi}^{\text{лок}}\right\}$  по направлению связей в локальных координатах. Реакции от неизвестных  $\left\{\Delta \dot{Z}^{\text{лок}}\right\}_k$ ,  $\left\{\Delta \ddot{Z}^{\text{лок}}\right\}_k$  равны:

$$\left\{ R_{Z\Psi}^{\text{лок}} \right\} = \left[ r_{Z\Psi} \right] \left\{ \Delta \Psi^{\text{лок}} \right\}_{k}. \tag{5}$$

Для параметров  $\{\Delta X\}_k$  и  $\{\Delta P^{\text{гл}}\}_k$  необходимо полученные в глобальной системе координат реакции преобразовать в локальные, т.е.

$$\left\{ R_{Z\Psi}^{\text{mok}} \right\} = \left[ A_R \right]^{-1} \cdot \left[ r_{Z\Psi} \right] \cdot \left\{ \Delta \Psi^{\text{ff}} \right\}_{L}. \tag{6}$$

Матрицы  $[\delta_{X\Psi}]$  и  $[r_{Z\Psi}]$ , входящие в выражения (4), (5), соответствуют рассмотренным в пп. 5.4.1, 5.4.2 [1] конечным элементам с ортогональными связями.

С учетом (4), (5) система канонических уравнений расчета стержневых ГНС с наличием наклонных связей примет вид

$$\begin{cases}
\left[\delta_{XX}\right]\left\{\Delta X\right\}_{k} + \left[\delta_{XZ\Psi}\right]\left[A_{R}\right]\left\{\Delta Z^{\Pi O K}\right\}_{k} + \left[\delta_{XP}\right]\left\{\Delta P^{\Gamma \Pi}\right\}_{k} - \\
-\left[\delta_{XP}\right]\left[C\right]\left[A_{R}\right]\left\{\Delta \dot{Z}^{\Pi O K}\right\}_{k} - \left[\delta_{XP}\right]\left[M\right]\left[A_{R}\right]\left\{\Delta \ddot{Z}^{\Pi O K}\right\}_{k} = 0, \\
-\left[A_{R}\right]^{-1}\left[\delta_{XZ\Psi}\right]^{T}\left\{\Delta X\right\}_{k} - \left[A_{R}\right]^{-1}\left\{\Delta P^{\Gamma \Pi}\right\}_{k} + \left[C\right]\left\{\Delta \dot{Z}^{\Pi O K}\right\}_{k} + \\
+\left[M\right]\left\{\Delta \ddot{Z}^{\Pi O K}\right\}_{k} = 0.
\end{cases} (7)$$

Выражая из первого уравнения (7) вектор  $\{\Delta X\}_k$ , подставляя результат во второе уравнение, после преобразований получаем

$$[A_1] \{ \Delta Z^{\text{лок}} \}_{L} - [A_2] [C] \{ \Delta \dot{Z}^{\text{лок}} \}_{L} + [A_3] \{ \Delta P^{\text{гл}} \}_{L} = [A_2] [M] \{ \Delta \ddot{Z}^{\text{лок}} \}_{L},$$
 (8)

где

$$[A_{1}] = [A_{R}]^{-1} [\delta_{XZ\Psi}]^{T} [\delta_{XX}]^{-1} [\delta_{XZ\Psi}] [A_{R}],$$

$$[A_{2}] = [A_{R}]^{-1} [\delta_{XZ\Psi}]^{T} [\delta_{XX}]^{-1} [\delta_{XP}] [A_{R}] - [E],$$

$$[A_{3}] = [A_{R}]^{-1} ([\delta_{XZ\Psi}]^{T} [\delta_{XX}]^{-1} [\delta_{XP}] - [E]).$$
(9)

Выразим приращения векторов  $\left\{\Delta \dot{Z}^{\text{лок}}\right\}_k$  и  $\left\{\Delta \ddot{Z}^{\text{лок}}\right\}_k$  через вектор приращений перемещений  $\left\{\Delta Z^{\text{лок}}\right\}_k$ :

$$\begin{cases}
\left\{\Delta \dot{Z}^{\text{лок}}\right\}_{k} = \frac{3}{\Delta t_{k}} \left\{\Delta Z^{\text{лок}}\right\}_{k} - 3\left\{\dot{Z}^{\text{лок}}\right\}_{k} - \frac{\Delta t_{k}}{2} \left\{\ddot{Z}^{\text{лок}}\right\}_{k}, \\
\left\{\Delta \ddot{Z}^{\text{лок}}\right\}_{k} = \frac{6}{\Delta t_{k}^{2}} \left\{\Delta Z^{\text{лок}}\right\}_{k} - \frac{6}{\Delta t_{k}} \left\{\dot{Z}^{\text{лок}}\right\}_{k} - 3\left\{\ddot{Z}^{\text{лок}}\right\}_{k}.
\end{cases} (10)$$

Подставляя (10) в (8), приводим дифференциальное уравнение динамического равновесия к алгебраическому виду относительно вектора приращений перемещений  $\left\{\Delta Z^{\text{лок}}\right\}_{L}$ :

$$\left\{\Delta Z^{\text{\tiny JOK}}\right\}_k = \left[D\right]^{-1} \left\{D_P\right\},\tag{11}$$

гле

$$[D] = [A_2] \left( \frac{3}{\Delta t_k} [C] + \frac{6}{\Delta t_k^2} [M] \right) - [A_1],$$

$$\{D_P\} = [A_2] \left( \left( 3[C] + \frac{6}{\Delta t_k} [M] \right) \left\{ \dot{Z}^{\text{nok}} \right\}_k + \left( \frac{\Delta t_k}{2} [C] + 3[M] \right) \left\{ \ddot{Z}^{\text{nok}} \right\}_k \right) + [A_3] \left\{ \Delta P^{\text{гл}} \right\}_k.$$

$$(12)$$

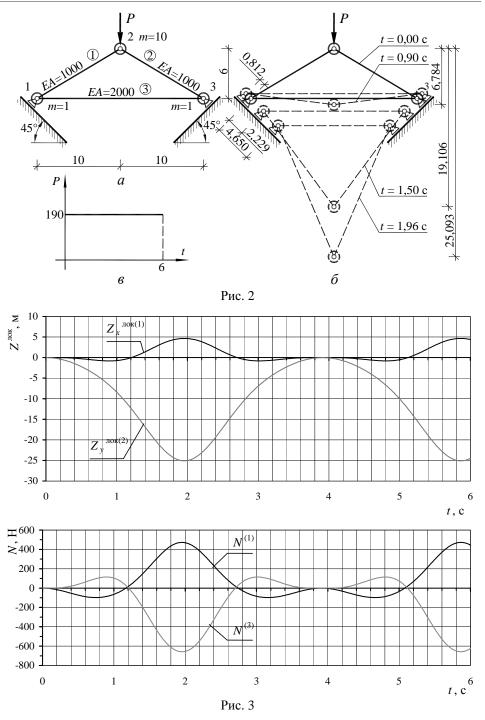
Переход к глобальным векторам:

$$\begin{cases}
\left\{Z^{\text{TI}}\right\}_{k+1} = \left[A_R\right] \left\{Z^{\text{TOK}}\right\}_{k+1}, \\
\left\{\dot{Z}^{\text{TII}}\right\}_{k+1} = \left[A_R\right] \left\{\dot{Z}^{\text{TOK}}\right\}_{k+1}, \\
\left\{\ddot{Z}^{\text{TII}}\right\}_{k+1} = \left[A_R\right] \left\{\ddot{Z}^{\text{TOK}}\right\}_{k+1}.
\end{cases} (13)$$

 $\Pi$  р и м е р. Выполнить расчет фермы, имеющей наклонные связи. Исходные данные приведены на рис. 2, a, s. Шаг интегрирования принят по результатам пробных решений  $\Delta t = 0.01$  с.

Под действием нагрузки узел 2 начинает двигаться вниз, а узлы 1 и 3 — вверх по наклонной плоскости и в момент времени t=0,90 с имеют максимальное перемещение  $Z_x^{\text{лок}(1;3)}=0,812$ , после чего двигаются вниз. В момент времени t=1,96 с узел 2 имеет максимальное вертикальное перемещение  $Z_y^{\text{лок}(2)}=25,093$ , при этом перемещения опор 1 и 3 составляют  $Z_x^{\text{лок}(1;3)}=4,650$ .

Деформированные схемы конструкции в моменты времени t=0,90;~1,50;~1,96 с приведены на рис. 2,  $\delta$ ; на рис. 3 представлены графики  $Z_x^{\text{лок}(1)},~Z_y^{\text{лок}(2)},~N^{(1)},~N^{(3)}$  от t .



# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Игнатьев А.В.*, *Жиделёв А.В.* Смешанная форма метода конечных элементов в задачах строительной механики. Волгоград : ВолгГАСУ, 2006. 172 с.
- 2. *Игнатьев В.А.*, *Жиделёв А.В.* Смешанная форма МКЭ в расчетах геометрически нелинейных стержневых систем // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2001. Вып. 1 (4). С. 47—54.

Поступила в редакцию 19.03.09

© Жиделёв А.В., 2009

УДК 624.074.5

#### А.В. Игнатьев, В.В. Габова

# АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ОТКЛИКОВ ПЛОСКОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ

Приведен алгоритм, позволяющий производить формирование глобальной матрицы откликов плоских стержневых систем с минимальными затратами памяти и машинного времени.

K л ю ч е в ы е с л о в а: матрица откликов конечного элемента; смешанная форма метода конечных элементов; плоские стержневые системы.

A new and efficient algorithm is proposed for assembling the global response matrix of 2-D framed systems that allows to minimize the computational effort and to reduce the data storage requirements.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : response matrix of the finite element; mixed form of the finite element method; 2-D framed systems

Одной из важных задач, возникающих при расчете конструкций по методу конечных элементов в смешанной форме, является проблема формирования коэффициентов системы алгебраических уравнений для всей конструкции или глобальной матрицы откликов.

Идеализированная схема конструкции состоит из большого числа конечных элементов, соединенных в узлах связями. Число неизвестных в узлах зависит от типа решаемой задачи, для стержневых систем оно равно от одного до трех. Соответственно общее число неизвестных становится достаточно большим, от нескольких десятков до нескольких тысяч уравнений, в зависимости от сложности решаемой задачи.

Из всего вышесказанного видно, что формирование глобальной матрицы откликов должно быть автоматизировано. Тем более что сам МКЭ удовлетворяет специфике ЭВМ, связанной с дискретностью счета. При всем этом весьма существен способ автоматизации, так как от него зависит вид, объем и сложность исходных данных, а также затраты машинного времени, т.е. все те условия, которые являются основополагающими для эффективного использования ЭВМ.

По аналогии с формированием глобальной матрицы жесткости [1] может быть сформирована и глобальная матрица откликов [2].

При таком подходе сначала формируются локальные матрицы откликов каждого конечного элемента в местной системе координат, затем осуществляется преобразование в глобальную систему координат, после чего происходит сборка глобальной матрицы откликов с использованием формулы

$$D = \sum_{i=1}^{n} h_i^T d_i h_i \,, \tag{1}$$

где n — количество КЭ в системе;  $d_i$  — матрица откликов i-го элемента;  $h_i$  — матрица связи неизвестных i-го элемента с неизвестными других КЭ системы.

Матрица  $h_i$  состоит из нулей и единиц и имеет число столбцов, равное общему количеству неизвестных всей системы, и число строк, равное числу неизвестных в основной системе. Матрица откликов отдельного элемента

 $h_i^T d_i h_i$ , фигурирующая в формуле (1), представляет собой расширенную матрицу, имеющую размерность системы и содержащую большое количество нулевых элементов. Поэтому использование процедуры (1) при численной реализации смешанной формы МКЭ неэффективно.

Возможен вариант поблочного формирования глобальной матрицы откликов, при котором достаточно сформировать только матрицы  $[\delta]$  и  $[\tilde{r}]$ , т.к. матрица [r] — квадратная нулевая матрица с числом столбцов и строк, равным количеству связей основной системы, а  $[\tilde{\delta}] = -[\tilde{r}]^T$ .

В этом случае подматрица [δ] формируется по формуле

$$\delta = \sum_{i=1}^{n} f_i^T \delta_i f_i \,, \tag{2}$$

где n — количество КЭ в системе;  $[\delta_i]$  — подматрица  $[\delta]$  i-го элемента;  $[f_i]$  — матрица связи неизвестных усилий i-го элемента с неизвестными усилиями других КЭ системы. Она имеет число строк, равное числу неизвестных усилий в основной системе КЭ, и число столбцов, равное общему количеству неизвестных усилий во всей системе.

Подматрица  $\tilde{r}$  формируется по формуле

$$\tilde{r} = \sum_{i=1}^{n} f_i^T \tilde{r}_i s_i , \qquad (3)$$

где n — количество КЭ в системе;  $[\widetilde{r_i}]$  — блок  $[\widetilde{r}]$  i-го элемента;  $[s_i]$  — матрица связи неизвестных перемещений i-го элемента с неизвестными перемещениями других КЭ системы. Она имеет число строк, равное числу неизвестных перемещений в основной системе КЭ, и число столбцов, равное общему количеству неизвестных усилий во всей системе.

В этом случае подматрицы  $f_i^T \delta_i f_i$  и  $f_i^T \widetilde{r}_i s$  отдельных конечных элементов имеют размерность соответствующих подматриц всей системы. Это позволяет сделать вывод о том, что данный подход лишь немногим эффективнее использования процедуры (1). Кроме того, как при формировании глобальной матрицы откликов, так и при ее поблочном формировании необходимо хранить локальные матрицы для каждого элемента, что связано с большим расходом памяти.

На основании вышесказанного возникает вопрос о возможности формирования глобальной матрицы откликов без матричных перемножений, путем прямого построения блоков глобальной матрицы откликов. В этом случае элементы матрицы откликов конечного элемента размещаются непосредственно в соответствующий блок глобальной матрицы откликов. Для выполнения этой процедуры необходимо применять индексные матрицы, аналогичные индексной матрице, используемой для формирования матрицы жесткости в МКЭ в форме метода перемещений [3; 4].

Матрицы индексов позволяют установить, как элементы связаны друг с другом. Под набором индексов данного элемента понимаем глобальные номера неизвестных элемента, выписанные в порядке возрастания их локальных

номеров. Глобальные номера неизвестных определяются порядком следования их глобальных координат в соответствующем информационном массиве.

Для формирования глобальной матрицы откликов систем необходимо использовать индексную матрицу соответствия неизвестных локальных перемещений глобальным [S], имеющую число строк, равное числу конечных элементов системы, и число столбцов, равное количеству неизвестных перемещений в основной системе  $K\mathfrak{I}$ , и матрицу соответствия неизвестных локальных усилий глобальным [W], для которой число строк равно числу конечных элементов системы, а число столбцов равно количеству неизвестных усилий в  $K\mathfrak{I}$ .

Рассмотрим пример разбиения плоской стержневой системы (рис. 1, a) на четыре конечных элемента (рис.  $1, \delta$ ).

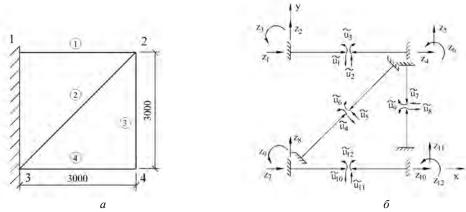


Рис. 1. Пример дискретизации

Соответствующая матрица соответствия неизвестных локальных перемещений глобальным [S] для формирования глобальной матрицы откликов СФ МКЭ имеет вид

|     |   |   | Перем | ещения  |    |    |
|-----|---|---|-------|---------|----|----|
| №КЭ | 1 | 2 | 3     | 4       | 5  | 6  |
|     |   |   | V     | Індексы |    |    |
| 1   | 1 | 2 | 3     | 4       | 5  | 6  |
| 2   | 4 | 5 | 6     | 7       | 8  | 9  |
| 3   | 4 | 5 | 6     | 10      | 11 | 12 |
| 4   | 7 | 8 | 9     | 10      | 11 | 12 |

а матрица соответствия неизвестных локальных усилий глобальным [W] —

|     |    | Усилия |    |
|-----|----|--------|----|
| №КЭ | 1  | 2      | 3  |
|     |    | Индекс | ы  |
| 1   | 1  | 2      | 3  |
| 2   | 4  | 5      | 6  |
| 3   | 7  | 8      | 9  |
| 4   | 10 | 11     | 12 |

При помощи индексных матриц можно указать непосредственные адреса в блоках глобальной матрицы откликов, куда нужно заслать и там просуммировать элементы, выбранные из соответствующих подматриц откликов для КЭ основной системы. При этом формирование блока  $[\delta]$  происходит аналогично формированию глобальной матрицы жесткости для метода перемещений. В этом случае используется индексная матрица [W].

Для формирования блока  $[\tilde{r}]$  необходимо использовать обе индексные матрицы. Рассмотрим подробнее алгоритм его формирования.

Блок  $\left[\widetilde{r}\right]$  глобальной матрицы откликов будет иметь размерность  $n \times m$ , где m — число неизвестных перемещений в системе, а n — число неизвестных усилий.

Алгоритм формирования блока  $[\tilde{r}]$  состоит в том, что необходимо попарно перебрать все индексы для данного элемента, причем первый индекс берется из матрицы [S], а второй из матрицы [W]. Пара локальных номеров дают адрес (строку и столбец) числа, которое должно быть выбрано из блока локальной матрицы, а пара глобальных индексов дает адрес, по которому должен быть просуммирован выбранный коэффициент.

Предложенный алгоритм реализован в среде Scilab и позволяет эффективно формировать глобальные матрицы откликов плоских стержневых систем.

Вышеизложенный алгоритм может быть обобщен для формирования матриц откликов пространственных стержневых систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- $1.\,$  Аргирис Дж. Современные достижения в методах расчета конструкций с применением матриц. М. : ИЛ, 1968. 240 с.
- 2. Игнатьев А.В., Габова В.В. Алгоритм статического расчета плоских стержневых систем по методу конечных элементов в смешанной форме // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2007. Вып. 6 (23). С. 72—77.
- 3. *Постнов В.А., Хархурим И.Я.* Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 344 с.
- 4. *Морозов Е.М.*, *Никишников Г.П.* Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 256 с.

© Игнатьев А.В., Габова В.В., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 УДК 624.074.5

#### В.В. Габова, А.В. Игнатьев

## ПОЛУЧЕНИЕ МАТРИЦЫ ОТКЛИКОВ СТЕРЖНЕВОГО КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ПЛОСКОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СМЕШАННОГО ВАРИАЦИОННОГО ПРИНЦИПА

Приведен алгоритм построения матрицы откликов конечного элемента на основе смешанного вариационного принципа, позволяющий получать матрицы откликов как для плоских, так и для пространственных стержневых систем. Предложена матрица откликов плоской стержневой системы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: матрица откликов конечного элемента; смешанная форма метода конечных элементов; плоские стержневые системы.

An algorithm based on a mixed variational principle is proposed for generation of response matrices of 2-D and 3-D framed structures. A response matrix for a 2-D structure is presented in the article.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : response matrix of the finite element; mixed form of the finite element method; 2-D framed systems

Предположим, что для заданной линейно-деформируемой стержневой системы (или дискретной расчетной схемы МКЭ) основная система смешанного метода получена путем удаления части имеющихся внешних и внутренних связей и введения дополнительных связей.

За неизвестные примем перемещения по направлению введенных связей  $u_i$  (i=1,...,m) и усилия в удаленных связях  $\tilde{u}_i$  (j=1,...,n).

Составим для основной системы смешанного метода выражение для полной потенциальной энергии.

Полной потенциальной энергией упругой системы называется работа, которую совершают силы системы, как внешние, так и внутренние, при переводе ее из деформированного состояния в нормальное недеформированное.

$$\Pi = U + T \,. \tag{1}$$

Здесь U — потенциальная энергия внутренних сил (полная потенциальная энергия деформации системы); T — потенциальная энергия внешних сил.

Потенциальная энергия внутренних сил, линейно зависимых от деформаций, всегда положительна и равна взятой с обратным знаком работе внутренних сил W, отрицательной по физическому смыслу.

Для стержневых систем она может быть определена с помощью интеграла Мора

$$U = -W = \frac{1}{2} \left[ \sum_{t} \int_{0}^{l_{t}} \frac{M_{t}^{2} dx}{E_{t} J_{t}} + \sum_{t} \int_{0}^{l_{t}} \frac{N_{t}^{2} dx}{E_{t} F_{t}} + \sum_{t} \int_{0}^{l_{t}} \eta_{t} \frac{Q_{t}^{2} dx}{G_{t} F_{t}} \right], \tag{2}$$

где суммирование выполняется по всем t стержням системы;  $E_t$  — модуль упругости 1-го рода для материала t-го стержня;  $G_t$  — модуль упругости 2-го рода для материала t-го стержня;  $J_t$  — момент инерции t-го стержня;  $F_t$  — площадь поперечного сечения t-го стержня.

Потенциальная энергия внешних сил всегда отрицательна и определяется как полная величина произведения силы на путь по ее направлению

$$T = -\sum_{k} P_k \Delta_k \ . \tag{3}$$

Если заменить наложенные на систему связи возникающими в них реакциями, то равновесие системы не нарушится. Тогда реакции в этих связях должны быть включены в число внешних сил. Точно также внешними по отношению к системе являются и силовые неизвестные (усилия взаимодействия между элементами основной системы).

Тогда для дискретной линейно-деформируемой системы потенциальная энергия ее деформации может быть представлена как работа реакций в связях основной системы на перемещениях по своим направлениям

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i} R_{i} u_{i} \quad (i = 1, ..., m).$$
 (4)

Потенциальная энергия внешних сил может быть представлена, в соответствии с формулой (3), как сумма произведений силовых неизвестных и нагрузок в основной системе на перемещения по своим направлениям

$$T = \sum_{j} \tilde{u}_{j} \Delta_{j} - \sum_{k} P_{k} \Delta_{k} \quad (j = 1, ..., n).$$

$$(5)$$

Таким образом, смешанный функционал  $\Pi$  полной потенциальной энергии системы является конечномерной функцией обобщенных неизвестных  $u_i$ ,  $\widetilde{u}_i$  и нагрузки P

$$\Pi = \Pi(u_1, u_2, ..., u_m, \tilde{u}_1, \tilde{u}_2, ..., \tilde{u}_n, P).$$
(6)

Условие стационарности значения полной потенциальной энергии системы, соответствующей ее равновесному состоянию,

$$\delta\Pi = \frac{\partial\Pi}{\partial u_1}\delta u_1 + \dots + \frac{\partial\Pi}{\partial u_m}\delta u_m + \frac{\partial\Pi}{\partial\tilde{u}_1}\delta\tilde{u}_1 + \dots + \frac{\partial\Pi}{\partial\tilde{u}_m}\delta\tilde{u}_n = 0$$
 (7)

может быть выполнено только тогда, когда каждое из слагаемых в (7) равно нулю, т.е.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u_1} \delta u_1 = 0; \dots \frac{\partial \Pi}{\partial u_m} \delta u_m = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \tilde{u}_1} \delta \tilde{u}_1 = 0; \dots \frac{\partial \Pi}{\partial \tilde{u}_n} \delta \tilde{u}_n = 0.$$
 (8)

На основании принципа независимости действия сил (принципа суперпозиции) для линейно деформируемых систем можно записать следующие условия равновесия и неразрывности деформаций

$$R_{i} = \sum_{k=1}^{m} r_{i,k} u_{k} + \sum_{s=1}^{n} \tilde{r}_{i,s} \tilde{u}_{s} + R_{i}^{(P)} = 0 \quad (i = 1, ..., m),$$

$$\Delta_{j} = \sum_{k=1}^{m} \tilde{\delta}_{j,k} u_{k} + \sum_{s=1}^{n} \delta_{j,s} \tilde{u}_{s} + \Delta_{j}^{(P)} = 0 \quad (j = 1, ..., n).$$
(9)

Здесь  $R_i$  — реакции во веденных связях;  $\Delta_j$  — перемещения по направлению удаленных связей;  $r_{i,k}$  — реакция во введенной связи i основной системы от единичного смещения введенной связи k;  $\tilde{r}_{i,s}$  — реакция во введенной связи i основной системы от единичного силового неизвестного  $\tilde{u}_s = 1$ ;

 $ilde{\delta}_{j,k}$  — перемещение в основной системе по направлению удаленной связи jот единичного смещения  $u_k=1$  введенной связи  $k;\ \delta_{j,s}$  — перемещение в основной системе по направлению удаленной связи j от единичного силового неизвестного  $\tilde{u}_s=1$ ;  $R_i^{(P)}$  — реакция во введенной связи i основной системы от действия нагрузки;  $\Delta_i^{(P)}$  — перемещение в основной системе по направлению удаленной связи і от действия нагрузки.

Подставив в равенства (8) выражения для  $\Pi, U, T$  в соответствии с (4), (5) и выполнив дифференцирование, получим после преобразований систему алгебраических уравнений (9), называемую системой канонических уравнений смешанного метода

$$[D] \begin{Bmatrix} u \\ \widetilde{u} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R_P \\ \Delta_P \end{Bmatrix} = \{0\},$$
 (10)

где 
$$[D] = \begin{bmatrix} r & \tilde{r} \\ \tilde{\delta} & \delta \end{bmatrix}$$
 — матрица откликов дискретной системы; 
$$[r] = \begin{bmatrix} r_{1,1} & \dots & r_{1,m} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{m,1} & \dots & r_{m,m} \end{bmatrix}$$
 — подматрица реакций во введенных кинематических

связях основной системы смешанного метода от единичных смещений этих

связей (подматрица жесткости); 
$$[\widetilde{r}] = \begin{bmatrix} \widetilde{r}_{1,1} & \dots & \widetilde{r}_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \widetilde{r}_{m,1} & \dots & \widetilde{r}_{m,n} \end{bmatrix}$$
 — подматрица реакций

во введенных связях основной системы смешанного метода от единичных

$$[\tilde{\delta}] = \begin{bmatrix} \tilde{\delta}_{1,1} & \dots & \tilde{\delta}_{1,m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \tilde{\delta}_{n,1} & \dots & \tilde{\delta}_{n,m} \end{bmatrix} = -[\tilde{r}]^T \quad \text{— подматрица перемещений по направлению}$$

силовых неизвестных от единичных смещений введенных кинематических

связей; 
$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_{1,1} & \dots & \delta_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \delta_{n,1} & \dots & \delta_{n,n} \end{bmatrix}$$
 — подматрица перемещений по направлению

силовых неизвестных при единичных значениях этих неизвестных (подматрица податливости);  ${R_P \brace \Delta_P}$  — вектор воздействий на систему;  $\{R_P\}$  — подвектор

реакций во введенных связях от нагрузки в основной системе;  $\{\Delta_P\}$  — подвектор перемещений по направлению силовых неизвестных от нагрузки в основной системе;  $\binom{u}{\pi}$  — вектор неизвестных смешанного метода;  $\{u\}$  — подвек-

тор неизвестных перемещений;  $\{\widetilde{u}\}$  — подвектор неизвестных усилий.

Рассмотрим получение матрицы откликов для стержневого конечного элемента, изображенного на рис. 1. Основная система смешанного метода для него показана на рис. 2.

Для КЭ 1-го типа введем следующие обозначения неизвестных:  $u_1, ..., u_6$  — перемещения по направлению соответствующих реакций  $z_1, ..., z_6$ ;  $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3$  — неизвестные усилия в удаленных связях основной системы.



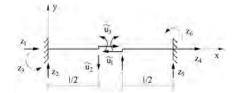


Рис. 1. Стержневой конечный

Рис. 2. Основная система смешанной элемент плоской стержневой систе- формы метода конечных элементов для стержневого конечного элемента

В данном случае потенциальная энергия деформации КЭ (стержня)

$$U = \frac{1}{2} \left[ \int_{0}^{\frac{l}{2}} \frac{\left(\tilde{u}_{3} - \tilde{u}_{2}x\right)^{2} dx}{EJ} + \int_{0}^{\frac{l}{2}} \frac{\left(\tilde{u}_{3} + \tilde{u}_{2}x\right)^{2} dx}{EJ} + \frac{\tilde{u}_{1}^{2}l}{EF} + \eta \frac{\tilde{u}_{2}^{2}l}{GF} \right]. \tag{11}$$

После преобразований получим

$$U = \frac{1}{2} \left[ \frac{\tilde{u}_1^2 l}{EF} + \tilde{u}_2^2 \left( \eta \frac{l}{GF} + \frac{l^3}{12EJ} \right) + \tilde{u}_3^2 \frac{l}{EJ} \right]. \tag{12}$$

Принимая основные силовые неизвестные за внешние силы, находим в соответствии с (5)

$$T = \tilde{u}_1 u_1 - \tilde{u}_1 u_4 - \tilde{u}_2 u_2 - \tilde{u}_2 u_3 \frac{l}{2} + \tilde{u}_2 u_5 - \tilde{u}_2 u_6 \frac{l}{2} + \tilde{u}_3 u_3 - \tilde{u}_3 u_6.$$
 (13)

Окончательно получаем

$$\Pi = U + T = \frac{1}{2} \left[ \frac{\tilde{u}_{1}^{2}l}{EF} + \tilde{u}_{2}^{2} \left( \eta \frac{l}{GF} + \frac{l^{3}}{12EJ} \right) + \tilde{u}_{3}^{2} \frac{l}{EJ} \right] + 
+ \tilde{u}_{1}(u_{1} - u_{4}) - \tilde{u}_{2} \left[ (u_{2} - u_{5}) + (u_{3} + u_{6}) \frac{l}{2} \right] + \tilde{u}_{3}(u_{3} - u_{6}).$$
(14)

Взяв частные производные от  $\Pi$  в соответствии с (8) и учтя, что все частные производные по обобщенным перемещениям  $\frac{\partial \Pi}{\partial u_i} = R_i$ , а по обобщенным

силам  $\frac{\partial \Pi}{\partial \widetilde{u}} = \Delta_j$ , в соответствии с теоремой о взаимности реакций и переме-

щений частные производные по  $u_i$  должны браться со знаком минус, получим систему канонических уравнений смешанного метода для рассматриваемого КЭ (без грузовых коэффициентов, которые в данном случае отсутствуют).

$$\begin{split} &-\frac{\partial \Pi}{\partial u_1} = -\widetilde{u}_1 = 0 \; ; \; -\frac{\partial \Pi}{\partial u_2} = \widetilde{u}_2 = 0 \; ; \; -\frac{\partial \Pi}{\partial u_3} = \widetilde{u}_2 \frac{l}{2} - \widetilde{u}_3 = 0 \; ; \\ &-\frac{\partial \Pi}{\partial u_4} = \widetilde{u}_1 = 0 \; ; \; -\frac{\partial \Pi}{\partial u_5} = -\widetilde{u}_2 = 0 \; ; \; -\frac{\partial \Pi}{\partial u_6} = \widetilde{u}_2 \frac{l}{2} + \widetilde{u}_3 = 0 \; ; \\ &\frac{\partial \Pi}{\partial \widetilde{u}_1} = \widetilde{u}_1 \frac{l}{EF} + u_1 - u_4 = 0 \; ; \\ &\frac{\partial \Pi}{\partial \widetilde{u}_2} = \widetilde{u}_2 \left( \eta \frac{l}{GF} + \frac{l^3}{12EJ} \right) - u_2 - u_3 \frac{l}{2} + u_5 - u_6 \frac{l}{2} = 0 \; ; \\ &\frac{\partial \Pi}{\partial \widetilde{u}_2} = \widetilde{u}_3 \frac{l}{EJ} + u_3 - u_6 = 0 \; . \end{split}$$

Соответственно ненулевые блоки матрицы откликов рассматриваемого стержневого конечного элемента имеют вид

$$\begin{bmatrix} \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l}{EF} & 0 & 0 \\ 0 & \eta \frac{l}{GF} + \frac{l^3}{12EJ} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{EJ} \end{bmatrix};$$

$$[\tilde{\delta}] = -[\tilde{r}]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -\frac{l}{2} & 0 & 1 & -\frac{l}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

$$(15)$$

Все элементы полученной матрицы откликов полностью совпадают с элементами матрицы откликов, полученной в [1] непосредственно из условий неразрывности, статических и кинематических условий, что позволяет говорить о корректности предложенного алгоритма.

Вышеизложенный алгоритм может быть использован для получения матрицы откликов стержневого конечного элемента для пространственных стержневых систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Игнатьев В.А., Игнатьев А. В., Жиделёв А.В. Смешанная форма метода конечных элементов в задачах строительной механики. Волгоград : Волг $\Gamma$ ACV, 2006. 172 с.

© Габова В.В., Игнатьев А.В., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 62 408.8:006.354

#### А.В. Кочетков, А.В. Чванов, С.П. Аржанухина

### НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ НОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Предлагаются новые методы нормирования шероховатых поверхностей дорожных покрытий на основе ГОСТ 2789—73.

Ключевые слова: шероховатость поверхностей; дорожные покрытия.

New methods of normalization of rough surfaces of road coverings on the basis of GOST 2789—73 are offered.

Key words: rough surfaces, road coverings.

Изучение триботехнических параметров и их связи с шероховатостью на протяжении длительного периода происходило во многих областях науки и техники без учета полученных другими исследователями теоретических и практических результатов. Проблема изучается в основном в узких направлениях, однако с семидесятых годов прошлого века серьезных обобщений не проводилось. В других областях, например, при нормировании коэффициента сцепления и шероховатости в дорожном хозяйстве, эти результаты не использовались.

Способы оценки шероховатости поверхностей могут быть разделены на две группы: позволяющие получить расчетом численный показатель степени шероховатости и позволяющие оценивать шероховатость поверхности в виде некоторого суммарного (интегрального) численного показателя, находящегося в закономерной зависимости от шероховатости (использование трения, отсвечивания и т.д.). Например, может быть применен способ оценки шероховатости по величине угла, при котором поверхность не рассеивает падающий на нее свет, а отражает его равномерно (при изношенной поверхности).

С 1945 г. для оценки шероховатых поверхностей использовался ГОСТ 2789—45, в котором в качестве показателя чистоты (шероховатости) поверхности применялось среднеквадратическое отклонение ее неровностей. С 1959 г. в СССР действовала стандартная оценка шероховатости поверхности по ГОСТ 2789—59. Для оценки геометрии поверхности установлены были два параметра: среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  — среднее значение расстояний точек измеряемого профиля от его средней линии и вы-

сота неровностей  $R_z$  — среднее расстояние между находившимися в пределах базовой длины (длина участка поверхности, выбираемая для измерения поверхности) пятью высшими и пятью низшими точками впадин, измеренное от линии, параллельной средней линии.

ГОСТ 2789—73 [1] распространяется на шероховатость поверхности изделий независимо от их материала и способов изготовления или получения поверхности и, соответственно, распространяется на устройство дорожных покрытий с шероховатой поверхностью. Стандарт устанавливает перечень параметров и типов направлений неровностей, которые должны применяться при установлении требований и контроле шероховатости поверхности, числовые значения параметров и общие указания по установлению требований к шероховатости поверхности.

Требования по шероховатости устанавливаются исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества путем указания параметра шероховатости (одного или нескольких) и базовых длин, на которых происходит определение параметров. При необходимости устанавливаются требования к направлению неровностей поверхности, к способу или последовательности способов получения поверхности. Для номинальных числовых значений параметров шероховатости должны устанавливаться предельные отклонения, которые выбираются из ряда 10, 20, 40 в процентах от номинальных. Требования к шероховатости поверхности отдельных участков могут быть различными. В качестве параметров шероховатости выбираются среднее арифметическое отклонение профиля, высота неровностей по десяти точкам, наибольшая высота профиля, средний шаг неровностей, средний шаг местных выступов профиля, относительная опорная длина профиля. К основным типам направлений неровностей относятся: параллельное, перпендикулярное, перекрещивающееся, произвольное, кругообразное, радиальное.

Исследованиями [2] показано, что реально влияющими на триботехнику из параметров существующего ГОСТ 2789—73 являются средний шаг неровностей и средний шаг местных выступов профиля. Остальные параметры отвечают за распределение рабочей жидкости и ряд особенностей эксплуатации шероховатой поверхности либо не отвечают условию воспроизводимости результатов измерения [3].

Интересно обратить внимание на основной способ определения параметров шероховатости, используемый в технологии машиностроения и указанный в учебнике для подготовки рабочих на производстве [4]. В нем прямое измерение шероховатости производится контактным способом при помощи профилометра, игла которого с заданным радиусом закругления движется по поверхности с постоянной скоростью. Количественное значение непосредственно среднеквадратических отклонений определяется по шкале электроизмерительного прибора. Эта особенность способа основана на положениях ГОСТ 2789—45 (использование среднеквадратических отклонений для точек профиля), но следует заметить, что диаметр закругления указан в пять раз (15 мкм вместо 3) больший требуемого по условиям измерения и фактически закругление иглы огибает шероховатую поверхность по высотам выступов. Это позволило в технологии машиностроения при измерении шероховатости определять величину, устойчиво коррелирующую с изменением параметров трения (покоя, качения, скольжения, сопротивления движению).

Признано, что при движении транспортного средства по автомобильной дороге (контакте колеса и дорожного покрытия с шероховатой поверхностью) контактирующие поверхности соприкасаются по вершинам выступов, и давление, передаваемое от колеса к покрытию дороги, воспринимается только некоторой несущей частью геометрической поверхности. С учетом требования функциональности назначения поверхности для автомобильной дороги естественно назначать базовую длину, соответствующую размерам отпечатка колеса (360 или 180 мм).

Основной задачей при устройстве шероховатых поверхностных обработок автомобильных дорог является создание защитного слоя, который, выполняя функции слоя износа, обеспечивает сохранность и срок службы дорожного полотна. При этом обеспечивают высокое качество самой шероховатой поверхностной обработки по критерию долговечности, добиваясь наиболее плотного прилегания формообразующих выступов друг к другу. Этого достигают путем распределения требуемого для этой цели максимального расхода материала, а также дополнительного уплотнения поверхностного слоя, устройства двойной поверхностной обработки. Однако это не обеспечивает требуемых условий водоотведения, а также нормируемого по условиям безопасности движения коэффициента сцепления. Щебень при устройстве шероховатых поверхностных обработок выполняет две функции: обеспечивает прямой контакт с колесами транспортных средств (необходимую шероховатость и коэффициент сцепления); образование плотной текстуры слоя шероховатой поверхностной обработки, в котором зерна щебня (фракции щебня) взаимно блокируются. Наиболее благоприятной формой зерен является кубовидная, которая способствует стабильному расположению на поверхности дороги каждого зерна щебня, обеспечению необходимого коэффициента сцепления и взаимному блокированию зерен.

Возможность применения в дорожном хозяйстве государственного стандарта ГОСТ 2789—73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения указывались ранее А.П. Васильевым, М.В. Немчиновым и другими авторами [3]. Однако содержательного анализа его показателей, действительно отвечающих за геометрию макрошероховатости и значимо коррелирующих с триботехническими параметрами, не проводилось. Вместе с тем был удачно предложен новый параметр, не входивший в ГОСТ 2789—73, — средняя высота выступов шероховатости, а также средний радиус кривизны и средний угол вершин неровностей. Практически российские ученые-дорожники признали необходимость развития знаний о геометрических параметрах шероховатости и уже тогда сделали важнейший шаг к развитию ГОСТ на шероховатые поверхности.

В дорожном хозяйстве применение параметра средней высоты выступов вполне отвечало возможности нормирования для дорожных покрытий, на которых колесо полностью контактировало с поверхностью дороги. Однако уже для шероховатой поверхностной обработки контактирование колеса происходит по выступам макрошероховатости (зернам щебня), а глубины впадин и степень их заполнения вяжущим, водой, снегом или различными загрязнениями не являются доминирующими влияющими факторами. Поэтому для обеспечения воспроизводимости результатов измерения и слабой зависимости от выбора уровня сечения профиля необходимо переходить от математического ожидания к дисперсии высот выступов.

Данный подход вполне естественен по аналогии с теорией стрельбы (точно — среднее и кучно — дисперсия), теорией автоматического управления (совокупная дисперсия — квадрат среднего и собственно дисперсия), теорией вероятности (среднее и коэффициент вариации) и широко применяется в различных сферах жизнедеятельности.

Более информативным оказывается дальнейшее развитие идеи — переход к анализу статистического распределения высот выступов. Авторами предложена концепция проектирования шероховатых поверхностных слоев покрытий, основанная на обеспечении срока службы плотным заполнением зерен (выступов) на поверхности и обеспечением коэффициента сцепления подбором и регулированием диапазонов высоты выступов. Показана большая степень коррелированности нормируемого коэффициента сцепления с разбросом высот выступов шероховатой поверхности в сравнении с его высотой (определяющей высоту неровностей). На примере автомобильных дорог впервые определены основные параметры шероховатости, вызывающие изменение коэффициента сцепления колеса автомобиля с поверхностью дороги.

Например, увеличение конкретно высоты (средней или максимальной) неровностей для диапазона выше масштабирующего значения (для автомобильных дорог 3 мм) не приведет к изменению условий, которые вызовут изменение нормируемого коэффициента сцепления объекта с поверхностью. Встает задача поиска таких параметров геометрии шероховатой поверхности, изменение которых будет существенно более коррелировать с изменением коэффициента сцепления. В качестве новых параметров рассматриваются дисперсия разброса высот выступов макрошероховатости, их статистическое распределение, и в развитие — спектральная плотность, декоррелированность.

Авторы предлагают для анализа шероховатых поверхностей различной природы (в том числе и для автомобильных дорог) применение модернизированного *теоретико-вероятностного подхода*, ранее предложенного для абразивной обработки профессором А.В. Королевым [2] и для дорожного хозяйства П.С. Суслигановым [3].

Необходимо различать геометрическую форму зерна щебня и геометрическую форму контактирующей части зерна. Для определения количества зерен в единице объема, исследования работы зерна при больших нагрузках, определения положения зерен щебня на дорожном покрытии основной является геометрическая форма зерен. При исследовании механизма контактирования с колесом транспортного средства определяющей является геометрическая форма вершины зерна.

В теории шероховатых поверхностей геометрическую форму зерна чаще всего аппроксимируют эллипсоидом, сферой, набором трех сфер. Форму профиля выступа зерна классифицируют как приближающуюся к треугольнику, к треугольнику с радиусом округления при вершине, трапеции, гиперболе и параболе. Практически все виды могут давать удовлетворительное приближение к действительности. С целью уменьшения трудоемкости исследований и обобщения результатов измерений находят такую геометрическую форму зерен, которая позволила бы связать параметры вершин зерен с их общими размерами.

Сечение зерна щебня может быть представлено как реализация случайной функции в виде совокупности синусоид различных частот со случайны-

ми амплитудами и фазами. Рассматривается произвольное сечение зерна, случайно ориентированное в пространстве. Вероятностные характеристики случайной функции не зависят от аргумента для данного сечения зерна (от положения текущего радиуса зерна). Соответственно, эта функция будет стационарной.

Уравнения можно использовать для анализа геометрической формы единичного зерна и формы группы зерен, принадлежащей одной партии. В последнем случае первое слагаемое рассматривается как случайная величина, выражающая собственно размер зерна, характеризующая рассеивание размеров зерен в виде идеальных шаров. Так как зерна щебня есть неправильные геометрические тела, то в общее рассеивание входят и отклонение от правильной геометрической формы в виде второго слагаемого. Также можно показать, что суммарный закон распределения размеров и форм зерен подчиняется закону Гаусса.

Практически все зерна щебня имеют гармоники с очень большим порядковым номером, которые образуют микроскопические неровности зерен. При этом все неровности с большим числом гармоник накладываются на неровности с меньшим числом, так что средней линией неровностей конкретной гармоники является линия, образованная низшими гармониками. Соответственно выбор порядкового номера гармоники в уравнении будет зависеть от конечной цели исследований геометрической формы зерен. Для определения числа зерен в единице объема геометрическую форму зерен щебня, ориентированных большой диагональю, можно представить окружностью, при расчете расположения зерен учитывают продолговатость зерен с выделением дополнительно второй гармоники.

Среднее число вершин зерен определяется на основании теории выбросов. Проведенный анализ показывает, что форма вершин находится в сложной зависимости от размеров: радиуса их окружности, среднеквадратического отклонения диаметральных размеров или среднеквадратического производной случайной функции, описывающей отклонение точек профиля зерна от дуги средней окружности. Можно убедиться, что это примерно соответствует параболической форме зерен.

Для определения численных значений параметров зерен щебня необходимо знать законы разрушения зерен при дроблении на дробильносортировочных установках. Вероятностный анализ показывает, что формы и размеры вершин зерен определяются постоянным угловым параметром. При этом возможно подобие формы отдельных гармоник, с уменьшением средних значений амплитуд синусоид должна увеличиваться их частота.

В теории прочности при разрушении образцов, изготовленных из хрупких кристаллических материалов горных пород, при испытаниях на осевое сжатие замечено, что образцы разрушаются по поверхностям, косо наклоненным к направлению сжатия под углом, всегда меньшим 45°. У полированных сбоку образцов наблюдаются пересекающиеся под углом линии скольжения. Если материал неоднороден или имеет микротрещины, линии скольжения, формирующие выступы зерен, могут быть кривыми, однако острые и тупые углы при вершинах зерен встречаются одинаково часто. Средний угол должен быть равным 90°, а геометрическая форма зерен приближается к параллелограмму. При следующих расколах отдельные вершины зерна могут отколоть-

ся, тогда образуется профиль зерна в виде многоугольника с числом вершин более четырех.

Распределение зерен щебня сразу после шероховатой поверхностной обработки считается свободным распределением. В процессе износа слоя шероховатой поверхностной обработки характер распределения зерен относительно центра группирования вершин в зависимости от уровня вяжущего изменяется. Если в процессе начальной эксплуатации происходит частичное скалывание зерен у их вершин или иное местное разрушение зерен на уровне вершин, то плотность расположения зерен в начальной части кривой увеличивается, а центр группирования вершин смещается вниз, к вяжущему. В идеале все вершины зерен, подвергшиеся скалыванию, устанавливаются на одном уровне от исходного сечения.

Величина расстояния уровня скалывания активных зерен от наиболее выступающих вершин называется разновысотностью активных зерен (предложена профессором А.В. Королевым в 1975 г.). Она соответствует глубине залегания половины из всех выступающих над вяжущим вершин зерен, измеренной от вершины наиболее выступающего зерна, если бы функция распределения в начальной части была справедлива для всего слоя выступающих зерен. Показано, что она имеет вероятностную природу.

Изучено изменение разновысотности зерен, которая определялась по профилограммам рельефа поверхности дороги. Установлено, что величина разновысотности в процессе износа снижается в 3...5 раз.

Авторами предлагается для дальнейшего исследования в дорожном хозяйстве гипотеза о том, что величина коэффициента упрочнения связки вяжущее — щебень связана пропорциональной зависимостью с логарифмом линейного износа поверхности автомобильной дороги. Экспериментально установлено, что прикатка катком с обрезиненными валками обеспечивает снижение износа поверхности дороги в среднем на 20...25 % и делает его более равномерным по профилю. Однако наблюдается некоторое снижение коэффициента сцепления. Один из вариантов регулирования распределения размеров зерен щебня может быть обеспечен смешиванием фракций щебня с меньшим разбросом в заданном диапазоне. Например, для диапазона щебня фракции 10...20 мм предлагается смешивать его в пропорции 3:2 с фракцией 15...20 мм.

Способ создания шероховатых поверхностных слоев заключается в том, что первоначально подготавливают исходную поверхность к нанесению шероховатого слоя, распределяют материал поверхностного слоя на заданную высоту, при этом обеспечивают требуемую высоту неровностей шероховатого поверхностного слоя, регулируют плотность прилегания формообразующих выступов друг к другу, далее проводят уход за состоянием поверхностного слоя, отличающийся тем, что регулирование по обеспечению коэффициента сцепления с колесом автомобиля дополнительно осуществляют по дисперсии разброса высот выступов в диапазоне фракции выступов, а разброс формообразующих выступов выбирают в соответствии с требуемыми параметрами шероховатости по заданному закону распределения.

Для оценки типа шероховатости покрытий в практических целях достаточно определить четыре основные характеристики шероховатых структур: среднюю глубину впадин (высоту выступов); средний шаг шероховатости; плотность контактов; разброс (дисперсию) высот выступов.

Для противогололедных дорожных покрытий с шероховатой поверхностью дополнительно предлагается еще один новый параметр: разброс глубин впадин, определяющий случайный характер пятен гололеда на активных выступах зерен щебня. Используя величины параметров макрошероховатости поверхности покрытий, устанавливают характеристики функционально-эксплуатационных показателей, динамику их изменения в процессе эксплуатации, вид используемого материала, технологии устройства и эксплуатации, соответствие параметрам интенсивности и составу нагрузок. Анализируя динамику изменения параметров макрошероховатости в процессе эксплуатации покрытия, можно устанавливать характеристики износа и долговечности шероховатой поверхности и межремонтные сроки.

Предложенный подход к нормированию и определению параметров шероховатости был использован в отраслевых «Рекомендациях по устройству дорожных покрытий с шероховатой поверхностью (взамен ВСН 38-90)», утвержденных Минтрансом России 5 января 2004 г.

#### Выводы

В настоящее время стало заметным опережение финансируемых государством отраслей в актуализации и реализации фундаментальных технических проблем, в частности исследования и нормирования шероховатости и триботехники поверхностей автомобильных дорог.

- 1. Попытка интерпретации государственного стандарта на шероховатые поверхности вариантов 1945, 1959, 1973 гг. показала обоснованность многолетнего применения профилометра с диаметром иглы, большим ширины впадин шероховатости. Фактически определяется среднеквадратическое отклонение разброса выступов шероховатой поверхности. При этом способ измерения обеспечивает значимую корреляцию с параметрами трения (сцепления). Данный параметр обладает свойством инвариантности к выбираемому уровню отсчета при определении шероховатости поверхности.
- 2. С учетом отраслевой отработки в дорожном хозяйстве полученных результатов авторы предлагают дополнить ГОСТ 2789—73 дисперсией и статистическим распределением разброса высот выступов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. ГОСТ 2789—73 (СТ СЭВ 638—77) Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. Госстандарт СССР. Взамен ГОСТ 2789-59. Введен с 01.01.75, переизд. (сентябрь 1990) с Изменением № 1, утвержд. в мае 1980 г. М.: Изд-во стандартов, 1990. 8 с.
- 2. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 192 с.
- 3. Кочетков А.В., Суслиганов П.С. Шероховатые поверхности: нормирование, проектирование и устройство // Автомобильные дороги. 2005. № 1. С. 54—56.
- 4. *Мокиенко Н.И.* Слесарное дело с основами материаловедения. М. : Высш. шк., 1973. Изд. 5-е. С. 160—161.

© Кочетков А.В., Чванов А.В., Аржанухина С.П., 2009

Поступила в редакцию 13.03.09 УДК 625.8

#### Н.С. Ковалев

### **ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ НА ПРЕДЕЛЬНОЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЕ УДЛИНЕНИЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА ИЗ ШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Изучено влияние комплексного воздействия рецептурных, технологических и климатических факторов на предельное относительное удлинение асфальтобетона из шлаковых материалов с применением метода математического планирования экстремальных экспериментов.

К лючевые с лова: асфальтобетон; шлаковые материалы.

The author researches impact of complex influence of prescribed, technological and climatic factors on maximum relative elongation of asphalt concrete from cindery materials with application of method of mathematical planning of extremal experiments.

K e y w o r d s: asphalt concrete; slag materials.

Асфальтовый бетон является одним из наиболее сложных искусственных конгломератов, что обусловлено главным образом особенностью его структуры, а также большой зависимостью его свойств от многих факторов внешнего воздействия. Свойства асфальтобетонных материалов изменяются в широких пределах в зависимости от состава, температуры, вида напряженного состояния, величины напряжения и времени действия нагрузки, причем влияние этих факторов неоднозначно [1].

Увеличение грузонапряженности автомобильных дорог приводит к увеличению эксплуатационных нагрузок, которым подвергается асфальтобетон в дорожных покрытиях. Для оценки деформативной способности предложено значительное число показателей: коэффициент теплоустойчивости, предел прочности на растяжение при изгибе, предельное относительное удлинение, ползучесть и скорость ползучести, модули деформации и упругости, вязкость ненарушенной структуры, кинетические характеристики и т.д.

Как отмечают авторы [2], по величине предела прочности на растяжение при изгибе нельзя судить о трещиностойкости асфальтобетонных покрытий. Наиболее приемлемым для прогнозирования трещиностойкости и долговечности асфальтобетонных покрытий по нашему мнению является показатель предельного относительного удлинения при изгибе.

За последние годы появилось большое количество работ по исследованию влияния эксплуатационных и климатических воздействий на изменение свойств асфальтобетона. Значительная часть этих исследований посвящена вопросам моделирования внешних воздействий на асфальтобетон с целью прогнозирования его эксплуатационной надежности.

Известные способы моделирования эксплуатационных и климатических воздействий на асфальтобетон основаны на дифференциальном подходе к оценке стабильности его структуры по результатам влияния отдельных факторов. Однако такая оценка не позволяет учесть одновременное влияние комплекса эксплуатационно-климатических и рецептурных факторов на асфальтобетон, как это имеет место в реальных условиях эксплуатации покрытий автомобильных дорог.

Существующий ГОСТ Р 9128—97 на асфальтобетонные смеси и асфальтобетон также не учитывает комплексного воздействия факторов. Лабораторные методы оценки показателей качества асфальтобетона не отражают условия его работы в покрытии при изменяющемся температурно-влажностном режиме, кроме того, характеристика свойств асфальтобетона дается по отдельным независимым показателям, а комплексное влияние эксплуатационно-климатических факторов на свойства асфальтобетона практически не изучено.

Целесообразность метода комплексного воздействия основывается на мнении ряда исследователей [1, 3] о недостаточности оценки влияния отдельных факторов на изменение свойств асфальтобетона при прогнозировании срока его службы и о необходимости определения закономерностей изменения структуры асфальтобетона под влиянием комплекса факторов.

Нами предложен и разработан способ подготовки образцов строительных материалов к испытаниям на прочность [4]. Сущность способа заключается в том, что на один и тот же образец воздействует комплекс факторов, после чего определяются параметры структурно-механических свойств материала. Предварительные исследования, проведенные по предложенному способу, показали, что при комплексном воздействии возможен синергизм эффектов.

Для описания влияния комплекса факторов при исследовании предельного относительного удлинения асфальтобетона из шлаковых материалов применили метод математического планирования экстремальных экспериментов (17-точечный трехуровневый план второго порядка при числе факторов k=3 ( $N=N_1+N\alpha+n_0$ ), сущность которого заключается в получении максимальной информации при минимальном количестве экспериментов [5].

Было изучено влияние содержания битума, уплотняющей нагрузки и температуры испытания на предельное относительное удлинение при изгибе асфальтобетона на основе гранулированного доменного шлака Новолипецкого металлургического комбината и битума марки БНД 90/130 (условия эксперимента приведены в табл. 1).

Таблица 1 Условия планирования эксперимента

|  | Факторы                                    |  |                                  |                       |                       |                       |  |  |
|--|--|--|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|
|  | Физическое                                 | Кодированное<br>значение пере-<br>менных |                                  |                       |                       |                       |  |  |
| Условия  | Уплотняю-<br>щая нагруз-<br>ка $X_1$ , МПа | Содержание битума в смеси $X_2$ , %      | Температура испытания $X_3$ , °С | <i>x</i> <sub>1</sub> | <i>x</i> <sub>2</sub> | <i>x</i> <sub>3</sub> |  |  |
| Верхний уровень $X_i^{\text{в}}$                     | 50   | 11                                       | +20                              | +1                    | +1                    | +1                    |  |  |
| Нижний уровень $X_i^{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}$ | 10   | 7  | -20                              | -1                    | -1                    | -1                    |  |  |
| Основной уровень $X_i^0$                             | 30   | 9  | 0                                | 0                     | 0                     | 0                     |  |  |
| Шаг варьирования $\lambda_i$                         | 20   | 2  | 20                               | _                     | _                     | _                     |  |  |

Переход от физических переменных к кодированным осуществляется по формулам:

$$x_1 = \frac{X_1 - 30}{20}$$
;  $x_2 = \frac{X_2 - 9}{2}$ ;  $x_3 = \frac{X_1 - 0}{20}$ .

В результате реализации опытов и обсчета матрицы планирования получена математическая модель (1)

$$\varepsilon = (28,11+1,67 x_1 +4,49 x_2 +12,15 x_3 -0,64 x_1^2 -2,26 x_2^2 -3,15 x_3^2 -1,72 x_1 x_2 +2,04 x_1 x_3 +4,01 x_2 x_3) \cdot 10^{-3},$$
(1)

где  $\varepsilon$  — предельное относительное удлинение при изгибе;  $x_1$  — кодированное значение уплотняющей нагрузки (физическое значение изменяется от 10 до 50 МПа);  $x_2$  — кодированное содержание битума в смеси (физическое значение изменяется от 7 до 11 %);  $x_3$  — кодированное значение температуры испытания материала (физическое значение изменяется от -20 до +20 °C.

Анализ математической модели (1) позволяет установить некоторые закономерности:

- 1) наибольшее влияние на предельное относительное удлинение при изгибе оказывает температура испытания; с увеличением температуры предельное относительное удлинение увеличивается, на это указывает знак при переменном  $x_3$ ;
  - 2) вторым по значимости фактором является содержание битума в смеси;
- 3) уплотняющая нагрузка также увеличивает предельное относительное удлинение при изгибе.

Построенный по математической модели рис. 1 позволил более детально выявить влияние каждого фактора на предельное удлинение при изгибе.

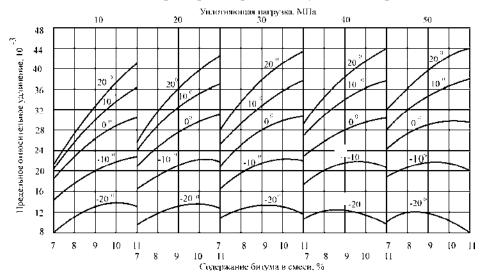


Рис. 1. Влияние уплотняющей нагрузки, температуры испытания и содержания битума марки БНД 90/130 на предельное относительное удлинение асфальтобетона из гранулированного доменного шлака НЛМЗ. Цифры на кривых — температура испытания асфальтобетона, °C

В области положительных температур с увеличением содержания битума в смеси и уплотняющей нагрузки относительное удлинение при изгибе возрастает, причем содержание битума в смеси оказывает большее влияние, чем уплотняющая нагрузка. Иная картина наблюдается при исследовании относительного удлинения в области отрицательных температуре. При температуре 0 °C с увеличением уплотняющей нагрузки влияние содержания битума на предельное относительное удлинение при изгибе сказывается меньше. Интенсивность роста предельного удлинения при изгибе при температуре 0 °C снижается.

При температуре -10 и -20 °C наблюдается максимальное значение предельного относительного удлинения при уплотняющей нагрузке и содержании битума. Максимальное значение предельного удлинения при изгибе при температуре -10 °C с увеличением уплотняющей нагрузки смещается в область меньшего содержания битума. Аналогичное изменение происходит при температуре -20 °C, причем при этой температуре с увеличением уплотняющей нагрузки абсолютная величина максимального удлинения при изгибе уменьшается.

Полученные закономерности на первый взгляд кажутся противоречивыми. Казалось бы, следовало ожидать увеличения предельного относительного удлинения при увеличении содержания битума [3]. В то же время относительное удлинение должно было бы увеличиваться с увеличением уплотняющей нагрузки, так как весь битум переходит в структурированное состояние вследствие дробления шлаковых зерен и увеличения удельной поверхности, толщина битумной пленки в это время имеет оптимальную величину. Это явление происходит и в реальных условиях, но здесь накладывается явление эффекта диффузии битума в поры материала (того битума, который продиффундировал в поры без изменения группового состава). При увеличении уплотняющей нагрузки зерна шлакового материала дробятся, и продифундировавший в поры битум освобождается и расходуется на создание битумной пленки оптимальной толщины.

О деструкции асфальтобетонных материалов в процессе периодического замораживания-оттаивания некоторые авторы судят по изменению предельного относительного удлинения. По их данным [6], при увеличении количества циклов замораживания-оттаивания относительное удлинение уменьшается, что свидетельствует о деструктивных процессах. Проведенные ими исследования относятся к асфальтобетонным материалам на основе инертных компонентов.

В наших исследованиях в асфальтобетоне применяются гидравлически активные минеральные компоненты (гранулированные доменные шлаки и шлаковые пески), и поэтому были проведены исследования по изучению влияния воздействия знакопеременных температур на предельное относительное удлинение при изгибе. Использовали метод математического планирования экстремальных экспериментов. Условия планирования приведены в табл. 2.

Переход от физических переменных к кодированным осуществляется по формулам:

$$x_1 = \frac{X_1 - 30}{20}$$
,  $x_2 = \frac{X_2 - 0}{20}$ ,  $x_3 = \frac{X_1 - 50}{50}$ .

Таблица 2

#### Условия планирования эксперимента

|                                  | Факторы                                     |                                  |  |                       |  |       |  |  |
|----------------------------------|---|----------------------------------|--|-----------------------|--|-------|--|--|
|                                  | Физическое значение переменных              |                                  |  |                       | Кодированное<br>значение пере-<br>менных |       |  |  |
| Условия                          | Уплот-<br>няющая<br>нагрузка<br>$X_1$ , МПа | Температура испытания $X_2$ , °С | Количество циклов замораживания оттаивания $X_3$ | <i>x</i> <sub>1</sub> | $X_2$                                    | $X_3$ |  |  |
| Верхний уровень $X_i^{\text{в}}$ | 50  | +20                              | 100  | +1                    | +1                                       | +1    |  |  |
| Нижний уровень $X_i^{\text{H}}$  | 10  | -20                              | 0  | -1                    | -1                                       | -1    |  |  |
| Основной уровень $X_i^0$         | 30  | 0                                | 50   | 0                     | 0  | 0     |  |  |
| Шаг варьирования $\lambda_i$     | 20  | 20                               | 50   | _                     | _  | _     |  |  |

Исследования проводили на асфальтобетонах следующих составов:

- 1) гранулированный доменный шлак Новолипецкого металлургического комбината 100 %, битум марки БНД 60/90 9 %;
- 2) гранулированный доменный шлак Новолипецкого металлургического комбината 100 %, битум марки БНД 90/130 9 %;
- 3) шлаковый песок Новолипецкого металлургического комбината 100 %, битум марки БНД 90/130 9 %.

Математические модели для 1, 2 и 3 составов выглядят соответственно следующим образом:

$$\varepsilon_{1} = (28,16 + 6,55 x_{1} + 11,55 x_{2} + 0,14 x_{3} - 8,67 x_{1}^{2} + 0,63 x_{2}^{2} + 2,76 x_{3}^{2} + 5,33 x_{1} x_{2} + 9,08 x_{1} x_{3} - 3,38 x_{2} x_{3}) \cdot 10^{-3};$$

$$\varepsilon_{2} = (29,02 + 2,51 x_{1} + 15,5 x_{2} - 0,88 x_{3} + 1,27 x_{1}^{2} + 3,88 x_{2}^{2} + 0,82 x_{3}^{2} + 0,42 x_{1} x_{2} + 0,78 x_{1} x_{3} - 1,38 x_{2} x_{3}) \cdot 10^{-3};$$

$$\varepsilon_{3} = (20,11 + 2,57 x_{1} + 15,56 x_{2} - 0,82 x_{3} + 1,21 x_{1}^{2} + 3,82 x_{2}^{2} + 0,76 x_{3}^{2} + 0,33 x_{1} x_{2} + 0,69 x_{1} x_{3} - 1,47 x_{2} x_{3}) \cdot 10^{-3}.$$

$$(4)$$

Анализ математических моделей (2)—(4) и построенных по ним графиков (рис. 2 и 3) позволяет установить влияние каждого фактора на предельное относительное удлинение при изгибе и закономерности его изменения.

Как и следовало ожидать, предельное относительное удлинение при изгибе с понижением температуры уменьшается для всех составов асфальтобетонных материалов, но влияние вида вяжущего и минерального материала прослеживается.

Рассмотрим математическую модель 2 и рис. 2. Из рис. 2 видно, что с увеличением уплотняющей нагрузки предельное относительное удлинение асфальтобетона состава № 1 изменяется коренным образом с увеличением количества циклов замораживания-оттаивания. При уплотняющей нагрузке 10 МПа предельное относительное удлинении при изгибе с увеличением количества циклов замораживания-оттаивания снижается в 3,5 раза при температуре +20 °C и в 3,8 раза — при -20 °C. С увеличением уплотняющей нагрузки влияние воздействия знакопеременных температур на предельное относительное удлинение при изгибе уменьшается и приобретает положительное влияние (предельное относительное удлинение увеличивается). Интересен также тот факт, что при уплотняющих нагрузках 20...30 МПа предельное относительное удлинение при изгибе при положительных температурах снижается с увеличением количества циклов замораживанияоттаивания, а при отрицательных — возрастает. При уплотнении асфальтобетона на основе гранулированного доменного шлака и битума марки БНД 60/90 нагрузками 40...50 МПа предельное относительное удлинение при изгибе возрастает с первых циклов замораживания-оттаивания. По всей видимости, при уплотняющей нагрузке 10 МПа пленка битума на поверхности материала препятствует диффундированию влаги и образованию органоминеральных соединений. С увеличением уплотняющей нагрузки толщина пленки битума на поверхности частиц уменьшается и вода диффундирует через нее. Происходит модификация поверхности гранулированного шлака, и образуются органоминеральные соединения, которые более деформативны при отрицательных температурах.

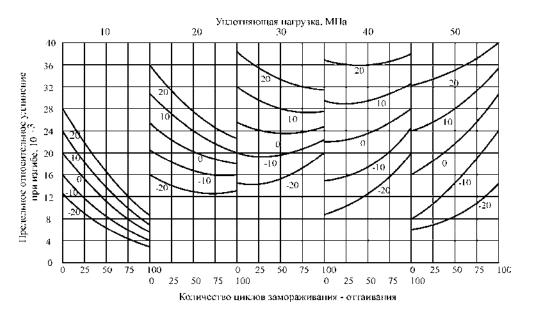


Рис. 2. Влияние уплотняющей нагрузки, температуры испытания и количества циклов замораживания-оттаивания на предельное относительное удлинение асфальтобетона состава: гранулированный доменный шлак НЛМЗ — 100 %, битума марки БНД 60/90 — 9 %. Цифры на кривых — температура испытания асфальтобетона, °С

Аналогичные явления наблюдаются у асфальтобетона на гранулированном шлаке и битуме марки БНД 90/130. Отличие состоит только в том, что процессы структурообразования происходят более длительное время, так же как и у асфальтобетонной смеси на основе шлакового песка и битума марки БНД 90/130 (рис. 3). С уменьшением вязкости битума предельное относительное удлинение возрастает. С повышением гидравлической активности минерального материала при одной и той же вязкости битума предельное относительное удлинение также увеличивается.

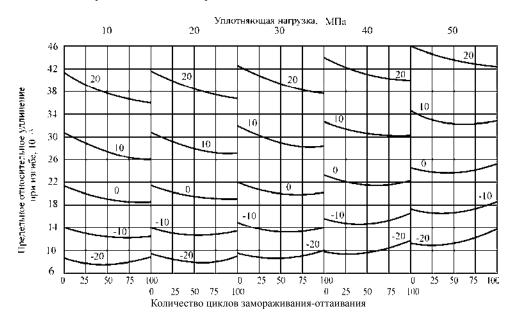


Рис. 3. Влияние уплотняющей нагрузки, температуры испытания и количества циклов замораживания-оттаивания на предельное относительное удлинение асфальтобетона состава: шлаковый песок HЛM3 —  $100\,\%$ , битума марки БНД 90/130 —  $9\,\%$ . Цифры на кривых — температура испытания асфальтобетона, °C

Таким образом, воздействие знакопеременных температур оказывает положительное влияние на деформативность асфальтобетона из шлаковых материалов, особенно при отрицательных температурах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Рыбьев И.А. Асфальтовые бетоны. М.: Высшая школа, 1969.
- 2. Bynum D.J., Traxler R.N. Feilure envelopes for asphaltic concrete // Mater. et costr. 1973.  $N_2$  36. S. 441—446.
  - 3. Гезенцвей Л.Б. Дорожный асфальтобетон. М.: Транспорт, 1976.
- 4. Соколов Б.Ф., Самодуров С.И., Ковалев Н.С. Способ подготовки строительных материалов к испытаниям на прочность. Авт. свид. № 665254. Бюл. изобрет. № 20. 1979.
  - 5. Вознесенский В.А. Статистические решения в технологических задачах. Кишинев, 1968.
- 6. *Таращанский Е.Г., Зыков В.А.* Изменение деформативности асфальтобетона при низких температурах с учетом замораживания-оттаивания // Повышение эффективности цементных и асфальтовых бетонов в Сибири : сб. Омск, 1973. С. 3—10.

© Ковалев Н.С., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

УДК 624.21; 625.53

#### Р.А. Стадник

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА МЕСТНОГО РАЗМЫВА У ОПОР МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Предложены вероятностные математические модели расчета и оценки глубины воронок местного размыва вместо детерминированных формул, в которых не учитывается тот факт, что многие входные параметры в существующих расчетных формулах являются вероятностными и могут принимать различные значения.

Ключевые слова: местный размыв; опоры мостовых переходов; теория риска.

The author suggests probability mathematical models for the analysis and valuation of the local washout crater depth instead of deterministic formulas which do not take into account the fact that many input parameters in the existing analysis formulas are probabilistic and can take various values.

Key words: local washout; bridge crossing supports; risk theory.

Существующие методы расчета параметров местного размыва представляют собой детерминированные математические модели и позволяют определить величину размыва при определенных исходных данных. Однако, как показывают результаты применения этих моделей, их входные параметры являются переменными и обладают вероятностными показателями.

Детерминированные методы не позволяют говорить, с какой вероятностью полученный результат является достоверным. Поэтому, чтобы установить подобную связь между расчетными величинами и вероятностной сущностью всех входных параметров, необходимо применять вероятностные методы по определению параметров местного размыва, например теорию риска.

Применение теории риска основывается на законах распределения глубин местного размыва, в связи с чем необходимо знать, какой из теоретических законов распределения соответствует распределению глубин воронки местного размыва.

Автором были проведены экспериментальные исследования в гидравлическом лотке. Экспериментальные исследования выполнялись в масштабе 1:10 относительно фактических параметров опор и глубины потока. Устанавливали макеты опор мостового перехода в отсыпанный несвязный грунт, представляющий собой песок диаметром d=0,0035 м.

Фактические глубины размыва определялись при различных входных характеристиках потока: скорости течения v, ширине опоры b, глубине потока H и косине потока K. В связи с этим формировались группы данных, в которые входили перечисленные параметры. При производстве эксперимента в группе меняли один параметр, например v, а параметры b, H и K оставляли неизменными. Экспериментальные исследования проводили в следующем диапазоне входных параметров: v = 0.62...0.92 м/с, b = 0.15...0.62 м, d = 0.1...0.4 м и d = 0...13°.

Масштабное моделирование обтекания опор и образования воронки местного размыва позволяет перейти от измеренных местных размывов у макетов опор мостов к фактическим размывам у опор существующих сооружений.

В экспериментальном наблюдении с цилиндрическими опорами при одинаковом диаметре частиц песка  $d=0{,}0035$  м было сформировано 16 выборок из 64 массивов.

Например, в первой выборке  $H=0.20~{\rm M},\,b=0.20~{\rm M}$  изменялась скорость потока; во второй выборке менялась глубина потока при  $b=0.20~{\rm M},\,\nu=0.72~{\rm M/c}$  и т. д. Всего было получено 288 значений глубин местного размыва у цилиндрических опор при нормально набегающем потоке на опору. Затем на ЭВМ с использованием датчика случайных чисел было обработано 288 значений глубин, и в каждой выборке оценивался закон распределения глубин местного размыва.

В качестве примера в табл. 1 приведена одна из выборок, в которой дана математическая обработка наблюдения за местным размывом у опор мостового перехода при следующих параметрах:  $d=0{,}0035$  м,  $v=0{,}72$  м/с,  $H=0{,}20$  м,  $K=0^{\circ}$ ,  $b=0{,}15...0{,}62$  м.

Таблица 1 Экспериментальные и расчетные данные

| № наблюдений | Измеренная $r_{n}$ глубина $h_{\phi}$ , м | Расчетные глубины размыва $h_0$ , м | Разность глубин $h = h_0 - h_{\rm T}$ , м |
|--------------|---|-------------------------------------|---|
| 1            | 2   | 3                                   | 4   |
| 1            | 0,14                                      | 0,15                                | -0,01                                     |
| 2            | 0,18                                      | 0,17                                | 0,01                                      |
| 3            | 0,19                                      | 0,20                                | -0,01                                     |
| 4            | 0,20                                      | 0,24                                | -0,04                                     |
| 5            | 0,19                                      | 0,23                                | -0,04                                     |
| 6            | 0,21                                      | 0,22                                | -0,01                                     |
| 7            | 0,21                                      | 0,25                                | -0,04                                     |
| 8            | 0,21                                      | 0,24                                | -0,03                                     |
| 9            | 0,23                                      | 0,29                                | -0,06                                     |
| 10           | 0,24                                      | 0,26                                | -0,06                                     |
| 11           | 0,24                                      | 0,29                                | -0,05                                     |
| 12           | 0,27                                      | 0,34                                | -0,07                                     |
| 13           | 0,35                                      | 0,37                                | -0,02                                     |
| 14           | 0,35                                      | 0,36                                | -0,01                                     |
| 15           | 0,38                                      | 0,41                                | 0,03                                      |
| 16           | 0,39                                      | 0,40                                | 0,01                                      |
| 17           | 0,48                                      | 0,59                                | -0,11                                     |
| 18           | 0,49                                      | 0,47                                | 0,02                                      |
| 19           | 0,54                                      | 0,53                                | 0,01                                      |
| 20           | 0,57                                      | 0,52                                | 0,05                                      |

Последовательность обработки результатов измерений состояла из следующих решений.

Во второй графе табл. 1 показаны измеренные в процессе эксперимента значения глубины размыва  $h_{\phi}$ . Данные для графы 3 получали расчетом с использованием несвязных грунтов и при наличии поступлений донных

наносов в воронку размыва 
$$\left(\frac{V}{V_0} > 1\right)$$
 по формуле

$$h_{0} = 0.5MK \left[ 1.5 - \frac{1.41 \left( \frac{b}{H} \right)^{0.867}}{\left( \frac{v_{0}}{w} \right)^{0.18 \left( \frac{b}{H} \right)^{0.867}}} H + 0.0177 \frac{v - v_{0}}{w} b + N b^{y} H^{1-y} \right], \tag{1}$$

где M — коэффициент, зависящий от формы опоры; для опытов с круглоцилиндрическими опорами принимают  $M=1,46;\,K$  — коэффициент, учитывающий угол между вектором скорости набегающего потока воды и осью опоры (косина потока); w — средняя гидравлическая крупность частиц, м/с; H — глубина потока перед опорой моста с учетом общего размыва, м;  $v_0$  — неразмывающая скорость, м/с; v — средняя скорость течения в отверстии моста после общего размыва, м/с; b — расчетная ширина опоры моста, м (соответствующая ширине опоры в физической модели); N — параметр, определяемый по графику (рис. 1).

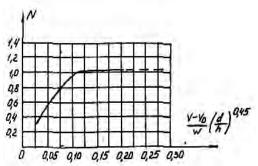


Рис. 1. График определения параметра N

В графе 4 табл. 1 дана разность результатов экспериментальных измерений глубин и расчета теоретических глубин размывов, представляющих собой параметры оценки точности в расчетных формулах.

Обрабатывая разности глубин местного размыва методами математической статистики, можно установить закон распределения глубины, необходимый для вывода

формул оценки риска потери устойчивости опор мостовых переходов.

В табл. 2 приведен пример методики статистической обработки величины разностей глубин местного размыва h.

Применяя к данным табл. 2 мультипликативный метод, получаем: среднее значение величин разностей, м:

$$\Delta h_{\phi} = x_a + \frac{\delta}{n}B = -0.03 + \frac{0.02}{20} \cdot 5 = -0.025$$

дисперсию, м:

$$\sigma_{\Delta h}^2 = \frac{\delta^2}{n-1} \left( A - \frac{B^2}{n} \right) = \frac{0.02^2}{20-1} \left( 59 - \frac{(5)^2}{20} \right) = 0.00121;$$

среднее квадратическое отклонение, м:

$$\sigma_{\Delta h} = 0.035$$
.

По методу суммирования:

$$\Delta h_{\phi} = u_{\kappa} - \delta \left( \frac{M}{n} - 1 \right) = 0,05 - 0,02 \left( \frac{95}{20} - 1 \right) = -0,025;$$

$$\sigma_{\Delta h}^2 = \frac{\delta^2}{n-1} \left( 2 \sum T - M - \frac{M^2}{n} \right) = \frac{0.02^2}{20-1} \left( 2 \cdot 302 - 95 - \frac{95^2}{20} \right) = 0,00121;$$

среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_{\Lambda h} = 0.035$$
.

Таблица 2 Статистическая обработка разностей

| Разряды интервалов<br>разностей | Середина разряда $u_m$ | Абсолютная частота <i>т</i> <sub>і</sub> | Частичная сумма $S_m$<br>Накопленная частота $T$ |                  | Середина условного интервала $h_m$ , м | Пр             | оизвед  | ения        |
|---------------------------------|------------------------|--|--|------------------|--|----------------|---------|-------------|
|                                 | Ce                     | 99Y                                      | ³h   | Har              | ))                                     | $m_{_i}h_{_m}$ | $h_m^2$ | $h_m^2 m_i$ |
| -0,120,10                       | -0,11                  | 1  | 1  | 1                | -4                                     | -4             | 16      | 16          |
| -0,100,08                       | -0,09                  | 0  | 1  | 2                | -3                                     | 0              | 9       | 0           |
| -0,080,06                       | -0,07                  | 2  | 3  | 5                | -2                                     | -4             | 4       | 8           |
| -0.060.04                       | -0,05                  | 2  | 5  | 10               | -1                                     | -2             | 1       | 2           |
| -0.040.02                       | $-0.03=x_a$            | 6  | 11   | 21               | 0                                      | 0              | 0       | 0           |
| -0,020                          | -0,01                  | 5  | 16   | 37               | 1                                      | 5              | 1       | 5           |
| 00,02                           | 0,01                   | 3  | 19   | 56               | 2                                      | 6              | 4       | 12          |
| 0,020,04                        | 0,03                   | 0  | 19   | 75               | 3                                      | 0              | 9       | 0           |
| 0,040,06                        | $0,05=u_k$             | 1  | 20   | 95               | 4                                      | 4              | 16      | 16          |
|                                 |                        | n=20                                     | M=95   | $\Sigma T = 302$ |  | B=5            |         | A=59        |

Контроль расчета основных параметров закона распределения по разным математическим методам сошелся, что указывает на надежность полученных результатов.

При сравнении полученных результатов закона распределения исследуемого параметра с результатами других законов было установлено, что лучше всего этот закон согласуется с эмпирическим распределением нормального закона распределения интервалов (табл. 3).

В табл. 3 вероятности попадания интервалов в разряды для нормального закона устанавливаем по формуле:

$$P_{i} = \Phi \left[ \frac{h_{i+1} - h_{cp}}{\sigma_{h}} \right] - \Phi \left[ \frac{h_{i} - h_{cp}}{\sigma_{h}} \right], \tag{2}$$

где  $h_{i+1}$  и  $h_i$  — правая и левая границы i-го разряда (табл. 3);  $\Phi(U)$  — функция Лапласа [7].

При  $\chi^2 = 6,56$  и v = 6 по критерию Пирсона имеем P = 0,34 — хорошее соответствие между теоретическим и экспериментальным законами распределений. В результате обработки 16 выборок было установлено девять с оценкой «отлично», четыре соответствия — «хорошо», три — «удовлетворительно».

Следовательно, при выводе формул теории риска для оценки глубины местного размыва необходимо пользоваться нормальным законом распределения.

Таблица 3 Сравнение эмпирического распределения разностей с нормальным распределением для диаметра песка  $d=0,0035~\mathrm{M}$ 

| Разряды ин-<br>тервалов раз-<br>ностей | Абсо-<br>лютная<br>частота $m_i$ | Вероятность попадания измерения в разряде $P_i$ | Теоретическое количество измерений в разряде $\left(n_{_{T}}=P_{i}\cdot n\right)$ | $\chi^2 = \frac{\left(m_i - n_{_T}\right)^2}{n_{_T}}$ |
|--|----------------------------------|---|---|---|
| -0,120,10                              | 1                                | 0,0360045                                       | 0,7200  | 0,1088  |
| -0,100,08                              | 0                                | 0,1005021                                       | 2,0100  | 2,0100  |
| -0,080,06                              | 2                                | 0,1584491                                       | 3,1689  | 0,4311  |
| -0,060,04                              | 2                                | 0,1500255                                       | 3,0005  | 0,3336  |
| -0,040,02                              | 6                                | 0,2621109                                       | 5,2422  | 0,1095  |
| -0,020                                 | 5                                | 0,1728111                                       | 3,4562  | 0,6895  |
| 00,02                                  | 3                                | 0,0598313                                       | 1,1966  | 2,7179  |
| 0,020,04                               | 0                                | 0,0079766                                       | 0,1595  | 0,1595  |
| 0,040,06                               | 1                                | 0,0522889                                       | 1,0457  | 0,0019  |
|  | $n = \sum h_m = 20$              | P=1,0000000                                     |   | $\chi^2 = 6,5618$                                     |

Для определения вероятности образования местного размыва у опор мостов введем следующие обозначения (рис. 2):  $h_0$  — математическое ожидание фактической или расчетной величины местного размыва;  $h_{\rm kp}$  — математическое ожидание недопустимой глубины местного размыва, при которой вероятность размыва равна 50%-му риску;  $\sigma_{h_{\rm cp}}$  и  $\sigma_{h_{\rm kp}}$  — средние квадратические отклонения фактической и критической глубин местного размыва соответственно;  $h_{\rm cp} \pm t \, \sigma_{h_{\rm cp}}$  — поле рассеивания параметра  $h_i^{\rm cp}$  в пределах плотности распределения  $f(h_2)$ ;  $h_{\rm kp} \pm t \, \sigma_{h_{\rm kp}}$  — поле рассеивания параметра  $h_i^{\rm kp}$  в пределах плотности распределения  $f(h_1)$ ; t — коэффициент значимости, зависящий от вероятности (надежности измерений) P.

В соответствии с теорией вероятности известно, что сумма независимых нормально распределенных случайных величин имеет нормальное распределение [2, 3].

Тогда

$$f_{h_1 + h_2}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(h_1) \cdot f(z - h_1) dx = \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z - \bar{a})^2}{2 \cdot \sigma_a^2}},$$
(3)

где  $f(z-h_1)=f(h_2)$ ;  $a=h_{\rm kp}-h_{\rm cp}$  — интервал между математическими ожиданиями нормально распределенных величин местного размыва;  $\sigma_a=\sqrt{\sigma_{h_{\rm kp}}^2+\sigma_{h_{\rm cp}}^2}$  — среднее квадратическое отклонение суммарного распределения двух нормально распределенных величин глубины местного размыва.

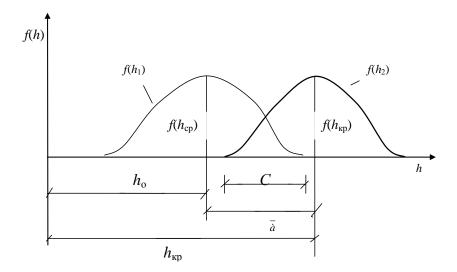


Рис. 2. Плотности распределения параметров  $h_{\rm kp}$  и  $h_{\rm o}$  с геометрическим представлением области риска (C — область риска;  $\overline{a}$  — интервал между математическими ожиданиями)

Справедливость формулы (3) можно показать при помощи характеристических функций [4].

Функция суммарного распределения имеет вид

$$F(z) = \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(z-a)^2}{2\sigma_a^2}} dz.$$

Заменив переменную  $u = \frac{z-a}{\sigma_a}$  при a = 0 и  $dz = \sigma_a du$ , получаем вероят-

ность того, что z < 0:

$$P(z<0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u} e^{-\frac{u^2}{2}} du = \Phi_u(u) - \Phi_u(-\infty) = \Phi_u(u).$$
 (4)

Учитывая, что риск r = P(z > 0) связан с формулой (4) соотношением r = P(z > 0) = 1 - P(z < 0), получаем

$$r = P(z > 0) = 1 - \Phi_u(u) = 1 - \Phi_u\left(\frac{z}{\sigma}\right).$$

Табулируется, как правило, интеграл вероятности вида

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{u} e^{-\frac{u^{2}}{2}} du , \qquad (5)$$

который связан с функцией  $\Phi_u(u)$  соотношением

$$\Phi_{u}(u) = 0.5 + \Phi(u)$$
.

Тогда

$$r = 1 - [0, 5 + \Phi(u)] = 0, 5 - \Phi\left(\frac{z}{\sigma_a}\right).$$
 (6)

При z = a формула (6) принимает вид

$$r = 0.5 - \Phi\left(\frac{a}{\sigma_a}\right) \tag{7}$$

и позволяет определить риск возникновения интервала между математическими ожиданиями расчетного параметра  $h_{\rm o}$  и параметра, соответствующего 50%-му риску  $h_{\rm kp}$  (см. рис. 2).

Таким образом, риск образования местного размыва у опор мостов будет определяться по формуле:

$$r = 0,5 - \Phi\left(\frac{h_{\kappa p} - h_o}{\sqrt{\sigma_{h_{\kappa p}}^2 - \sigma_{h_{cp}}^2}}\right),\tag{8}$$

где  $h_{\rm kp}$  — критическая глубина, при которой вероятность образования местного размыва равна 50 %, м;  $h_{\rm o}$  — математическое ожидание фактической величины местного размыва;  $\sigma_{h_{\rm kp}}$  — среднее квадратическое отклонение критической глубины, м;  $\sigma_{h_{\rm cp}}$  — среднее квадратическое отклонение фактической глубины, вызванное ошибками при расчете глубины местного размыва, например, при неправильном определении глубины потока, м;  $\Phi(U)$  — интеграл вероятности, определяемый по значению подынтегральной функции

$$U = \frac{h_{\rm KP} - h_{\rm o}}{\sqrt{\sigma_{h_{\rm KP}}^2 - \sigma_{h_{\rm cp}}^2}}.$$

По формуле (8) была выполнена оценка риска потери устойчивости опоры в зависимости от ее диаметра (табл. 4) и глубины потока (рис. 3).

Таблица 4

Риск образования местного размыва при диаметре песка d=0,0035 м, v = 0,72 м/с, H = 0,20 м

| Ширина опоры $b$ , м | Риск τ               |
|----------------------|----------------------|
| 0,15                 | $0.78 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,20                 | $0.81 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,24                 | $1,07 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,40                 | $1,30\cdot10^{-3}$   |
| 0.62                 | $1.18 \cdot 10^{-3}$ |

*Выводы*. 1. Основным законом распределения глубин местного размыва у опор мостов следует считать нормальный закон распределения.

2. Анализ формулы (8) показывает, что при увеличении диаметра опоры (табл. 4) и глубины потока (рис. 3) риск потери устойчивости опоры моста увеличивается.

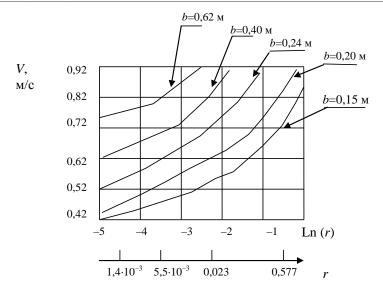


Рис. 3. Риск потери устойчивости опоры

Если фактическая глубина местного размыва увеличится до равенства с критической глубиной (  $h_{\rm cp} = h_{\rm kp}$  ), то по формуле (8) получим r = 0.5 .

При дальнейшем увеличении этого параметра возникает ситуация  $h_{\rm cp} > h_{\rm kp}$ , и с учетом того, что функция Лапласа нечетная  $\Phi(-U) = -\Phi(U)$ , по формуле (8) установим 0.5 < r < 1. В пределе, когда  $h_{\rm cp} >> h_{\rm kp}$ , риск r, определяемый по формуле (8), стремится к единице.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. С мадник P.A. Расчет местного размыва с использованием теории риска на основе нормального закона распределения // Проблемы транспорта и транспортного строительства: сб. науч. тр. / Сарат. гос. техн. ун-т. Саратов, 2007. С. 146—150.
- 2.  $Аугусти \Gamma$ ., Баратта A.,  $Кашиати \Phi$ . Вероятностные методы в строительном проектировании. М.: Транспорт, 1988. 584 с.
- 3. *Столяров В.В.* Функция Лапласа и вычисление вероятностей при нормальном и биноминальном распределениях // Проблемы транспорта и транспортного строительства: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. С. 3—25.
- 4. *Столяров В.В.* Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска : в 2-х ч. Саратов : СГТУ, 1994. Ч. 1. 184 с. ; Ч. 2. 232 с.
- 5. *Ярославцев И.А.* Расчет местного размыва у мостовых опор. М. : ЦНИИС Минтранстроя, 1956. Сообщение № 80. 16 с.
- 6. *Николаев Е.И*. Местный размыв у столбчатых опор мостов с учетом набегания потока на опоры (косое течение) : дис. ...канд. техн. наук. Саратов, 1974. 229 с.
- 7. Столяров В.В. Проблемы повышения безопасности дорожного движения // Актуальные проблемы транспорта России : тр. Междунар. науч.-техн. конф. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 1999. С. 107—115.
- 8. Большаков В.Д., Гайдаев П.А. Теория математической обработки геодезических измерений. М.: Недра, 1977. 368 с.
- 9. *Смирнов Н.В.*, *Белугин Д.А.* Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии. М.: Недра, 1969. 384 с.

© Стадник Р.А., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

#### ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 622.24:502

В.Г. Диденко, Т.В. Мельникова

### РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН

Показано, что применение исследуемых промывочных жидкостей позволит на 70—80 % сохранить естественную проницаемость пласта, снизить загрязнение ПЗП, улучшить технологию строительства скважин, повысить продуктивность малопроницаемых пластов и создать условия для дальнейшей безопасной эксплуатации скважины.

К л ю ч е в ы е с л о в а: скважины нефтяные; экологическая безопасность в строительстве.

As a result we maintain that the usage of investigated pan aut liguids provides the 70—80 per cent of natural stratum penetrability, reduces contamination of fase-zone, improves the anality of lessperspicacions stratums and creats the conditions for the following safe exploitation of the oil well.

Key words: oil wells; ecological safety in construction.

В процессе эволюции общество породило множество социальных, экономических и экологических проблем. К глобальным общепланетарным проблемам относятся истощение природных ресурсов, загрязнение окружающей среды и др. В настоящее время проведение геологоразведочных работ, строительство и эксплуатация скважин предполагают решение вопросов рационального природопользования, охраны и рационального использования недр, оценки воздействия этих работ на окружающую среду [1]. Природные ресурсы, не обладающие высокой способностью к самовосстановлению, требуют бережного к ним отношения и строгого соблюдения охранных мер, направленных на рациональное и полное использование, предупреждение их порчи, сокращение потерь при разведке, добыче, а также сохранение участков недр при строительстве скважин [2]. На современном этапе развития нефтяной промышленности России повышению эффективности и безопасности ведения строительных работ необходимо уделять особое внимание. Это связано, в первую очередь, с тем, что строительство скважин всегда вызывает те или иные отклонения от состояния природного экологического равновесия. Нарушения, изменения природной обстановки неизбежны даже при самом тщательном соблюдении всех норм и правил строительного производства. Поэтому проблема обеспечения экологической безопасности при строительстве и эксплуатации скважин весьма актуальна.

В настоящее время остро обозначены вопросы качественного строительства скважин, а также выбора технологий буровых растворов применительно

к сохранению естественной проницаемости нефтегазовых пластов и последующего освоения скважин. Скважина — основной производственный объект добычи, средство воздействия на продуктивные пласты и их дренирование, а без полноценно построенных качественных скважин невозможно обеспечить эффективное извлечение флюида из пласта.

Одним из опасных проявлений строительного техногенеза является загрязнение призабойной зоны пласта (ПЗП). ПЗП является сложной технической системой, основным звеном скважины, через которую происходит добыча нефти. Совершенно очевидно, что ее физические характеристики — коэффициенты проницаемости и др. — обусловлены не только фильтрационноемкостными параметрами, но и процессами, протекающими в ней начиная с первичного вскрытия. При любом технологическом воздействии на пласт: вскрытии, строительстве, освоении скважины — происходит как частичная, так и полная кольматация пористой среды в зависимости от проницаемости породы твердой фазой бурового раствора и его фильтратом. Кольматируется ПЗП фильными и фобными веществами, мехпримесями, продуктами коррозии и др. Степень кольматации коллектора зависит от химического состава, свойств и типа бурового раствора, а также его дисперсной фазы. Фактически это первичное загрязнение пористой среды и определяет продуктивность скважины в дальнейшем, а затем все последующие загрязнения увеличивают эту степень: чем ниже проницаемость, тем выше степень кольматации коллектора [3]. В связи с этим возникает задача — обратить внимание на изменение состояния ПЗП в момент вскрытия, а также завершающего этапа строительства скважин; использовать такие технологии буровых растворов, которые в наименьшей степени снижали бы проницаемость ПЗП при строительстве, чтобы в дальнейшем не нанести вред окружающей среде.

Современный подход к проектированию качественного строительства скважин предполагает: анализ влияния загрязнения ПЗП используемыми на практике буровыми растворами в процессе бурения с целью дальнейшей оценки эффективности строительства и последующей безопасной эксплуатации скважины с учетом экспериментальных исследований.

При строительстве скважин часто приходится применять очень большое количество разнообразных технологий буровых растворов. Американские исследователи полагают, что существуют следующие основные виды загрязнения пласта: реакция глин, содержащихся в нем, с водой, поступающей из бурового раствора, с последующим набуханием глин; кольматация пор пласта твердыми частицами глинистого раствора. Очевилно, это только часть факторов, которые определяют падение проницаемости ПЗП. Сюда, кроме ранее названных, могут быть отнесены многочисленные поверхностноактивные вещества, которые применяются для обработки буровых растворов с целью изменить те или иные их показатели. Поэтому, зная основные причины снижения проницаемости в ПЗП в естественных условиях, можно если и не предотвратить их влияние, то хотя бы максимально снизить их негативный эффект [4]. Но, к сожалению, все известные технологии буровых растворов отрицательно влияют на пласт и не в состоянии полностью предотвратить загрязнение ПЗП. Так, например, вскрытием продуктивных пластов буровым раствором на водной основе не удается обеспечить сохранения естественной проницаемости продуктивного коллектора, так как происходит вытеснение нефти фильтратом бурового раствора вглубь пласта и кольматация пор глинистой фазой и высокомолекулярными органическими и гетероорганическими соединениями. Стремление к снижению значения показателя фильтрации бурового раствора путем ввода в его состав полимерных высокомолекулярных соединений не позволяет сохранить продуктивность пласта. Это связано с тем, что они проникают в поры пласта в составе фильтрата, адсорбируясь на стенках пор и образуя стойкие полимерные пленки, снижают их проницаемость [5].

Проблема повышения качества вскрытия продуктивных пластов и экологической безопасности строительства скважин может быть решена путем использования таких технологий буровых растворов, компоненты которых при проникновении в ПЗС пласта в наименьшей степени снижали бы ее проницаемость для углеводородов в условиях конкретного объекта вскрытия. С целью сохранения коллекторских свойств продуктивного пласта в рецептуру буровых растворов для первичного вскрытия должны входить разрушающиеся или растворимые реагенты для регулирования вязкости и показателя фильтрации и, особенно, закупоривающие агенты определенного гранулометрического состава, которые ограничивают фильтрацию в пласт и гарантированно могут быть из него удалены. Перспективными технологиями являются технологии буровых растворов, основными компонентами которых выступают полисахаридные полимеры (крахмал, биополимеры, КМЦ, PAC-R/LV и др.). Они наиболее эффективны для регулирования фильтрационных и реологических свойств безглинистых и малоглинистых буровых растворов. Преимущество их состоит в способности к химической и биологической деструкции, за счет чего обеспечивается возможность разрушения и удаления кольматационного слоя, образующегося в процессе бурения, и практически полное восстановление коллекторских свойств пласта. Добавление мраморной крошки в сочетании с полисахаридными реагентами обеспечивает надежную кольматацию пристенной зоны скважины. При этом требуются исследования степени их воздействия на окружающую среду с целью сведения к минимуму загрязнения на ПЗП в период строительства и эксплуатации скважин.

В качестве объектов исследования были использованы:

а) буровые растворы, имеющие в своем составе как глинистые, так и безглинистые минералы. Буровые растворы имели следующий состав, кг/м<sup>3</sup>: биополимер — 3...5; каустическая сода — 0,5...1; кальцинированная сода — 1; оксид магния — 5; хлорид калия — 50...150; модифицированный крахмал — 12...15; PAC-R — 1...2; PAC-SL — 2...4; формиат натрия — 50...70; мраморная крошка марки 50/75 — 50...200; биоцид — 1...2; пеногаситель — 0,2...0,3; ПАВ — 1...2. Порядок ввода реагентов не влияет на конечные свойства бурового раствора. Показатели свойств ингибирующих биополимерных растворов следующие:  $\rho = 1,12...1,16 \text{ г/см}^3$ ; T = 25...35 c;  $\eta = 8...15 \text{ мПа} \cdot \text{c}$ ; ДНС = 80...140 дПа;  $CHC_{1/10}$  = 10...20/15...40 дПа; водоотдача  $(API) = 4...6 \text{ cm}^3$ ; pH = 9...10; MBT = 20....30 кг/м<sup>3</sup>; термостойкость равна 110...120 °C. Буровые растворы с данными свойствами рассматривались под номерами № 2 и 4. Для сравнения влияния буровых растворов на коллекторские свойства продуктивного пласта также применяли пресные глинистые растворы № 1, 1П и 3, которые используются в настоящее время в массовом бурении в Сибирском регионе и вызывают кратное снижение продуктивности

скважин. Для улучшения кольматирующих свойств в раствор № 3 была добавлена мраморная крошка;

б) керн малой проницаемости (1...20 мД) из юрских отложений, отобранный с различных месторождений Западно-Сибирского региона. При традиционной технологии вскрытия притоки нефти из юрских отложений Западно-Сибирского региона в малопроницаемых продуктивных песчаниках оценивались как непромышленные. Поэтому рациональное воздействие на ПЗП и выбор технологии бурового раствора приобретает в этих условиях решающее значение.

Исследование влияния эффективных технологий буровых растворов на кольматацию призабойной зоны пласта проводили, моделируя загрязнение и очистку пласта с помощью химических реагентов. Подготовка образцов осуществлялась по общепринятой методике ОСТ 39-195—86. В приготовленные по этой методике образцы закачивали исследуемые буровые растворы при пластовых условиях и температуре 80 °C.

В экспериментах использовали: масло ООО «ЛУКОЙЛ — Волгограднефтепереработка», керосин и модель пластовой воды со следующим составом: СГ —  $101175,0\,\,\mathrm{mr/\pi};\,\,\mathrm{Ca^{2+}} - 15230,4\,\,\mathrm{mr/\pi};\,\,\mathrm{HCO_3^-} - 132,4\,\,\mathrm{mr/\pi};\,\,\mathrm{Mg^{2+}} - 3526,4\,\,\mathrm{mr/\pi};\,\,\mathrm{Na^+} + \mathrm{K^+} - 41450,6\,\,\mathrm{mr/\pi},\,\,\mathrm{общая}\,\,\mathrm{минерализация}\,\,161,42\,\,\mathrm{г/\pi};\,\,\mathrm{pH} = 6.\,\,\mathrm{«Мертвое»}\,\,\mathrm{пространство}$  составило по  $2,4\,\,\mathrm{cm^3}$  до и после образца, всего  $4,8\,\,\mathrm{cm^3}$ .

На рис. 1 и 2 приведены результаты исследований по воздействию различных систем буровых растворов (различные типы, свойства и специальные добавки) на образцы керна Западно-Сибирского региона: на рис. 1 — зависимость изменения давления от объема закачанного бурового раствора, а на рис. 2 — зависимость изменения проницаемости от объема бурового раствора.

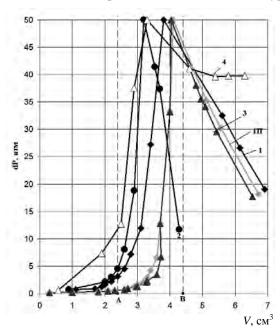


Рис. 1. Зависимость давления от объема закачанного бурового раствора: 1 — буровой раствор № 1; 2 — № 2; 3 — № 4; А — мертвое пространство; В — остановка закачки

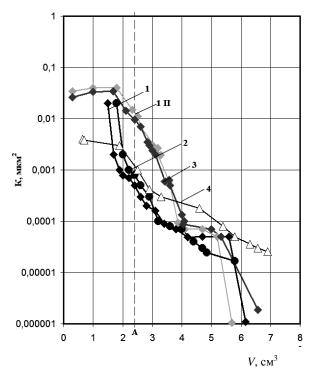


Рис. 2. Зависимость проницаемости от объема: 1 — буровой раствор № 1; 2 — № 2; 3 — № 4; А — «мертвое» пространство

Воздействие буровых растворов на пористую среду в исследуемых образцах показало, что независимо от перепада давления и исходной проницаемости при соприкосновении бурового раствора с поверхностью пористой среды в течение 3...9 мин происходила ее закупорка, за это время на торце образца формировалась корка из твердой фазы бурового раствора. Только в случае с глинистыми растворами через образовавшуюся корку при перепаде давления  $\Delta P \geq 2,0$  МПа и выше в пористую среду поступал фильтрат бурового раствора, а на безглинистых растворах с мраморной крошкой после формирования корки фильтрат бурового раствора не поступал в пористую среду даже при превышении давления более 5,0 МПа (кривая 2). Толщина образовавшейся глинистой корки на торце образца растворов № 1, 1П и 3 составила 2 мм, в то время как толщина корки от растворов № 2 и 4 значительно меньше.

Из полученных данных (см. рис. 1 и 2) видно, что наиболее полно закольматировалась пористая среда, в которую поступал буровой раствор, имеющий твердые частицы разных размеров, а в глинистых растворах дисперсная фаза более однородная, и тем самым пропускная способность раствора выше и выше загрязнение коллектора.

Образовавшаяся плотная устойчивая корка бурового раствора не разрушается при различных работах, предохраняет глубокую кольматацию коллектора при цементировании скважин и тем самым предотвращает загрязнение пласта намного сильнее, чем тогда, когда корка неустойчива. Плотная закупорка пористой среды мраморной крошкой предотвращает попадание

фильтрата бурового раствора в глубь пласта и кольматацию естественных пористых сред (см. рис. 2, кривая 2). Кроме того, в фильтрате данных растворов содержался специальный ПАВ, который эффективно гидрофобизировал стенки каналов пласта, повышая их проводимость по нефти.

Исходя из экспериментов (см. рис. 1 и 2), наиболее эффективным раствором для вскрытия продуктивных пластов является безглинистый N 2. При соприкосновении с твердой поверхностью кольматация пласта происходит мгновенно (см. рис. 1, кривая 2).

На основе проведенных нами экспериментальных исследований было показано влияние эффективных технологий ингибирующих биополимерных систем на загрязнение призабойной зоны пласта, а также то, что применение исследуемых промывочных жидкостей позволит на 70...80 % сохранить естественную проницаемость пласта, снизить загрязнение ПЗП, улучшить технологию строительства скважин, повысить продуктивность малопроницаемых пластов и создать условия для дальнейшей безопасной эксплуатации скважины.

В основу экологически безопасного строительства и эксплуатации нефтяных скважин должны быть положены следующие альтернативы: минимизация негативных воздействий на продуктивные пласты, естественные экологические системы и природные ландшафты; восстановление и поддержание их свойств; использование экологически безопасных технологий строительства; использование экологически безопасного для строительства сырья (промывочные жидкости, тампонажные растворы); применение безотходных технологий.

Очень важно подчеркнуть, что устойчивое экологически безопасное строительство возможно лишь в условиях, когда воздействие на окружающую природную среду остается в пределах экологической емкости биосферы и полностью обеспечивается ее биотическим потенциалом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Цветкова Л.И., Алексеев М.И., Жукова Л.И. Экологическое мировоззрение необходимое условие перехода к ноосфере // Мат. Международ. конф. СПб : СПбГУ, 1996. С. 3— 5.
- 2. Передельский Л.В., Приходинко О.Е. Строительная экология. Ростов н/Д : Феникс, 2005. 326 с.
  - 3. Юркив Н.И. Физико-химические основы нефтеизвлечения. М.: ВНИИОЭНГ, 2005. 366 с.
- 4. Ибрагимов Л.Х., Мищенко И.Т., Челоянц Д.К. Интенсификация добычи нефти. М. : Наука, 2000. 414 с.
- 5. *Близнюков В.Ю.*, *Ботвинкин В.Н.*, *Юркив Н.И*. Влияние буровых растворов на основе реагентов, полученных из зернового сырья, на коллекторские свойства продуктивных горизонтов // Строительство нефтяных скважин на суше и на море. 2006. № 10. С. 18—20.

© Диденко В.Г., Мельникова Т.В., 2009

Поступила в редакцию 19.04.09

УДК 001.895:[69+502.17]

#### И.В. Стефаненко

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ И ЭКОЛОГИИ В XXI ВЕКЕ

На основе анализа экономико-статистических данных, научных публикаций и патентной активности определены основные перспективные направления развития радиационных технологий в производстве строительных материалов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: строительные материалы; радиационные технологии.

The paper covers the main directions of the development of radiotechnologies in construction materials manufacturing.

K e y w o r d s: construction materials; radiotechnologies.

Одно из важнейших направлении в радиационно-химической технологии — разработка научных и инженерных основ создания новых дешевых и экологически чистых строительных материалов и изделий [1—9]. Интенсивное развитие работ в данном направлении в нашей стране и за рубежом подтверждается опубликованными оригинальными и обзорными работами, а также материалами всероссийских и международных конференций [10—16]. Такое развитие обусловлено положительными результатами исследований; промышленной конъюнктурой, определяемой технико-экономическими преимуществами производства и сбыта материалов.

В связи с повышенным интересом в последнее время к проблеме снижения гамма-фона в помещениях исследована группа радиационно-модифицированных материалов. В результате анализа установлено, что такие композиты имеют очень низкие (< 30 Бк/кг) радиационные показатели [17]. Это обстоятельство позволило сделать вывод: такие материалы могут быть широко использованы в строительстве жилищ со значительно низким гамма-фоном или служить защитным средством в эксплуатируемых помещениях для нормализации радиационной обстановки.

В настоящее время с использованием радиационной технологии в мире производится продукции на сумму несколько миллиардов долларов в год при ежегодном темпе роста 15...20 % [9]. Радиационная технология проникает в разные отрасли промышленности, среди них: очистка газовых выбросов, обработка целлюлозы, термическая переработка горючих ископаемых, стерилизация медицинских препаратов и кормов сельскохозяйственных животных, утилизация отходов промышленных предприятий и др. [15, 18—21].

Развитие радиационной технологии в настоящее время обусловлено высокой энергетической эффективностью излучения, приводящей к существенному энергосбережению по сравнению с традиционными видами технологий, высокой проникающей способностью излучения, возможностью дозирования излучения при обработке материалов, отсутствием загрязнения облученной продукции, возможностью утилизации отходов производств и получения готовых изделий с очень низкой эффективной удельной активностью.

Значительное в последнее время повышение мировых цен на топливо, в частности на углеводородное, и электроэнергию (по сравнению, например, с

1990 г. в 6 раз) привело к повышению цен на сырье для производства пластмасс и каучука. Эта ситуация послужила основной причиной новых тенденций в использовании ионизирующих излучений: снижения расхода сырья, уменьшения отходов производства, повышения эффективности использования энергии и др.

Все это, а также опыт создания и эксплуатации промышленных уустановок и установок с ускорителями электронов, позволило к концу XX в. перейти к серийному выпуску ускорителей и у-установок [9].

Общая мощность радиационных установок в конце 1998 г. составила ~38 МВт, в т.ч. установок с ускорителями электронов — более 24 МВт. Следует подчеркнуть, что вводятся в эксплуатацию установки со все более высокой мощностью, а это влияет на производительность выпускаемой продукции и экономику процесса [18].

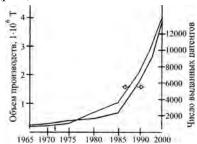
Радиационная технология получила широкое развитие в области модифицирования обычных строительных материалов с синтетическими моноили олигомерами с последующей радиационной полимеризацией их в пористой структуре. Работают γ-установки по модифицированию бетона, паркетной планки, оконных рам, полиэтиленовых сантехнических изделий (труб и радиаторов), манжет и пленок, искусственного мрамора и прессованных волокнистых материалов из биомассы растительного происхождения. Большой объем производства создан по выпуску поропластов, резиновых самослипающихся изоляционных лент (табл.).

Эффективными и технически оправданными являются процессы радиационного отверждения лакокрасочных покрытий на изделиях из древесины, металла, пластмассы и других материалов. Этот метод позволяет увеличить скорость процесса сушки, ликвидируя шлифовку и полировку, сократить производственные площади, расход сырья и материалов. Указанные процессы нашли широкое применение в различных странах мира [10—13, 15, 16—18, 21—28].

То или иное развитие промышленности и техники характеризуется патентной активностью. Рассматривая перспективы развития затронутой проблемы, следует подчеркнуть, что число выданных патентов за последние 10 лет выросло более чем на 6000. Анализируя тенденцию роста производства материалов, заметим, что интенсивность их изготовления значительно увеличилась с 70-х гг., а расширение способов, методов и устройств переработки материалов, как следствие активной изобретательской работы в этой области, — с 80-х гг. прошлого века. Объем производства и интерес к этим работам, судя по увеличивающемуся объему публикаций, продолжают нарастать (рис.).

Прогнозирование развития и применение высоких технологий с источниками ионизирующих излучений в строительной индустрии и экологии показывает, что эта область в XXI в. будет быстро расти по сравнению с 1990 г. [29].

Основными стимулирующими факторами развития являются: возможность получения новых композиционных материалов с высокими физико-техническими параметрами и ор-



Рост мирового объема производства модифицированных материалов и изделий и числа выданных патентов в 1965—2000 гг.

ганизация безотходного производства, широкого использования отходов промышленности; высокая коммерческая выгода; экологическая чистота (отсутствие загрязнения воздуха и воды); возможность организации производства практически в любых районах мира [29].

Сроки реализации радиационных технологий в производстве строительных материалов и изделий по странам мира

|  | Страны    |                |          |       |       |        |         |        |       |            |        |        |      |       |         |           |         |              |        |           |        |
|--|-----------|----------------|----------|-------|-------|--------|---------|--------|-------|------------|--------|--------|------|-------|---------|-----------|---------|--------------|--------|-----------|--------|
| Материалы,<br>изделия,<br>процессы   | Австралия | Великобритания | Германия | Дания | Индия | Италия | Испания | Канада | Китай | Нидерланды | Польша | Россия | CHIL | CIIIA | Таиланд | Финляндия | Франция | Чехословакия | Швеция | Югославия | Япония |
| Радиацион-<br>но-<br>модифици-<br>рованные<br>древесно-<br>полимерные<br>материалы               | 1973      | 1966           | 1967     | 1964  | 1969  | 1971   | 1973    | 1967   |       | 1967       | 1967   | 1959   | 1959 | 1965  | 1961    | 5961      | 1961    | 1974         |        | 1967      | 1967   |
| Бетонополи-<br>мерные<br>материалы   |           | 6961           | 1970     | 1987  |       | 1974   |         | 1972   | 6861  |            |        | 6961   |      | 5961  |         |           | 6961    |              | 1972   | 9261      | 1972   |
| Отверждение лакокрасоч-<br>ных покры-<br>тий   | 1969      | 1969           | 1968     | 1970  |       | 1972   | 1970    | 1975   | 1990  | 1967       | 1969   | 1966   | 1966 | 1966  | 1972    | 1968      | 1967    | 1971         |        | 1972      | 1967   |
| Гипсополи-<br>мерные<br>материалы<br>(искусствен-<br>ный мрамор)                                 | 1991      | 1994           | 1973     |       | 1994  |        |         |        |       |            |        | 1989   | 1990 | 1979  |         |           | 1987    |              |        |           | 1979   |
| Волокнистые модифици-<br>рованные<br>материалы   |           | 1984           | 1983     |       | 1992  |        |         | 1997   |       | 1996       | 1986   | 1985   |      | 1986  |         | 1985      | 1983    |              |        |           | 1979   |
| Полиэтиле- новые тер- моусаживае- мые трубки, манжеты, муфты и матрицы для формирова- ния бетона |           | 1969           | 1972     | 1971  | 1969  | 1974   | 1973    | 1968   |       | 1975       | 1976   | 1963   | 1964 | 1965  | 1968    | 1969      | 1970    | 1974         | 1974   |           | 1972   |
| Сантехниче-  |           | 1974           | 1977     |       |       | 1979   |         |        | 1993  |            |        | 1975   |      | 1971  |         |           | 1976    |              |        |           | 1978   |
| Теплоизоля-<br>ционные<br>материалы  |           | 1964           | 1971     | 1978  | 1978  |        | 1974    | 1978   |       | 1976       |        | 1981   | 1984 | 1978  | 1980    | 1979      | 1972    | 1979         | 1972   | 1978      | 1965   |
| Резиновые ленты и термостой- кие материа- лы   | 1974      | 1979           | 1968     | 1978  | 1970  | 1969   |         | 1968   |       |            | 1977   | 1965   |      | 1961  |         |           | 1970    | 1974         | 1976   |           | 1974   |
| Радиацион-<br>но-<br>модифици-<br>рованные<br>бумажные<br>материалы                              |           | 1975           | 1978     |       |       |        |         | 1978   |       | 1976       |        |        | 1972 | 1973  |         | 1977      | 1977    |              |        |           | 1974   |

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Основы радиационно-химического аппаратостроения / Брегер А.Х. и др. М. : Атомиздат, 1967. 498 с.
- 2. Козлов Ю.Д., Никулин К.И., Титков Ю.С. Расчет параметров и конструирование радиационно-химических установок с ускорителями электронов. М.: Атомиздат, 1976. 176 с.

- 3. *Ширяева Г.В., Козлов Ю.Д.* Технология радиационного отверждения покрытий. М. : Атомиздат, 1980. 74 с.
- 4. Борисов Е.А., Райчук Ф.З., Ширяева Г.В. Технология радиационно-химического производства бетонополимерных и древесно-пластмассовых материалов. Серия РХТ. Вып. 12. М. : Энергоатомиздат, 1982. 48 с.
- 5. *Рудой Б.А.*, *Путилов А.В.* Радиационная технология за рубежом. М.: Энергоатомиздат, 1982. 60 с.
- 6. *Мелешевич А.Л.* Методы радиационной химии в производстве и модификации бумаги. М.: Энергоатомиздат, 1983. 52 с.
  - 7. Баженов Ю.М. Бетонополимеры. М.: Стройиздат, 1983. 52 с.
- 8. Финкель Э.Э., Карпов Б.Л., Берлянт С.М. Технология радиационного модифицирования полимеров. М.: Энергоатомиздат, 1983. 44 с.
- 9. Козлов Ю.Д., Путилов А.В. Технология использования ускорителей заряженных частиц в индустрии, медицине и сельском хозяйстве. М.: Энергоатомиздат, 1997. 470 с.
- 10. Transactions of the First International Meeting on Radiation Processing // Radiation Physics and Chemistry. 1977. Vol. 9. N<sub>2</sub> 1—6.
- 11. Transactions of the Third International Meeting on Radiation Processing // Radiation Physics and Chemistry. 1981. Vol. 1—2. № 1, 2. Vol. 18. № 3—6.
- 12. *Пикаев А.К.* V Международная конференция по радиационной технологии // Химия высоких энергий. 1985. Т. 19. № 2. С. 187490.
  - 13. Processinge 2-nd World Congress Of Chemical Engineering. Montreal, Canada, 1981. Oct. 4—9.
- 14. Тезисы докладов Второго Всесоюзного совещания «Радиационная технология и радиационное аппаратостроение» (26—30 сентября 1983г.). М. : ВНИИРТ, 1983. 87 с.
- 15. Доклады Четвертого Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве (Ленинград, 28—30 сентября 1982г.). Л. : НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 1982. Т. 1—4. 1045 с.
- 16. Колотыркин Я.М. Успехи и перспективы развития радиационной химии // «Радиационная химия и технология мономеров и полимеров» : сб. научн. тр. Киев : Наук. думка, 1985. С. 5—13.
- 17. Cudeльникова~O.П. Радиационный контроль в строительной индустрии. М. : ACB, 2002. 207 с.
- 18. Transactions of the Second International Meeting on Radiation Processing // Radiation Physics and Chemistry. 1979. Vol. 14.  $N_2$  1—6.
- 19. Тезисы докладов Пятого Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве (Ленинград, 22—24 октября 1985 г.). М. : ЕрИИатоминфом, 1985. 295 с.
- 20. 7-th International Meeting on Radiation Processing // Invited Papers. April 23—28. Center, The Netherlands, 4989.
- 21. Указатель отечественных и зарубежных материалов. Серия Радиационная техника. М.: ЦБПИНатоминформ, 1984—1990.
- 22. Козлов Ю.Д., Малый В.Т. Основы радиационной технологии в производстве строительных материалов. Киев: УМПК ВО, 1992. 238 с.
- 23. Industrial Applications of Radioisotopes and Radiation Technology. Grenoble, 1981. 28 September—2 October.
- 24. Lya V.K. Radioisotopes and raidiation technology // CKW Chem. Eng. World. 1984. V. 19. N 9. P. 71—78.
  - 25. Механическая технология древесины. Минск: Вышэйш. шк., 1980. Вып. 10. 238 с.
- 26. Singer K., Vinther A.A. Perfomance test of world plastic parquet Danish Atomic Energy Comission / Research Establishment Disc. Denmarc, RIGO M. 1972. 1523. 34 p.
- 27. Якунин Н. К. Новые эффективные материалы и изделия из древесного сырья за рубежом. М.: Лесн. промышленность, 1974. С. 83.
- 28. Козлов Ю.Д. Радиационно-химическая технология в производстве строительных материалов и изделий. М.: Энергоатомиздат, 1989. 101 с.
- 29. Высокие технологии с использованием источников ионизирующих излучений в промышленности / Ю.Д. Козлов, И.В. Стефаненко, С.В. Ермолаев и др. М. : Энергоатомиздат, 2006. 715 с.

© Стефаненко И.В., 2009

УДК 620.3:621.644:696/697

#### Ю.Ф. Полковников, В.С. Новиков, Л.С. Полковникова

### НАНОТЕХНОЛОГИЯ СООРУЖЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ БЕЗ ТРУБ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО ОБЖИГА ГРУНТА С КОМПЛЕКСНОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИЕЙ ПОЛОСЫ ОТВОДА ПОД ТРУБОПРОВОД

Освещены проблемы создания новой экологически и технически безопасной нанотехнологии прокладки инженерных сетей без труб. Приведено описание технологии сооружения трубопроводов методом плазменного обжига грунта под землей в щели за современным рыхлителем. Обоснован выбор предприятий Волгоградской области и Чувашии в качестве базы опытного производства новой техники.

К лючевые слова: трубопроводы; спекание грунта; бестраншейная прокладка труб; плазменный обжиг грунта; беструбная технология прокладки инженерных систем, нанотехнологии.

Construction of pipeline from separate pipes is difficult, dangerous and time — taking field of construction. Nanotechnology of pipeline without pipes done by method of plasma annealing is revolutionary and up to-day.

K e y w o r d s: pipelines; soil sintering; pipe driving; plasma burning of soil; pipeless technology of engineering systems laying, nanotechnologies.

Инженерные сети, трубопроводы из отдельных труб — одна из ведущих отраслей строительного производства. В России ежегодно прокладывается более 70 тыс. усл. км трубопроводов из чугунных, асбестоцементных, бетонных, железобетонных, керамических и других труб [1, 2]. В стране действует разветвленная сеть заводов-гигантов по производству отдельных труб из различных материалов, а существующая технология определяет их сложную доставку к траншее, не гарантирующую их качество. Сложны испытания труб и их подготовка к монтажу в полевых условиях. Непосредственно монтаж труб в трубопровод — это весьма тяжелый, опасный и вредный физический труд на дне траншеи [2]. Механизация работ сооружения инженерных сетей из отдельных труб составляет 40...60 % против 95...98 при прокладке стальных магистральных трубопроводов. Только крепеж боковых стенок траншеи по требованиям техники безопасности стоит более 1 млн р. на километр траншеи [2]. Все это недопустимо в XXI веке — следует кардинально менять всю технологию, обеспечить переход к нанотехнологии с наноматериалами на базе новейшей техники.

Бестраншейный способ прокладки инженерных сетей без использования отдельных труб, спеканием грунта под землей на объемном профиле-камере плазменного обжига в щели непосредственно за зубом современного рыхлителя типа Т-800, 1200, Д-10 «КАТ» — это абсолютная новация, нанотехнология с получением наноматериала типа керамического трубопровода. По оценкам ученых и специалистов прикладные исследования и разработки технологии сооружения трубопровода без труб методом плазменного обжига грунтов полностью завершатся к 2020-м годам, поэтапное внедрение в строительное производство — к 2030 г. [2—5].

Ученые и профильные специалисты Института транспортного строительства (ИТС) ВолгГАСУ экспериментально доказали, что 60 % грунтов

Юга России поддаются спеканию при высокотемпературном обжиге. На глубине заложения трубопроводов такие грунты и особенно суглинки, глины и тяжелые глины устойчиво держат форму режущего их рабочего органа: рыхлителя, дреноукладчика, кабелеукладчика и других строительно-дорожных машин (СДМ). Проведенные авторами эксперименты с суглинками и глинами, взятыми с глубины типового трубопровода (1,5 м, Светлый Яр, Волгогр. обл.), по обжигу в заданном поперечном сечении создаваемого отрезка трубы в лабораторной печи до достижения устойчивой формы показали следующие результаты:

спекание грунта происходит при температуре 160...180 °C, пластичность расплава начинается с 400...500 °C;

несущая способность опытных образцов труб колеблется в пределах  $90...100~{\rm k\Gamma c/cm^2}$ , что соответствует нормативным требованиям СНиП к трубопроводам-водопроводам;

испытания опытных образцов труб, полученных методом плазменного обжига, на герметичность и плотность подтвердили пригодность таких трубопроводов для техводопровода и транспортирования агрессивных сред: сточных вод, нефти и газоконденсата, удобрений в растворах и др.

Многолетний положительный опыт ИТС ВолгГАСУ в области трубопроводного строительства [1, 2, 6, 7], результаты экспериментальных исследований позволили сформулировать пионерную инженерную идею и разработать новую технологию сооружения трубопроводов без труб на уровне патентной проработки с заявкой на способ [4]. Научно-прикладная разработка сооружения инженерных сетей без труб методом плазменного обжига грунта на глубине заложения трубопровода представлена принципиальной схемой на рис. 1. Рассмотрим новую технологию и средства ее реализации в практике трубопроводного строительства подробнее.

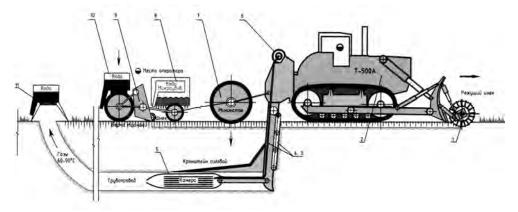


Рис. 1. Логическая схема технологии бестраншейной прокладки трубопроводов плазменным методом: I — бульдозерно-шнековое оборудование (режущий шнек авторской конструкции); 2 — бульдозер на базе T-500A; 3 — режущая цепь (землеройная фреза авторской конструкции); 4 — однозубый рыхлитель авторской конструкции; 5 — камера плазменного обжига стенок формируемого трубопровода; 6 — установка высокотемпературных газов; 7 — мини-каток уплотнения грунта в зоне щели; 8 — агрегат высева трав с поливом микроудобрениями; 9 — мини-бульдозер присыпки высеянных трав почвой; 10 — мини-каток с водяным балластом уплотнения и полива посадки; 11 — решетка для подогрева емкостей с водой отработавшими газами

Ведущая базовая машина нового комплекса — это мощный, сверхмощный однозубый (в перспективе многозубый) рыхлитель из номенклатурного ряда системы СДМ: от ДЭТ-250А Челябинского завода дорожных машин и семейства промышленных тракторов Т-300-1200 с рыхлительнобульдозерным оборудованием Чебоксарского тракторного производства до профиля СДМ «Комацу» (Япония) и бульдозера-рыхлителя Д-10 «Катерпиллер» (КАТ, США) и т.п. Рыхлитель Д-10 «КАТ», например, позволяет за один проход прорезать в каменистом грунте щель шириной 560 мм и глубиной до 1.8 м.

Авторы предлагают на уровне изобретения новую конструкцию режущего шнека *I* на маятниковой подвеске перед отвалом серийного бульдозерного оборудования (T-500A) для срезания плодородного слоя почвы на глубину до 500 мм и перемещения его в боковые резервы полосы отвода под трубопровод — это первый этап экологической защиты сельхозугодий при прокладке через поля инженерных сетей [3, 5].

Авторская конструкция рыхлителя 4 имеет внутри тела зуба полый канал из жаропрочной стали для подачи высокотемпературных газов от плазматрона 6 в камеру 5 плазменного обжига стенок формуемого под землей трубопровода. Рыхлитель 4 спереди имеет режущую цепь 3 (землеройная фреза) авторской конструкции с объемным гидроприводом для силового рыхления грунта перед зубом рыхлителя, т.е. снижения энергоемкости разработки щели в грунте на глубине.

Камера 5 служит для формования трубопровода методом плазменного обжига его стенок до требуемой несущей способности. Корпус камеры 5 авторской разработки выполнен из титанового сплава и имеет перфорированную поверхность для равномерного распределения высокотемпературных газов. На теле зуба рыхлителя 4 сзади имеется силовой кронштейн для снятия давления грунта засыпки в щели на камеру 5, который уплотняет мини-каток 7. Таким образом, стабилизируется технологический процесс создания в проектных отметках трубопровода методом непрерывного плазменного обжига. Избыток отработавших газов из камеры 5 выходит на дневную поверхность уже по созданному (обожженному) трубопроводу и может с успехом использоваться для технологических и бытовых нужд. Например, для подогрева поливной воды с микроудобрениями в сменной емкости 11 в холодное время года, т.к. температура отходящих газов достигает 60...90 °C.

Авторская разработка агрегата комплексной качественной рекультивации полосы отвода под трубопровод скомпонована из трех несложных конструктивных устройств-блоков 8, 9, 10, как показано на рис. 1. Здесь первый блок — это мобильная установка 8 управляемого высева семян культурных трав с дозированным поливом водой с микроудобрениями. Второй блок — это мини-бульдозер 9 (плуг-скребок) для присыпки высеянных семян почвой из боковых резервов полосы отвода под трубопровод. Внутри плугаскребка 9 можно монтировать транспортирующий мини-шнек (лево-правосторонний) с гидроприводом. И третий блок — это миникаток 10 с водяным балластом для точечного уплотнения (кулачковый каток) почвы полосы отвода с поливом. Таким образом, реализуется полный цикл восстановления почвы и растений.

Опытные промышленные образцы новой техники предполагается изготовить и испытать на Волгоградском государственном тракторном заводе и в рамках создания комплекта сменных рабочих оборудований (идущих в серию) новых промышленных тракторов Т-800 и Т-1200 Чебоксарского головного предприятия по производству промышленных тракторов. Работу ИТС ВолгГАСУ в области создания нанотехнологии сооружения трубопроводов методом плазменного обжига грунтов на глубине одобрила Всероссийская научно-практическая конференция «Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития в условиях Волгоградской области» (ВолГУ, декабрь 2008 г.).

Возможности внедрения новой техники и нанотехнологии создания инженерных сетей без труб плазменным обжигом грунта весьма обширны, на рис. 2 приведены шесть базовых направлений использования новых разработок.



Рис. 2. Области применения новой технологии

Экономическая эффективность внедрения новой технологии очевидна, ее трудно переоценить: перепрофилирование 40...50 % заводов-гигантов, производящих сегодня отдельные трубы, на другую необходимую стране продукцию (долговременный эффект), снижение транспортных расходов и экономия подвижного состава, ликвидация практически всех сложных, опасных и трудоемких техпроцессов и оборудования и т.д. Принципиально новый уровень охраны труда, технической и экологической безопасности — это большой социальный эффект. Только мелиорация и ирригация сельскохозяйственного производства на полях Волгоградской области позволит сэконо-

мить сотни миллионов рублей ежегодно, а долговечность новых «гончарных трубопроводов» будет не меньше, чем у водопроводов Древнего Рима, сооруженных до новой эры из такой же глины.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Полковникова Л.С., Полковников Ю.Ф. Экология и безопасность в трубопроводном строительстве. Волгоград : АСОТ, АТС, 2007. 200 с.
- 2. Полковников Ю.Ф., Полковникова Л.С., Барковская А.Ю. Технология XXI века прокладки инженерных сетей в строительстве // Строит. матер., оборуд., технологии XXI века. 2008. № 6. С. 66—67.
- 3. Полковников Ю.Ф., Полковникова Л.С., Новиков В.С. Экологически и технически безопасная технология XXI века прокладки наружных трубопроводов / Актуал. пробл. БЖД. Интеграция науки и практики : сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конфер. Ставрополь : СГУ, Сервисшкола, 2008. С. 166—167.
- 4. Полковников Ю.Ф., Новиков В.С., Голев С.А. Способ прокладки трубопроводов плазменным методом // Патенты России : бюлл. М. : ВНИИГПЭ, 2009. 23 с.
- 5. Нанотехнология XXI века экотехнически безопасной, бестраншейной прокладки трубопроводов плазменным методом с комплексной рекультивацией полосы отвода / Ю.Ф. Полковников, Л.С. Полковникова, В.С. Новиков, С.А. Голев // Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития в условиях Волгоградской области: науч.-практ. конфер. // Труды ВолГУ. Волгоград: ВолгГУ, Адм. Волг. обл., 2009. С. 44—52.
- 6. *Пиунов Е.М.* Исследование технологии поточной прокладки трубопроводов : дис. ... канд. техн. наук. М. : МИСИ, 1987. 215 с.
- 7. Устройство для механизированного монтажа трубопроводов / В.А. Филатов, Ю.Ф. Полковников, В.Н. Шведов и др. // Экспресс информ. ЦБНТИ МВХ СССР : Водохоз-ное стр-во. Сер. 5, вып. 1. М. : ЦБНТИ МВХ СССР, 1976. 5 с.

© Полковников Ю.Ф., Новиков В.С., Полковникова Л.С., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

#### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.32:620.193 + 624.953:620.169.1

С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.А. Хрунов, Н.С. Касьяненко, В.Л. Смельцов

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОЗИЦИЙ РАСЧЕТНОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИИ БЕТОНА

Рассмотрены процессы коррозии бетона при действии жидких сред, способных растворять компоненты цементного камня. Разработана математическая модель, на основе которой выполнены расчеты с целью практической оценки срока службы защитного слоя.

K л ю ч е в ы е с л о в а: коррозия бетона; долговечность конструкций; надежность строительных материалов.

The authors consider concrete corrosion processes under the influence of liquid mediums capable of dissolving cement stone components. A mathematical model serving as a basis for the analysis aimed at practical evaluation of the protective layer service life is developed.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : concrete corrosion; durability of structures; reliability of construction materials, engineering structures.

Опыт эксплуатации конструкций из бетона, применяемых с конца 80-х гг. XIX в., показывает, что бетон по долговечности и надежности можно сравнить с природными каменными материалами. Но одновременно с этим встречаются случаи преждевременного разрушения бетона задолго до окончания проектного срока эксплуатации от действия грунтовых, речных, морских, а также сточных и производственных вод. Причина этого кроется в коррозионных процессах, которые наносят огромный ущерб строительному комплексу.

В связи с разнообразием агрессивных сред, с которыми может взаимодействовать бетон различных сооружений, и разнообразием условий такого взаимодействия возникла необходимость классификации процессов коррозии бетона с выделением групп по общим признакам и характеристикам процессов коррозии.

В 1952 г. профессором В.М. Москвиным была предложена классификация процессов коррозии. На основе полученных экспериментальных данных и накопленного опыта многочисленные процессы, протекающие при коррозии бетона, были разделены на три основных вида: первый, второй и третий.

Нами рассмотрены процессы коррозии бетона первого вида. К ним отнесены процессы, возникающие в бетоне при действии жидких сред, способных растворять компоненты цементного камня. Составные части цементного камня растворяются и выносятся из структуры бетона. Особенно интенсивно эти процессы могут протекать при фильтрации воды через толщу бетона.

Коррозия бетона первого вида редко встречается в чистом виде в естественных условиях. Обычно она сопровождается коррозией второго и (или) третьего вида, однако всегда можно выделить преобладающее действие какого-либо вида, а затем проследить и учесть роль вторичных для данного случая факторов. Для каждого вида коррозии могут быть установлены общие закономерности, а в соответствии с этим и общие мероприятия по борьбе с разрушением бетона, обеспечению долговечности и надежности сооружений из него.

В связи с этим весьма актуальным является вопрос получения аналитических зависимостей, описывающих явления коррозионного разрушения и позволяющих с помощью расчета определить как долговечность конструкции, так и ожидаемую глубину поражения бетона. Применение таких зависимостей позволит экономически обоснованно назначать средства защиты и устанавливать сроки их применения.

В [1, 2] изложены результаты разработки математической модели процесса коррозии бетона первого вида применительно к системе бетонный резервуар — жидкость.

Эта задача представлена уравнениями:

$$\frac{\partial C(x,\tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x,\tau)}{\partial x^2}, \ \tau > 0, \ 0 \le x \le \delta.$$
 (1)

Начальные условия:

$$C(x,\tau)\big|_{\tau=0} = C(x,0) = C_0.$$
 (2)

Граничные условия:

$$\frac{\partial C(0,\tau)}{\partial x} = 0;$$

$$k \frac{\partial C(\delta,\tau)}{\partial x} = \beta \left[ C_p(\tau) - C(\delta,\tau) \right],$$
(3)

где  $\beta$  — коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с;  $C_p(\tau)$  — равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг CaO/кг бетона; k — коэффициент массопроводности (диффузии), м²/с;  $C(x,\tau)$  — концентрация свободного CaO в бетоне в момент времени  $\tau$  в произвольной точке с координатой x, кг CaO/кг бетона;  $\delta$  — толщина стенки конструкции, м.

Согласно закону сохранения масс, поток массы вещества, выходящего с поверхности бетона, должен быть равен количеству вещества, прибывающему в жидкую фазу.

$$-S \cdot \rho_{\delta} \cdot k \cdot \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = V_{\mathfrak{K}} \cdot \rho_{\mathfrak{K}} \cdot \frac{\partial C_{\mathfrak{K}}(\tau)}{\partial \tau}. \tag{4}$$

Здесь левая часть — количество переносимого компонента через внутреннюю поверхность резервуара S,  $M^2$ ; правая часть — приращение массы компонента в объеме  $V_{\rm x}$  резервуара, M;  $\rho_{\rm b}$ ,  $\rho_{\rm x}$  — плотности бетона и жидкости соответственно, кг/м. Для получения обобщенных решений, удобных для качественного анализа процессов коррозии, введены безразмерные переменные вида

$$Z(\overline{x}, \operatorname{Fo}_m) = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0}, \ \overline{x} = \frac{x}{\delta}, \ \operatorname{Fo}_m = \frac{k\tau}{\delta^2}.$$
 (5)

С учетом некоторых преобразований краевая задача (1)—(3) преобразуется к виду

$$\frac{\partial Z(\overline{x}, \operatorname{Fo}_m)}{\partial \operatorname{Fo}_m} = \frac{\partial^2 Z(\overline{x}, \operatorname{Fo}_m)}{\partial \overline{x}^2}, \ \operatorname{Fo}_m > 0, \ 0 \le \overline{x} \le 1.$$
 (6)

Начальные условия:

$$Z(\overline{x},0) = 0. (7)$$

Граничные условия

$$\frac{1}{\text{Bi}_{m}} \cdot \frac{\partial Z(1, \text{Fo}_{m})}{\partial x} = \left[ Z_{p}(\text{Fo}_{m}) - Z(1, \text{Fo}_{m}) \right];$$

$$\frac{\partial Z(0, \text{Fo}_{m})}{\partial x} = 0.$$
(8)

Здесь  $\text{Ві}_m = \beta \cdot \delta / k$  — массообменный критерий Био. Окончательное решение краевой задачи (1)—(3), (4) для области малых значений чисел Фурье приведено в [2] и запишется в следующих выражениях:

1) профиль безразмерных концентраций переносимого компонента по толщине бетона в произвольный момент времени:

$$Z(\overline{x}, \operatorname{Fo}_{m}) = \frac{C_{0} - C(x, \tau)}{C_{0}} = \frac{\operatorname{Bi}_{m}}{1 + K_{m}} - \frac{\operatorname{Cos}(\mu_{n}\overline{x}) \exp(-\mu_{n} \operatorname{Fo}_{m})}{\mu_{n} \left[1 - K_{m} + \operatorname{Bi}_{m}\right] \sin \mu_{n} + \left[\mu_{n}^{2} - K_{m}\right] \cos \mu_{n}}; \tag{9}$$

2) средняя по толщине конструкции концентрация переносимого компонента в момент времени  $\tau$ , определяемый значением критерия  $Fo_m$ :

$$Z_{\text{cp}}(\text{Fo}_{m}) = \frac{\text{Bi}_{m}}{1 + K_{m}} - \frac{\sin \mu_{n} \exp(-\mu_{n} \text{ Fo}_{m})}{-2 \text{Bi}_{m} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_{n} \exp(-\mu_{n} \text{ Fo}_{m})}{\mu_{n} \cdot \left[ \mu_{n} (1 + \text{Bi}_{m} - K_{m}) \sin \mu_{n} + (\mu_{n}^{2} - K_{m}) \cos \mu_{n} \right]}; (10)$$

3) концентрация переносимого компонента в жидкой фазе:

$$Z_{\mathcal{K}}(\text{Fo}_{m}) = \frac{C_{0} - mC_{\mathcal{K}}(\tau)}{C_{0}} =$$

$$= 1 + 2\text{Bi}_{m} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_{n} \left[ 1 - \exp(-\mu_{n} \text{ Fo}_{m}) \right]}{\mu_{n} \left[ \mu_{n} \left( 1 + \text{Bi}_{m} - K_{m} \right) \sin \mu_{n} + \left( \mu_{n}^{2} - K_{m} \right) \cos \mu_{n} \right]}; (11)$$

здесь  $K_m = m \cdot \frac{G_{\text{бет}}}{G_{\text{ж}}}$  ( $G_{\text{бет}}$  и  $G_{\text{ж}}$ . — масса бетона и масса жидкости, кг);  $\mu_n$  —

корни характеристического уравнения  $\operatorname{ctg} \mu_n = \frac{\mu_n^2 - K_m}{\mu_n \cdot \operatorname{Bi}_m}$ .

На основе приведенной математической модели коррозии бетона первого вида нами были проведены исследования, которые показали адекватность разработанной математической модели реальному физическому процессу.

Объектом исследования являлся резервуар с водой для пожаротушения, выполненный из сборного железобетона.

Резервуар имеет в плане прямоугольную форму с общими габаритными размерами  $24,0 \times 24,0$  м. Отметка уровня днища резервуара — 3,4 м от условной планировочной отметки земли. Высота надземной части 0,9...1,2 м.

Каркас сооружения — сборный железобетонный, состоит из колонн и ригелей, объединенных жестким диском покрытия из сборных ребристых железобетонных панелей размером  $1.5 \times 6.0$  м. Стеновое ограждение — сборные железобетонные панели толщиной 400 мм.

При проведении натурного освидетельствования строительных конструкций резервуара воды для пожаротушения выявлены повреждения коррозионного характера: подтеки конденсата с признаками выщелачивания цементного камня (высолы), отсутствие защитного слоя бетона и коррозия арматуры.

По результатам обследования резервуара было установлено, что резерв защитной способности бетона по отношению к конструкционной арматуре к настоящему времени практически исчерпан.

Единственным условием для продления срока службы резервуара является создание эффективного защитного слоя бетона. Для практической оценки срока службы защитного слоя были выполнены расчеты по разработанной математической модели. Результаты расчетов приведены на рис. 1 и 2.

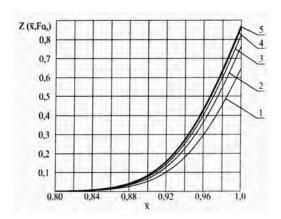


Рис. 1. Профили безразмерных концентраций в бетоне защитного слоя, мм: 1 — 30; 2 — 45; 3 — 60; 4 — 80; 5 — 90,  $Fo_m = 0.002$ 

В расчетах были приняты следующие значения толщины защитного слоя  $\delta$ : 30, 45, 60, 80 и 90 мм, соответствующие значениям массообменного критерия  $Bi_m$ : 30, 50, 70, 90 и 100.

Согласно результатам проведенных расчетов (см. рис. 1 и 2) концентрация гидроксида кальция на поверхности защитного слоя достигнет значения, соответствующего началу разложения высокоосновных составляющих бетона, при массообменном критерии  $Fo_m$ , равном: 0,0495; 0,0192; 0,0808; 0,0709 и 0,0042 соответственно.

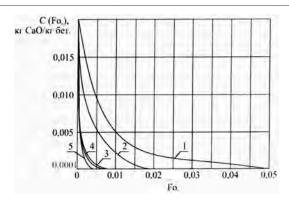


Рис. 2. Изменение концентрации гидроксида кальция на поверхности защитного слоя толщиной, мм: 1-10; 2-20; 3-25; 4-30; 5-40

Рассчитанным значениям массообменного критерия Фурье соответствуют временные значения:  $Fo_m = 0.0495 - 12$  лет; 0.0192 - 7.7; 0.0808 - 4.5; 0.0709 - 5; 0.0042 - 3.5 года.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие вывод: долговечность защитного слоя толщиной 50...100 мм (не более 7,7 лет) недостаточна для обеспечения межремонтного срока службы резервуара, равного 10 годам согласно требованиям эксплуатационной организации. С другой стороны, срок защитного действия в 12 лет обеспечивается при толщине покрытия 30 мм.

Необходимо отметить, что в течение этого срока будет отсутствовать необходимость в возобновлении или ремонте защитного слоя.

Срок службы защитного слоя бетона может быть увеличен за счет регулирования концентрации гидроксида кальция в жидкой среде.

Нами был проведен расчет по разработанной математической модели с начальным значением концентрации гидроксида кальция в жидкости 0,0071 кг  $CaO/m^3$  воды, что соответствует безразмерной концентрации  $Z_* = 0,9$ .

Результаты расчетов приведены на рис. 3 и 4.

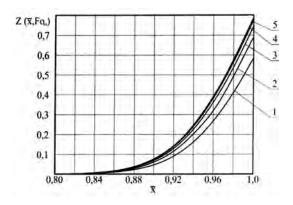


Рис. 3. Профили безразмерных концентраций в бетоне защитного слоя толщиной, мм: 1-30; 2-45; 3-60; 4-80; 5-90

Из рис. 4 видно, что наименьшее значение концентрации гидроксида кальция на поверхности защитного слоя, достигаемое за временной отрезок, соответствующий  $Fo_m = 0.05$ , составляет  $2.021 \cdot 10^{-3}$  кг CaO/кг бетона.

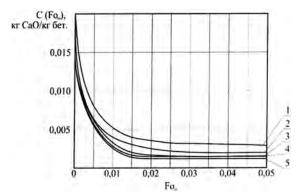


Рис. 4. Изменение концентрации гидроксида кальция на поверхности защитного слоя толщиной, мм: 1 - 30; 2 - 45; 3 - 60; 4 - 80; 5 - 90

С учетом результатов обследования технического состояния резервуара после длительного срока эксплуатации и проведенных расчетов нами были разработаны рекомендации по приведению конструкций резервуара к условиям нормальной эксплуатации.

Согласно [3, 4] для такого типа резервуаров капитальный ремонт следует производить не реже чем один раз в 10 лет.

Выполнение предложенных нами мероприятий, согласно проведенным исследованиям, увеличивает этот срок до 12 лет.

Выводы. Разработанная математическая модель позволяет рассчитать динамику полей концентраций гидроксида кальция по толщине бетонной конструкции, а также кинетику массопереноса в твердой и жидкой фазах, что дает возможность, в конечном итоге, определить продолжительность процесса коррозии I вида. Общность математического описания позволяет распространить данную модель и предложенный метод расчета на другие виды бетонов с учетом определяемых экспериментально зависимостей коэффициентов массопереноса от структуры и состава бетонов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Федосов С.В. О некоторых проблемах теории и математического моделирования процессов коррозии бетона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 5. С. 20—21.
- 2. Моделирование массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона первого вида / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.Л. Федосова, В.Л. Смельцов // Строительные материалы. 2005. № 7. С. 60—62.
- 3. Строительные нормы и правила СНиП 2.03.11—85 «Защита строительных конструкций от коррозии» (утв. постановлением Госстроя СССР от 30 августа 1985 г. № 137) / Минстрой России. М.: ГЦ ЦПП, 1996.
- 4. Пособие к строительным нормам и правилам СНиП 2.03.11-85 «Пособие по проектированию защиты от коррозии бетонных и железобетонных строительных конструкций» (утв. постановлением Госстроя СССР от 11 июня 1987 г. № 50) / Минстрой России. М.: ГЦ ЦПП, 1996.

Поступила в редакцию 19.03.09

© Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Касьяненко Н.С., Смельцов В.Л., 2009 УДК 536.24

#### В.М. Фокин, А.В. Ковылин

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ОБЪЕМНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Рассмотрены теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоем-кости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля.

К л ю ч е в ы е с л о в а: теплопроводность, температуропроводность, объемная теплоем-кость, неразрушающий контроль, строительные материалы.

The paper considers the theoretical fundamentals of the determination of the thermal conductivity, volumetric heat capacity and thermal diffusivity of materials according to surface thermal measurements through the method of nondestructive test.

K e y w o r d s: of thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric heat capacity, nondestructive test, construction materials.

В последние годы в условиях рыночной экономики в строительном комплексе России произошли глубокие организационные и структурные изменения. В связи с ликвидацией строительных министерств была отменена отраслевая система управления охраной труда, что отрицательно сказалось на состоянии условий и охраны труда работников строительной отрасли.

Многие явления природы подчиняются закону простого гармонического колебания. Только периоды таких колебаний для разных условий могут быть различными. Так, период наиболее резких колебаний температуры Земли равен одному году, а для ограждающих конструкций жилого помещения он составляет одни сутки. Температурные колебания распространяются по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях, что позволяет определить коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , температуропроводности  $\alpha$  и объемную теплоемкость ( $\alpha$ ) материалов, изделий и ограждающих конструкций.

Если процесс теплового колебания изделия или конструкции продолжается достаточно долго, то начальные условия не будут сказываться на распространении температуры, а явление распространения температурных волн описывается двумя уравнениями

$$\frac{\partial 9}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 9}{\partial x^2},\tag{1}$$

$$\vartheta_{0,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{\text{max}} \cos(\omega \tau), \tag{2}$$

где a — коэффициент температуропроводности материала, м²/с;  $\vartheta_{\Pi}^{\text{max}}$  — амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности изделия или конструкции (максимальное отклонение температуры на поверхности изделия от средней температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива), °C;  $\omega = 2\pi/z$  — частота температуры материала, массива мас

ратурных колебаний на поверхности материала, изделия, 1/c; z — полный период колебаний, c.

Решение системы уравнений (1)—(2) имеет вид

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos(\omega \tau - kx) e^{-kx},\tag{3}$$

где  $k = \sqrt{\omega / 2a}$ ; a — коэффициент температуропроводности материала, м<sup>2</sup>/с.

Из решения (3) вытекает ряд зависимостей, которые часто используются в технических расчетах. Так, плотность теплового потока на поверхности может быть найдена с помощью выражения (3) по формуле

$$q_{\Pi,\tau} = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{\Pi} = \lambda k \sqrt{2} \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos \left(\omega \tau + \frac{\pi}{4}\right).$$

Последнее выражение можно записать и в виде

$$q_{\Pi,\tau} = B \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos\left(\omega \tau + \frac{\pi}{4}\right),$$

где B — параметр, зависящий от теплофизических свойств материала. Максимальная плотность теплового потока на поверхности равна

$$q_{\Pi}^{\max} = B \cdot \vartheta_{\Pi}^{\max}. \tag{4}$$

Параметр B характеризует аккумулирующую способность изделия или массива и носит название коэффициента теплоусвоения, который в процессе распространения температурных волн остается постоянным. В количественном значении коэффициент теплоусвоения материала (массива) при тепловых колебаниях — это отношение максимального теплового потока на поверхности материала  $q_{\Pi}^{\max}$  к максимальному отклонению температуры  $\vartheta_{\Pi}^{\max}$ :

$$B = q_{\Pi}^{\text{max}} / \vartheta_{\Pi}^{\text{max}} . \tag{5}$$

Коэффициент теплоусвоения В численно определяется из соотношения

$$B = \sqrt{\lambda(c\rho)\omega},\tag{6}$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $Bt/(M\cdot K)$ ; ( $c\rho$ ) — объемная теплоемкость материала, Дж/( $M^3\cdot K$ );  $\omega=2\pi/z$  — частота температурных колебаний на поверхности материала, изделия, 1/c; z — полный период температурных колебаний на поверхности, c.

Из (4) и (6) видно, что максимальная плотность теплового потока на поверхности материала (массива) и его теплотехнические характеристики будут связаны следующей зависимостью

$$q_{\Pi}^{\text{max}} = \vartheta_{\Pi}^{\text{max}} \sqrt{\lambda(c\rho)\omega} , \qquad (7)$$

где  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  — амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности (максимальное отклонение температуры на поверхности от средней температуры материала, массива), °C.

Известно, что  $\lambda = a \cdot (c\rho)$ , тогда в соответствии с формулой (6) коэффициент теплоусвоения B будет равен

$$B = \sqrt{\lambda(c\rho)\omega} = (c\rho)\sqrt{a\omega},\tag{8}$$

где a — коэффициент температуропроводности материала, м $^2$ /с.

Согласно выражениям (7) и (8) максимальная плотность теплового потока на поверхности материала  $q_{\Pi}^{\max}$  и амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности изделия  $\vartheta_{\Pi}(\tau)$  в любой момент времени нагрева или охлаждения могут быть записаны в виде соотношения:

$$q_{\Pi}^{\text{max}} = (c\rho) \vartheta_{\Pi}(\tau) \sqrt{a\omega} . \tag{9}$$

Полученное соотношение (9) позволят определить объемную теплоемкость исследуемого материала (образца) по выражению

$$(c\rho) = \frac{q_{\Pi}^{\text{max}}}{\vartheta_{\Pi}(\tau)\sqrt{a\omega}}.$$
 (10)

В выражениях (8), (9), (10) температуропроводность вещества характеризует меру тепловой инерции материала. При распространении теплоты в полуограниченном пространстве коэффициент температуропроводности служит важнейшей теплофизической характеристикой, определяющей тепловую активность массива ограждающих конструкций и сооружений. При увеличении значений объемной теплоемкости (cр) коэффициент температуропроводности a уменьшается и это означает большое накопление теплоты в материале за период нагрева и неглубокое проникновение температурных волн, а при малых значениях (cр) — наоборот.

С экологической точки зрения для ограждающих конструкций более благоприятными являются строительные и теплоизоляционные материалы, обладающие более высокими значениями коэффициента теплоусвоения. В этом случае колебания мощности нагревательных приборов будут в какой-то степени компенсироваться накоплением и расходом тепловой энергии, а температура окружающего воздуха будет более равномерной во времени.

Очевидно, что время подъема температурной полуволны  $Z_*$  (в процессе нагрева) и время спада температурной полуволны (в процессе охлаждения) будет показывать только половину от времени полного периода колебания температурной волны ( $Z=2\,Z_*=2\,\tau$ ). Следовательно, максимальная плотность теплового потока  $q_\Pi^{\rm max}$  на поверхности и амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности  $\vartheta_\Pi\left(\tau\right)$  в любой момент времени нагрева или охлаждения, согласно (9), могут быть записаны и в виде соотношения

$$q_{\Pi}^{\max} = (c\rho) \vartheta_{\Pi}(\tau) \sqrt{a \frac{\pi}{\tau}}. \tag{11}$$

Если коэффициент теплопроводности определить по закону теплопроводности Фурье, максимальный тепловой поток на поверхности материала  $q_{\Pi}^{\max}$  определить с помощью тепломера, графиков или формул, а амплитуду колебаний избыточной температуры на поверхности  $9_{\Pi}(\tau)$  в любой момент времени нагрева или охлаждения измерить термопарой, то объемную теплоемкость материала можно рассчитать по соотношению

$$(c\rho) = \frac{q_{\Pi}^{\text{max}}}{\vartheta_{\Pi}(\tau)\sqrt{\frac{a\pi}{\tau}}}.$$
(12)

Тогда коэффициент температуропроводности a ограждения здания определится из соотношения:

$$a = \lambda/(c\rho). \tag{13}$$

Для конкретного определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений выбирается ограждающая конструкция или стена здания или сооружения толщиной  $\delta$ . Переносным тепломером выполняются замеры плотности теплового потока на поверхности ограждения здания в течение суток, а также температуры на наружной и внутренней поверхности стены.

Тепломером определяется максимальная плотность теплового потока  $q_{\Pi}^{\max}$  на наружной поверхности ограждения здания, а также разность температур между внутренней  $T_{\text{crl}}$  и наружной  $T_{\text{cr2}}$  поверхностью стены.

С использованием закона теплопроводности Фурье определяется коэффициент теплопроводности ограждения по формуле

$$\lambda = \left(q_{\Pi}^{\max}\delta\right)/\left(T_{\text{ctl}} - T_{\text{ct2}}\right).$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны определяется на наружной поверхности ограждения здания по формуле

$$9_{\Pi}^{\text{max}} = 0.5 (T_{\text{cr3}} - T_{\text{cr2}}),$$

где  $T_{\text{ст3}}$ ,  $T_{\text{ст2}}$  — температуры на наружной поверхности ограждения по амплитуде колебаний.

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле (5).

Ранее (формула (6)) установлено, что коэффициент теплоусвоения

$$B = \sqrt{\lambda(c\rho)\omega},$$

где ( $c\rho$ ) — объемная теплоемкость материала;  $\omega = 2\pi / z$  — частота колебаний температуры; z — полный период колебаний температурной волны.

Полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения z составляет 24 ч или 86400 с. Тогда объемная теплоемкость ( $c\rho$ ) ограждающей конструкции определится из выражения

$$(c\rho) = (B^2z)/(\lambda \cdot 2\pi).$$

Коэффициент температуропроводности a ограждения здания определится из соотношения:  $a = \lambda/(c\rho)$ .

Методика неразрушающего контроля, основанная на измерении плотности теплового потока, позволяет определять целый комплекс теплофизических характеристик материалов: коэффициент температуропроводности a, объемную теплоемкость ( $c\rho$ ) и теплопроводность  $\lambda$  материалов.

Все графические построения и математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ.

Способ неразрушающего контроля позволяет определять комплекс теплофизических характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Большим преимуществом разработанного способа неразрушающего контроля для комплексного определения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов по температурным измерениям на поверхности призмы квадратного сечения по сравнению с известными является следующее:

отсутствие необходимости измерения в процессе эксперимента таких физических параметров, как коэффициент теплообмена, степень черноты, мощности нагревателя;

нет необходимости в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что значительно упрощает экспериментальные установки;

не требуется учета потерь теплоты за счет теплообмена с окружающей средой, а также контактным сопротивлением между образцом и нагревателем;

измерения температур производятся на поверхности ограждения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик материалов.

Эти преимущества значительно упрощают условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышают метрологический уровень результатов измерения.

Кроме того, способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик строительных материалов позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, легко реализуется на базе микропроцессорной техники и поэтому является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля  $T\Phi X$  материалов, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Фокин В.М.*, *Чернышов В.Н*. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. М.: Машиностроение-1, 2004. 212 с.
- 2. Фокин В.М. Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля. М.: Машиностроение-1, 2003. 140 с.

© Фокин В.М., Ковылин А.В, 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 2001..... 2011. 1011. Cip 2011. Cip

#### УДК 614.876:628.8

#### И.В. Стефаненко

#### СНИЖЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В ПОМЕЩЕНИИ

Рассматриваются способы снижения влияния активности естественных радионуклидов в жилых помещениях. Обосновывается необходимость системы радиационного контроля добычи сырья и производства строительных материалов, территорий, отведенных под строительство, зданий и сооружений.

K л ю ч е в ы е с л о в а: естественные радионуклиды; строительные материалы; радиационная безопасность.

The paper considers the ways of the reduction of the influence of natural radionuclides' indoor activity

K e y w o r d s: natural radionuclides; construction materials; radiation safety.

Естественные радионуклиды (ЕРН), находящиеся в объектах внешней среды, являются источниками облучения населения [1].

В коммунальной сфере доза внешнего облучения людей гаммаизлучением в основном определяется концентрацией ЕРН в строительных материалах, используемых для строительства зданий.

Для оценки радиационной обстановки в регионе важным является определение уровней гамма-излучения территорий и зданий, создаваемого ЕРН. Это позволит оценить дозы внешнего облучения населения, выявить региональные различия и аномально высокие уровни гамма-фона.

В настоящее время признано, что поглощенные населением дозы в помещениях могут быть весьма высокие и их можно уменьшить, а также избежать возникновения значительных доз при строительстве новых зданий.

Проблема радиоактивности строительных материалов рассматривается с двух взаимосвязанных точек зрения: радиационной и технологической. Первая регламентирует допустимые параметры на строительные материалы и систему контроля; вторая должна обеспечить выработку и принятие суммы технических и технологических решений, при которых эти параметры будут выдержаны, а дозы облучения окажутся настолько низкими, насколько это допустимо с учетом приемлемых технико-экономических показателей.

Объектами контроля должно быть как сырье строительных материалов, так и завершенные строительные конструкции и здания. Рассматривая эти объективные суждения, следует подчеркнуть, что радиационный контроль сырья и строительных материалов может обеспечить принятие альтернативных решений на стадии проектирования сооружений. В противном случае радиационный контроль только внутри готовых зданий может привести к крупным экономическим затратам. Поэтому задача радиационного контроля строительных материалов может решаться наиболее естественно, если рассматривать радиоактивность строительных материалов как подлежащее контролю физическое свойство (как прочность, истираемость и пр.). Тогда к проверяемым определенным физико-механическим или химическим показателям качества добавляется еще один [1].

При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность радона и торона в воздухе помещений ( $A_{\text{Rnэкв}} + 4,6 \ A_{\text{Tn экв}}$ ) не превышала 100 Бк/м<sup>3</sup>, а мощность дозы гамма-излучения не превышала мощности дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч [2].

Для обеспечения нормальных по радиационному признаку условий в помещении к первому классу отнесены строительные материалы с эффективной удельной активностью  $A_{\text{эфф}}$  не более 370 Бк/кг.

Анализ радиоактивности отдельных видов строительных материалов показал, что наиболее высокие  $A_{\rm 3 d d}$  характерны для пород вулканического происхождения (гранит, пемза), а в некоторых карьерах — для глины; наиболее низкие — для карбонатных пород (диобаз, доломит, известняк, мрамор). Песок и гравий, как правило, имеют удельную активность EPH, близкую к средней для почв или земной коры.

Помимо осуществления радиационного контроля на стадии добычи сырья и производства строительных материалов, в целях защиты населения от влияния природных радионуклидов должны проверяться территории, отведенные под строительство, а также здания и сооружения [3].

Выбор земельных участков под строительство должен осуществляться с учетом эманации радона из почвы и гамма-фона территории, а в эксплуатируемых зданиях исследуется объемная активность радона и мощность дозы помещений.

В табл. 1 приведены расчетная и фактическая суммарные годовые поглощенные дозы облучения населения в зданиях различного типа. Фактическая — с учетом пребывания людей в течение 50 % времени суток дома, 20...30 % — на работе, в школе, вузе; остальное — в дороге, на воздухе. Были приняты административные, производственные здания, построенные из силикатного кирпича и бетона, со средней мощностью дозы 140~нгр/ч. Из табл. 1 видно, что в одном и другом варианте окончательные результаты удовлетворяют законодательным и нормативным документам. В панельных и бетонных домах суммарные дозы, получаемые населением, в 4...5 раз выше, чем в остальных зданиях [4].

Таблица 1 Усредненные коллективные годовые поглощенные дозы облучения населения г. Волгограда

| Моторуют адамуя     | Коллективная годовая поглощенная доза, мкГр |             |  |  |  |  |
|---------------------|---|-------------|--|--|--|--|
| Материал здания     | Рассчитанная                                | Фактическая |  |  |  |  |
| Керамический кирпич | 565   | 418         |  |  |  |  |
| Бетон               | 1768  | 1278        |  |  |  |  |
| Дерево              | 354   | 480         |  |  |  |  |
| Силикатный кирпич   | 608   | 63          |  |  |  |  |
| Панели              | 1987  | 1280        |  |  |  |  |

Исследованные плотности потока радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) из почвы находятся в пределах  $2...64 \text{ мБк/(м}^2 \cdot c)$ . Из 68 измерений на участках, проведенных в Волгоградской области, более 80 % значений относятся ко 2-й категории радоноопасности.

Проведенные исследования объемной активности радона в жилищном фонде (табл. 2) показали в отдельных зданиях превышение нормативных величин [2].

Таблица 2 Показатели объемной активности Rn<sup>222</sup> и ДПР на первых этажах жилищного фонда г. Волгограда

| Материал здания     | Число измерений | Среднее значение,<br>Бк/м <sup>3</sup> | Диапазон вариаций,<br>Бк/м <sup>3</sup> |  |  |
|---------------------|-----------------|--|---|--|--|
| Керамический кирпич | 16              | 31,4                                   | 9,771,0                                 |  |  |
| Железобетон         | 19              | 31,8                                   | 23,294,5                                |  |  |
| Дерево              | 22              | 39,5                                   | 11,296,0                                |  |  |
| Силикатный кирпич   | 12              | 33,9                                   | 7,972,4                                 |  |  |
| Панели              | 84              | 25,8                                   | 9,176,5                                 |  |  |
| Блоки               | 21              | 38,5                                   | 15,297,4                                |  |  |

Установлено, что в современных домах при применении бетонных плит перекрытия эксхаляция радона наблюдается из строительных материалов; при трехкратном воздухообмене летом и 0,7...1,0 ч<sup>-1</sup> зимой в помещениях, построенных из одинаковых строительных материалов, равновесная объемная активность радона остается постоянной с диапазоном вариаций 8...25%.

Экранирование радона из стен, потолка и пола в помещении можно осуществить любым тонким строительным материалом (обои, краски и др.).

Одним из главных и существенных мероприятий снижения активности  ${\rm Rn}^{222}$  и ДПР является отказ от использования в строительстве материалов с аномально высокой  ${\rm A}_{\rm Rn}$ .

Для снижения гамма-фона в помещении следует использовать материалы с высокой плотностью и низкой  $A_{\theta \varphi \varphi}$  EPH (3  $A_{\theta \varphi \varphi}$  материала защиты должно быть  $\leq A_{\theta \varphi \varphi}$  материала стен и покрытий) [4].

К материалам с высокой плотностью относятся бетоны, стекло, граниты, тяжелые камни и др. Однако эти материалы имеют большую эффективную удельную активность (более 200 Бк/кг). Стекло имеет сравнительно низкую  $A_{3\varphi\varphi}$  (~ 40...60 Бк/кг), но этот материал по своим физическим свойствам не может быть универсальным отделочным и тем более конструкционным материалом в зданиях [2].

Исследованы группы полимерных материалов, выполненных по разным технологиям [2—4]. Эти материалы обладают рядом универсальных свойств, их плотности могут быть в пределах  $10...2000~{\rm kr/m}^3$ , а эффективные удельные активности не превышают  $20~{\rm Kr/kr}$ . Преимуществом обладают материалы, полученные радиационно-химическим способом (полная степень полимеризации связующего, использования наполнения до  $85~{\rm W}$ , высокая плотность материала). Эти материалы (табл. 3) могут быть конкурентоспособными для использования в помещениях, как отделочные, с целью снижения мощности доз.

Эффективные удельные активности внедренных в производство материалов в 10...15 раз ниже традиционных строительных материалов. Испытаних материалов в помещении показали снижение мощности поглощенной дозы в 6 раз [4].

Таблица 3 Основные характеристики материалов, полученных с использованием радиационно-химической технологии для снижения гамма-фона помещений

| Характеристика                                 | Радиационно-мод<br>матер |              | Многоцветные плитки с радиационно- отверждаемым лаковым покрытием |           |  |  |
|--|--------------------------|--------------|---|-----------|--|--|
| Размеры (длина,<br>ширина, толщина),<br>мм     | 2500×1200×420            | 600×400×1015 | 150×150×3   | 150×150×3 |  |  |
| Плотность, $\kappa \Gamma/m^3$                 | 11001200                 | 18002100     | 20002100  | 19002000  |  |  |
| Содержание полимера, %                         | 1825                     | 1015         | 1520  | 1520      |  |  |
| Пределы прочно-<br>сти, МПа:                   |                          |              |   |           |  |  |
| при изгибе                                     | 4050                     | 2535         | 4045  | 1520      |  |  |
| при сжатии                                     | 100120                   | 60100        |   |           |  |  |
| Степень истирае-<br>мости, г/см <sup>2</sup>   | 0,04                     | 0,050,1      |   |           |  |  |
| Эффективная<br>удельная актив-<br>ность, Бк/кг | 6,48,8                   | 1,85,4       | 18,420,2  | 18,420,2  |  |  |

Таким образом, снижение влияния активности естественных радионуклидов в жилье в настоящее время реально выполнимо.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Сидельникова О.П., Козлов Ю.Д. Влияние активности естественных радионуклидов строительных материалов на радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1996. 160 с.
  - 2. Сидельникова О.П. Радиационный контроль в стройиндустрии. М.: АСВ, 2002. 208 с.
- 3. *Худяков В.А.*, *Чичиров К.О.*, *Сидельникова О.П.* Организация контроля и управления радиационной нагрузкой в помещениях. Пенза: изд-во ПГУ АС, 2004. 52 с.
- 4. *Сидельникова О.П.*, *Стефаненко И.В.*, *Соколов П.Э.* Радиационная безопасность в зданиях : справочник. М. : Энергоатомиздат, 2006. 325 с.

© Стефаненко И.В., 2009

Поступила в редакцию 06.04.09

#### ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 535.2.662.983

С.А. Голяк, В.В. Пятачков

## ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР НА ГОНИАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ, ОТАПЛИВАЕМОГО ГАЗОВЫМИ ИНФРАКРАСНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

По результатам обследования параметров и температур на гониальных участках боковых поверхностей здания производственного назначения устанавливаются закономерности изменения температуры по высоте здания, оборудованного системой отопления на основе газовых инфракрасных излучателей.

Ключевые слова: газовые инфракрасные излучатели.

According to the inspection results of the building parameters and temperatures of gonial sections of industrial buildings the dependence of temperatures by the height of the building with gas infrared heating system is set.

Key words: gaseous infrared emitters.

Отсутствие необходимого опыта эксплуатации газовых инфракрасных излучателей в производственных зданиях определяет потребность в экспериментальном определении температур на гониальных участках поверхностей зданий. Исследования имеют целью получение уточненных данных в местах работы газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) в зданиях производственного назначения.

В России только в 1996 г. было разрешено обогревать зоны с постоянными рабочими местами газовыми инфракрасными излучателями, в то время как в США и Европе отопительные системы с использованием ГИИ для обогрева помещений с длительным пребыванием людей начали широко применять уже с конца 1950-х — начала 1960-х гг. [1]. Расширение области применения послужило основным стимулом к стремительному росту количества отопительных систем на основе ГИИ в Российской Федерации. Но из-за отсутствия опыта и недостаточной изученности вопроса эти системы применяются нерационально и не приносят снижения затрат и энергосбережения в том объеме, на который способны [2].

Следовательно, необходимы детальные и широкомасштабные исследования в этой области, т.к. европейские и американские данные и наработки не обеспечивают в полной мере требований безопасности работы и гигиенических требований к системам отопления с применением ГИИ из-за отличий в

климатических режимах указанных территорий. А действующие в России нормативные и разрешительные документы, из-за имеющихся в них определенных недоработок и противоречий, только добавляют неопределенности в существующие вопросы.

На рис. 1 приведена схема здания грязных оборотных циклов водоснабжения сортового цеха, обогреваемого газовыми инфракрасными излучателями.

На схеме показаны: a — ремонтная зона;  $\delta$  — помещение для хранения инструментов и оборудования;  $\epsilon$  — офисы и подсобные помещения;  $\epsilon$  — зона установки насосного оборудования;  $\delta$  — зона установки флокулянтов; 1, 2, 3, 4 — гониальные участки производственного здания, где производились замеры температур.

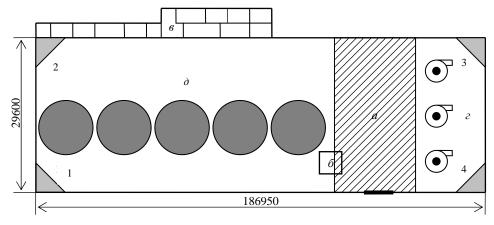


Рис. 1. Схема здания производственного назначения

Для измерений использовался поверенный прибор — переносной пирометр Raytek ST с диапазоном измерений 32...600 °C.

Замеры температуры выполнялись на 8 уровнях: 0, 500, 1000, 2000, 3000, 6000, 7000, 10000 мм.

На рис. 2 показана развертка угла 1 здания производственного назначения и представлены значения температур на одном из гониальных участков поверхностей здания.

Экспериментальные замеры температур производились как по ширине, так и по высоте гониального участка в зоне расположения контрольно-измерительной аппаратуры (КИП) здания грязных оборотных циклов.

Как видно из графика на рис. 3, изменение температуры по ребру угла (a) и на участках примыкания слева ( $\delta$ ) и справа ( $\delta$ ) имеет различный характер. А именно, по ребру угла максимальная температура, достигнутая на момент проведения эксперимента, наименьшая из трех и равна +6 °C. Слева от ребра температура выше, чем по ребру угла (+12 °C), но ниже, чем температура на участке примыкания справа от ребра угла — +14 °C.

Относительно минимальных температур, которые видно на графике рис. 3, можно отметить следующее. Самая низкая температура, -7 °C, имеет место справа от ребра угла на расстоянии 2 м, на самом ребре — -5 °C, слева от ребра угла также -5 °C.

Это имеет большое значение для работы технологического оборудования, установленного в производственном помещении. В частности, в этом месте находятся элементы КИП.

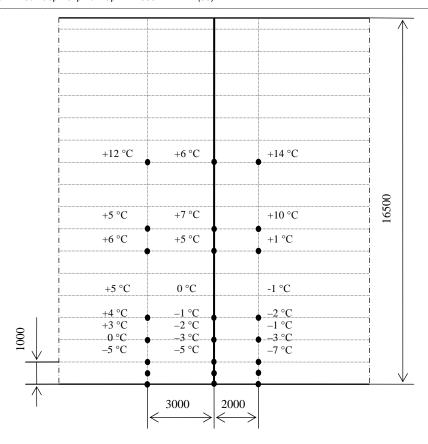


Рис. 2. Развертка угла 1 здания производственного назначения с точками замеров температур

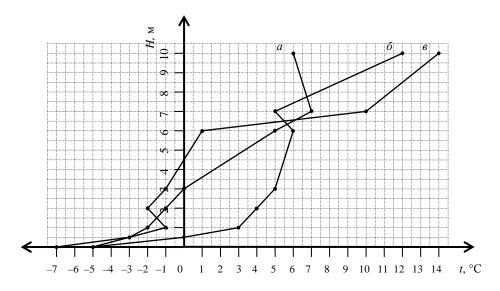


Рис. 3. График изменения температуры по высоте здания на гониальном участке боковых поверхностей здания производственного назначения, оборудованного системой отопления на основе газовых инфракрасных излучателей

Известно, что инфракрасное излучение распространяется прямолинейно, преломляется, отражается и поляризуется так же, как видимый свет. В то же время, подобно радиоволнам, оно может проходить сквозь некоторые материалы, непрозрачные для видимого излучения.

Любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, излучает тепловую энергию в инфракрасном диапазоне спектра электромагнитных волн. Различные тела при одной и той же температуре обладают различной лучеиспускательной способностью, которая зависит от природы и строения тел, а также от формы и строения их поверхности. Электромагнитное излучение имеет двойственную корпускулярно-волновую природу. Электромагнитное поле обладает квантовым характером. Квантами его являются фотоны. При взаимодействии с веществом фотон поглощается его атомами, передает свою энергию электрону, а сам исчезает. При этом возрастает энергия тепловых колебаний атомов в молекулах вещества, т.е. энергия излучения переходит в теплоту. Перенос энергии переходит от тела с более высокой температурой к телу с меньшей температурой.

Таким образом, экспериментальное определение температур на гониальных участках поверхностей здания грязных оборотных циклов позволило выявить местонахождение точек, критических с точки зрения надежной и безопасной работы как технологического оборудования, так и КИП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Михайлова Л.Ю*. Определение угловых коэффициентов облученности при произвольном расположении газового инфракрасного излучателя // Материалы научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей. Тюмень: ТюмГАСА, 2004. С. 120—123 с.
- 2. Голяк С.А., Пятачков В.В. Инфракрасные излучатели. Рациональные схемы их комбинированного применения // Материалы Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современного строительства». Пенза: ПГУАС, 2007. С. 103—106.

© Голяк С.А., Пятачков В.В., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 УДК 535.2.662.983

#### В.В. Пятачков, С.А. Голяк

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ЗОНАХ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЗДАНИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ОТАПЛИВАЕМЫХ ГАЗОВЫМИ ИНФРАКРАСНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

По результатам обследования параметров и температур в зонах обслуживания технологического оборудования в зданиях производственного назначения устанавливаются закономерности изменения температуры по высоте здания, оборудованного системой отопления на основе газовых инфракрасных излучателей.

Ключевые слова: газовые инфракрасные излучатели; здания производственного назначения; микроклимат производственных помещений.

According to the inspection results of the building parameters and temperatures in the technological equipment service zones of the industrial buildings with gas infrared heating system the difference of temperatures is set.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : gaseous infrared emitters; industrial buildings; microclimate of industrial facilities.

Экспериментальные исследования направлены на получение достоверных данных на месте установки газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) в зданиях производственного назначения.

Как показывает практика, применение отопительных систем на основе газовых инфракрасных излучателей позволяет снизить затраты на создание требуемых условий микроклимата в производственных помещениях.

Произведенные замеры в одном из действующих цехов (рис. 1), оборудованных отопительной системой на основе ГИИ, позволили выявить характер распределения локальных температур по высоте здания производственного назначения (рис. 2).

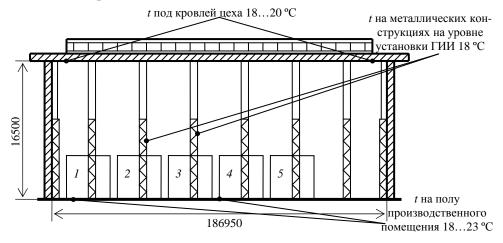


Рис. 1. Схема здания производственного назначения с точками экспериментальных замеров температур: 1, 2, 3, 4, 5 — технологические установки (флокуляторы)

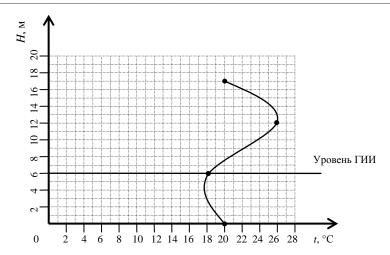


Рис. 2. График изменения температуры по высоте здания производственного назначения, оборудованного системой отопления на основе ГИИ

Ввиду разницы в физическом принципе переноса тепла, имеет место небольшой градиент температур по высоте здания, что положительно влияет на экономическую эффективность использования тепловой энергии [1, 2].

Для измерений использовался поверенный прибор — переносной пирометр Raytek ST с диапазоном измерений 32...600 °C.

Замеры температуры выполнялись в трех уровнях:

на полу;

на металлических конструкциях на уровне установки ГИИ;

под кровлей цеха.

По результатам выполненных замеров был построен график (рис. 2).

В нижней части графика наблюдается постепенное понижение температуры в направлении от пола до уровня установки газовых инфракрасных излучателей. Диапазон изменения температуры на этом участке составляет  $\Delta t = 2$  °C.

В верхней части графика имеет место повышение температуры в направлении от уровня установки газовых инфракрасных излучателей до центральной точки между излучателями и кровлей. На этом промежутке отмечается значительно больший градиент изменения температуры по сравнению с участком в нижней части графика. Диапазон изменения температуры на этом участке составляет  $\Delta t = 8$  °C.

В направлении от центральной точки между излучателями и кровлей до самой кровли наблюдается понижение температуры с достаточно высоким градиентом. Диапазон изменения температуры на этом участке составляет  $\Delta t = 6$  °C. Максимальный диапазон изменения температуры в здании производственного назначения  $\Delta t = 8$  °C.

Для каждого из участвующих в лучистом теплообмене тел существует несколько потоков излучения: поток собственного излучения E, зависящий от температуры T и оптических свойств тел; поток падающего излучения  $E_{\text{пад}}$ ; потоки поглощенного, отраженного и пропускаемого излучения, сумма которых равна  $E_{\text{пад}}$ . В общем случае среда, разделяющая тела, может поглощать излучение и вносить поток собственного излучения.

При лучистом теплообмене между несколькими телами каждое тело характеризуется потоком эффективного излучения:

$$E_{9\phi} = E + E_{\text{orp}} = E + (1 - A)E_{\text{пад}},$$

где A — поглощательная способность тела.

Тело, для которого при любой температуре A=1, R=0 и D=0, где R — отражательная способность тела, D — пропускная способность (оптическая прозрачность) тела, называется «абсолютно черным».

Этот вид излучения соответствует температурному равновесию тела, и количество испускаемой энергии излучения определяется только температурой тела и не зависит от его природы. Этому понятию и отвечает абсолютно черное тело, которое способно поглощать всю падающую на него энергию излучения.

Абсолютно черных тел в природе не существует. Излучение реальных тел в зависимости от их физических свойств может протекать по-разному. По характеру излучения реальные тела можно разделить на две группы: с серым излучением и с селективным излучением.

Для описания излучения тел первой группы приемлемы все законы, которым подчиняются излучения черного тела, если по интенсивности эти излучения различаются только постоянным множителем, который не зависит от длины волны. Поэтому для серых тел закон Стефана — Больцмана записан в виде

$$E_{\rm T} = C (T/100)^4$$
.

Отношения энергии излучения серого тела к энергии излучения черного при той же температуре называют степенью черноты тела є:

$$\varepsilon = C/C_0$$
.

Зная є, можно подсчитать энергию серого тела:

$$E_{\rm T} = \varepsilon C_0 (T/100)^4 = \varepsilon \cdot 5,75 (T/100)^4.$$

Селективным, или избирательным, называется излучение, которое наблюдается лишь в отдельных узких участках спектра электромагнитных колебаний.

При конвективной системе отопления у пола наблюдается понижение температуры воздуха в силу повышенной теплопередачи. Это обстоятельство, можно считать, подчеркивает гигиеническое преимущество системы лучистого отопления.

Результаты экспериментального определения локальных температур в одном из производственных цехов показали особенности работы ГИИ. При работе излучателей температура оборудования и ограждающих конструкций выше температуры окружающего воздуха рабочей зоны.

Таким образом, использование газовых инфракрасных излучателей создает благоприятные условия микроклимата, обеспечивает более высокую температуру пола и более комфортные условия для рабочего персонала в зданиях производственного назначения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Зиганшин Б.М. Исследования процесса обогрева помещения при помощи газоиспользующих излучающих труб // Материалы 57-й республиканской научной конференции : сб. науч. тр. докторантов и аспирантов. Казань : КГАСУ, 2005. С. 244—248.
- 2. Дыскин Л.М., Шиванов В.В. Тепловой баланс помещения с газовым лучистым отоплением // Изв. вузов. Сер. Строительство. 2007. № 8. С. 62—65.

© Пятачков В.В., Голяк С.А., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

УДК 697.94

#### Н.Я. Мамедов

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЗДАНИЯХ

Рассмотрены вопросы управления режимом потребления тепловой энергии в зданиях с применением теории интеллектуальных систем — динамической экспертной системы реального времени. Предложены структура и схема информационных связей динамической экспертной системы диагностики и управления режимом потребления тепловой энергии в зданиях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интеллектуальные системы; тепловая энергия; экспертные системы; информационные связи; сложные инженерные системы; режим потребления тепла; системы жизнеобеспечения; управление режимом потребления тепловой энергии.

The major feature of systems of maintenance of a microclimate is presence at them enough rigid technological communication: environment — external protecting designs — thermal energy consumption. This communication leads to that the system of maintenance of a microclimate can be accepted as organic indissoluble unity of external climatic parametres, external protecting designs and the thermal loadings, functioning within the limits of unity and conditions of management of a microclimate. Thereof, at change of one of system key parametres, of other elements vary also. Such close technological and economic interrelation forces to consider microclimate managerial processes by uniform criterion of optimum control.

In article questions of management by a mode of consumption of thermal energy in buildings with application of the theory of intellectual systems — dynamic expert system of real time are considered. The structure and the scheme of information communications of dynamic expert system of diagnostics and management of a mode of consumption of thermal energy in buildings are offered.

K e y w o r d s: intellectual systems, thermal energy, expert systems, information communications, difficult engineering systems, mode of consumption of heat, life-support systems, management of a mode of consumption of thermal energy.

Мировая практика показывает, что интегрированная система управления зданием в конечном итоге позволяет оптимизировать затраты на строительство и сократить ежемесячные эксплуатационные расходы и затраты на амортизацию, так как единое (централизованное) управление инженерными системами здания позволяет прогнозировать и оптимизировать расходы на поддержание этих систем в рабочем состоянии и отслеживать сроки замены или ремонта отдельных оборудований. За счет интеграции всех инженерных систем здания повышается не только экономичность, но и его комфортность, поскольку интеллектуальные модули систем жизнеобеспечения максимально возможно подстраивать под потребности человека.

Современные здания, обеспечивающие полный комфорт для проживающих там людей, относятся к классу сложных инженерных систем. Функционирование таких систем складывается на основе множества нелинейных факторов, среди которых есть хорошо исследованные, например температура и относительная влажность внутреннего воздуха, распределение приточного воздуха в помещении и т.д.

Перечисленные факторы вступают во взаимодействие в окружающей среде и в помещении, при этом иногда уточнение математического описания отдельных факторов приводит к ухудшению описания поведения системы в целом. Кроме того, имеются явления, трудно поддающиеся формальному ма-

тематическому описанию вследствие многочисленных неопределенностей, например, температура наружного воздуха, скорость ветра, теплотехнические параметры наружных ограждающих конструкций и др. 1.

Эволюция взглядов на проблему управления сложными системами в контексте применения тех или иных формализмов для построения адекватных моделей управляемых объектов, пройдя через этап создания необходимости учета в них человеческого фактора, привела специалистов в области строительства и инженерии к формированию концепции построения интеллектуальных зданий.

Экспертные системы, как наиболее активно развивающееся направление идеологии классического искусственного интеллекта, способны, имитируя «человеческий» способ рассуждения, решать задачи управления не хуже человека-эксперта. Причем подобные системы, разумно сочетая достоинства человеко-машинных диалоговых систем с эвристическими моделями, приобретают ряд принципиально новых и чрезвычайно важных свойств. Это, прежде всего, возможность представлять знания экспертов на языке, близком к естественному языку человеческого общения, решать задачи на основе этих знаний и, пожалуй, самое главное — верифицировать цели управления, т.е. подтверждать правильность принятого решения 2, 3.

И все же, несмотря на очевидные преимущества такого подхода, экспертные системы «первой волны», далеко не исчерпав изначально заложенный в них потенциал, во многих случаях не оправдывают возлагаемых на них належл 4.5.

Дело в том, что уровень сложности современных зданий, неопределенность среды их функционирования, большая размерность задач их управления не позволяют создать такую универсальную статическую базу знаний экспертной системы, которая была бы способна выдавать решения, адекватные нередко возникающим нештатным ситуациям, выходящим за рамки регламента.

Пути выхода из создавшейся ситуации естественно было искать в придании экспертной системе некоторого динамизма, в смысле возможности более гибкого и оперативного реагирования на изменяющиеся комфортные условия внутри помещений здания в режиме реального времени. И более того, периодически обновляемые модели базы знаний должны позволять на основе анализа тенденций изменения параметров наружного воздуха прогнозировать возможные изменения параметров в помещениях и генерировать соответствующие решения.

В целях оперативной обработки данных в среде реального времени и решения на этой основе задачи управления тепловым режимом в современных зданиях общая задача управления нами декомпозирована на ряд узконаправленных подзадач, таких как:

распознавание фактов или происходящих событий, однозначно связанных с теми или иными непредвиденными проблемами, позволяющее при необходимости их распознавать и выявлять;

арбитраж приоритетов этих фактов или событий;

анализ факта или события с целью распознавания и выявления соответствующей непредвиденной проблемы;

арбитраж приоритетов основных задач; координация вышеуказанных процессов.

Анализ функций, возлагаемых на динамическую экспертную систему, требований к качеству управления, ее места в системе принятия решений для режима потребления тепла в здании позволил разработать структуру, в которой выделены четыре функциональные автономные подсистемы: монитор, диагностика, принятие решений по управлению, оценка и коррекция знаний (рис. 1).

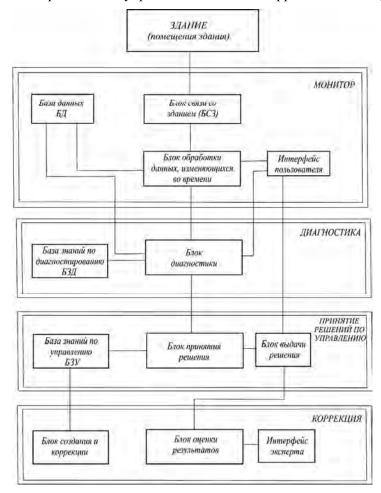


Рис. 1. Структура динамической экспертной системы

Эти подсистемы ориентированы на выполнение следующих задач.

«Монитор» — подсистема сбора и обработки измерительной информации о параметрах, используемой для диагностики текущего состояния режима потребления тепла, а затем и для принятия адекватного управленческого решения. Отслеживая динамику режима, монитор фактически контролирует его стабильность.

Подсистема «монитор» состоит из следующих основных блоков:

блок связи со зданием служит для преобразования аналоговой измерительной информации о параметрах режима потребления тепла в цифровой код с дальнейшей ее компьютерной обработкой в части фильтрации, сглаживания, вычисления средних значений, фиксации отклонений от номинальных значений и выхода параметров за допустимые пределы;

блок обработки данных, изменяющихся во времени, выполняет задачу сбора и накопления информации для преобразования ее к виду, удобному для использования экспертной системой. Здесь, исходя из динамических особенностей режима потребления тепла в здании, вначале определяется шаг дискретизации

$$dt = (t_n - t_0)/n ,$$

где  $t_0$  — начало интервала времени измерения;  $t_n$  — конец интервала времени измерения; n — число шагов дискретизации. Затем, измеряя значения параметров наружного воздуха в моменты времени, кратные интервалу дискретности, вычисляют разности  $\Delta X_i, \Delta^2 X_i, ..., \Delta^n X_i$ , принимаемые в дальнейшем за дискретные аналоги соответствующих производных измеряемых параметров  $X_i^{'}, X_i^{"}, ..., X_i^{(n)}$ .

Интерфейс пользователя предназначен для организации взаимодействия оператора как с процессом потребления тепла в здании, так и с программным комплексом.

Следует отметить, что на уровне человеческого восприятия физическую интерпретацию математических понятий производных выше второй достаточно сложно представить. Поэтому естественно, что эксперты в своих рассуждениях о динамике процесса используют лишь понятия скорости изменения того или иного параметра и его ускорения, соответствующих первой и второй производным от этих параметров. Ввиду этого и эвристические правила базы знаний ограничиваются лишь формализацией первых двух производных.

В результате функционирования подсистемы «монитор» соответствующим образом обработанная информация поступает с частотой, определяемой экспертами, исходя из динамических особенностей процесса, в подсистему «диагностика», где фиксируются нарушения, которые имели место в ходе протекания режима потребления тепла, отклонений его от нормы, устанавливается диагноз состояния режима.

В условиях отклонения процесса от нормального функционирования и выдачи соответствующей информации от подсистемы «диагностика» подсистема «принятие решения» вырабатывает управляющие решения, направленные на восстановление стабильности режима потребления тепла в здании. В эту подсистему входит следующая триада блоков:

блок «база знаний по управлению» сформирован на основе экспертных опросов специалистов по управлению теплового режима зданий, как и база знаний подсистемы «диагностика»;

блок принятия решения — это программное средство, реализующее механизм логического вывода, используя информацию подсистемы «диагностика» о нарушении режима и базу знаний по управлению;

блок выдачи решения организует пересылку, с помощью интерфейса пользователя, решения по управлению режимом в подсистему «монитор» и представление ее на экране дисплея в виде рекомендации.

Подсистема «оценка и коррекция базы знаний» является аналитическим элементом системы, предназначенным для регулярной оценки адекватности принимаемых решений реальным ситуациям и, в случае отсутствия таковой, проведения необходимой коррекции эвристических правил базы знаний.

Здесь, в соответствии с заложенными принципами, функционирование начинается с оценки экспертом корректности решений, вырабатываемых подсистемой «принятие решения по управлению».

Эксперт сопоставляет исходную информацию о текущих значениях параметров процесса потребления тепла, данные о климатических параметрах наружного воздуха, данные диагностики с информацией о состоянии процесса, сложившегося в силу воздействия на него команд, соответствующих принятым решениям по управлению. Необходимо иметь в виду, что подобное сопоставление должно производиться с учетом фактора запаздывания, определяемого динамическими свойствами здания.

В результате этого анализа для каждого из проведенных экспериментов эксперт оценивает по шкале 0, 1 качество принятых решений в виде «штрафных» и «поощрительных» очков. Если для k-го эксперимента оценка качества работы системы  $S_k \le 0,5$ , то правило (или множество правил, участвующих в цепочке рассуждений) получает «штрафное» очко, а в противном случае ( $S_k > 0,5$ ) — «поощрительное».

В проблеме построения динамической экспертной системы реального времени, синтеза ее архитектуры и принципов формирования большая роль принадлежит анализу потоков информации в системе, информационной взаимосвязи решаемых задач.

Исследования в этой области, с учетом предложенной структуры системы и возможностей комплекса технических средств, позволили разработать схему информационных связей динамической экспертной системы (рис. 2).

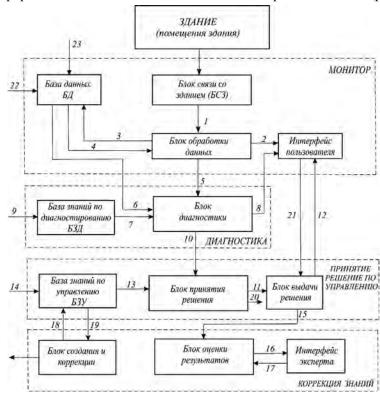


Рис. 2. Схема информационных связей динамической экспертной системы диагностики и управления режима потребления тепла

Оперативная информация о режимных параметрах процесса поступает потоком (1) с интервалом 1 ч от здания (помещения) в блок обработки данных подсистемы «монитор». Выбор такого интервала обусловлен временем опроса датчиков, который, в свою очередь, определяется исходя из динамических особенностей управляемого здания.

Соответствующим образом обработанная информация, характеризующая состояния режима (2), представляется пользователю на экране монитора в виде таблиц. Значения же параметров, необходимые в соответствии с алгоритмом функционирования системы для последующего использования экспертных систем, заносятся (3) в базу данных, где также хранится и нормативно-справочная информация о режиме (22).

Периодически, с интервалом 2 ч, текущая информация о режиме потребления тепла сравнивается с последними данными, записанными в базу данных, с целью проверки стабильности и соответствия требуемым условиям, и в случае их нарушения диспетчеру представляется информация об изменениях, возникающих в ходе процесса.

Одновременно информация о нарушениях (5) передается в блок диагностики, куда поступают также экспертные знания (7), хранящиеся в базе знаний диагностирования (БЗД).

Результаты диагноза пересылаются (10) в подсистему «принятие решения» для выработки рекомендаций по управлению режимом потребления тепла в здании, которое осуществляется с использованием правил (13) базы знаний по управлению (БЗУ).

Полученное решение (11) через блок выдачи результатов передается (12) диспетчеру.

В системе предусмотрена возможность коррекции знаний, сконцентрированных в БЗД и БЗУ (9, 18), с помощью блоков оценки результатов и коррекции.

Анализ адекватности моделей базы знаний принятым в процессе функционирования системы решениям по управлению осуществляется экспертом в диалоговом режиме (16, 17).

Оператор вправе не согласиться с решением, предложенным системой, и может запросить (21) его объяснения. Ввиду этого, в целях проведения в последующем необходимого анализа, промежуточная информация после отдельных этапов решения запоминается в БД (23).

Выводы. 1. Разработана структура динамической экспертной системы для управления режимом потребления тепловой энергии в зданиях. 2. Разработана схема информационных связей динамической экспертной системы диагностики и управления режимом потребления тепловой энергии в зданиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Табунщиков Ю.А.*, *Бродач М.М.* Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М. : ABOK-ПРЕСС, 2002. 294 с.
  - 2. Алиев Р.А., Алиев Р.Р. Теория интеллектуальных систем и ее применение. Баку, 2001. 720 с.
- 3. Robert L. Moore, Rod S. Khanna. A Real-Time Expert System for Industrial Applications. Instrum Power Ind. Vol. 29. Proc. 29-th power Instrum Symp., Cleveland, Ohio, May 19-21, 1986. Pp. 55—63.
- 4. Fuzzy sets, neural networks and Soft Computing / Yager R.R., Zadeh L.A. (Eds.) VAN Nostrand Reinhold, New York, 1994, p. 440.
- 5. Алиев Р.А., Абдикеев Р.М., Яковенко И.И. Интеллектуальная система диспетчерского управления производством ДУЭТС // Теория и применение искусственного интеллекта : сб. тр. Второго Международного научного семинара, Болгария, Созопольб, 1989.

Поступила в редакцию 19.03.09

© Мамедов Н.Я., 2009

УДК 622.24

#### Е.П. Гопций, В.М. Фокин

# ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СКВАЖИН ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Рассмотрены влияния теплофизических свойств горных пород на теплообмен глубинных скважин, физических свойств флюидов на энергетический потенциал глубинных скважин, глубин геотермальных скважин на статическую температуру и давление пластовой воды, а также глубины скважины и дебита геотермальных скважин. Получена формула математической зависимости температуры на устье скважины от пластовой температуры, температурного градиента, глубины, суточного дебита и продолжительности эксплуатации скважины.

K л ю ч е в ы е сл о в а: геотермальные скважины, теплофизические свойства, температура флюида.

The paper considers the influence of the thermophysical properties of rocks on the deep wells' heat exchange, of the physical properties of fluids on the energy potential of deep wells, of the depth of geothermal wells on the static temperature and formation water pressure as well as well depths and geothermal well rates. The authors obtained the formula of the mathematic dependence of temperature in the well head on the formation temperature, thermal gradient, depth, daily production rate and in-service time of the well.

K e y w o r d s: geothermal wells, thermophysical properties, fluid temperature.

Влияние теплофизических свойств горных пород на теплообмен глубинных скважин. Теплофизические свойства горных пород играют существенную роль в структуре теплового поля земной коры. В свою очередь, тепловое поле Земли в значительной мере определяет процессы, связанные с поисками, разведкой, разработкой газовых месторождений, эксплуатацией магистральных газопроводов и подземных газохранилищ. Тепловое поле влияет на технологический режим работы газовых и газоконденсатных скважин, под его влиянием меняются геологические свойства промывочных и тампонажных растворов, состав и параметры пластовых флюидов и горных пород, условия работы подземного бурового и поверхностного промыслового оборудования. Поскольку скважина и окружающий ее массив горных пород это единая теплообменная система, незначительные изменения температуры в стволе скважины вызывают аналогичные колебания в прискважинной зоне пород. Возникающий при этом радиальный тепловой поток формирует неоднородное тепловое поле, знание которого необходимо для определения области теплового влияния скважины.

Для пород смешанной структуры (порфирит, диабаз и др.) в зависимости от преобладания аморфной или кристаллической составляющих теплопроводность слабо зависит от температуры или не является ее функцией.

Температуропроводность кристаллических горных пород с ростом температуры меняется интенсивнее, чем осадочных. Для пород с аморфной структурой эта зависимость выражается слабее.

Теплоемкость горных пород, за исключение пород с ионной структурой кристаллической решетки (галит, ангидрит), повышается с ростом температуры. При этом у кристаллических пород в интервале температур 270...670 К

теплоемкость растет более интенсивно, чем при более высоких температурах. Для пород с аморфной структурой зависимость близка к линейной в широком диапазоне температур [1].

Влияние физических свойств флюидов на энергетический потенциал глубинных скважин. Этаж (глубина) скважин различных месторождений настолько велик (до 6000 м), что на температуру флюида будут влиять теплофизические свойства грунта, окружающего скважину, а также физические свойства флюидов, насыщающих залежь скважины.

Основными факторами, которые обусловливают изменение физических свойств флюидов, являются температура и давление [2].

Геотермический градиент различных месторождений составляет от 2,3 до 3 °C на каждые 100 м углубления.

Большой диапазон изменения давления и температуры обусловливает значительное изменение и физических свойств флюидов в пределах водной, нефтяной и газовой залежи.

Состав флюидов (залежи) законсервированных скважин включает в себя до 95 % воды, 2...3 % нефти, а также 2...3 % попутного природного газа [3].

Следует также отметить, что на параметры флюидов более всего влияют температура пласта (залежи) и давление. Обычно влияние температуры более значительно. Рост температуры уменьшает плотность флюидов, а рост давления, наоборот, ее увеличивает. В скважинах в процессе извлечения флюидов из пласта значительную роль играют гравитационные силы. В вертикальном движении флюидов вероятно проявление режима гравитационной стабилизации: газ, нефть и вода.

Другим важным фактором, оказывающим влияние на эффективность скважин, является вязкость воды, нефти и газа в пластовых условиях, а также их соотношение.

В табл. 1 приведены значения вязкости воды, нефти и газа при температуре  $100,\,120$  и  $140\,^{\circ}\mathrm{C}$  в зависимости от давления.

Таблица 1 Зависимость вязкости, МПа $\cdot$ с, воды, нефти и газа от давления

|                 | Вода |      | Нефть   |         | Газ    |       |
|-----------------|------|------|---------|---------|--------|-------|
|                 |      |      | Давлені | ие, МПа |        |       |
|                 | 35   | 75   | 35      | 75      | 35     | 75    |
| Температура, °C |      |      |         |         |        |       |
| 100             | 0,28 | 0,30 | 0,12    | 0,18    | 0,023  | 0,036 |
| 120             | 0,24 | 0,25 | 0,10    | 0,13    | 0,022  | 0,034 |
| 140             | 0,20 | 0,22 | 0,07    | 0,12    | 0,0215 | 0,033 |
| 160             | 0,18 | 0,19 | 0,06    | 0,09    | 0,021  | 0,031 |

Из табл. 1 видно, что вязкость нефти и тем более газа в пластовых условиях меньше вязкости воды. Такое благоприятное соотношение вязкостей способствует высокой устойчивости фронта вытеснения нефти и газа водой.

Влияние глубины геотермальных скважин на статическую температуру и давление пластовой воды. Статическая температура пластовой воды — истинная температура пластовой залежи на определенной глубине недр Земли, которая характеризует температуру пласта флюида, когда отсутствует отбор или дебит из скважины.

Статическая, или пластовая, температура флюидов зависит от этажа (глубины) скважины и для различных месторождений колеблется в определенных пределах [2]. Статическая пластовая температура флюидов и воды имеет примерно линейный характер и в пределах от 500 до 6000 м по глубине скважин имеет математическую зависимость:

$$t_{\rm CT} = 0.03 \cdot H,\tag{1}$$

где  $t_{\rm cr}$  — статическая пластовая температура флюида (воды), °С; H — глубина скважин, м.

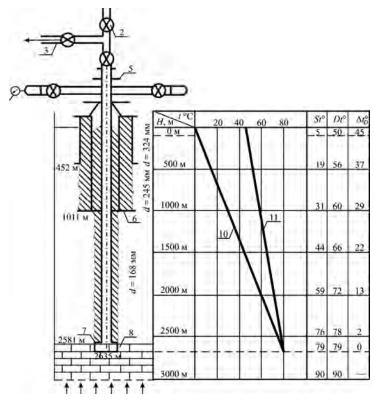


Рис. 1. Статическая и динамическая температура глубины скважины № 30: 1 — буферный технический манометр для измерения статического и динамического давления на устье скважины; 2 — стальные задвижки высокого давления фонтанной арматуры; 3 — трубопроводная линия (шлейф) для подачи пластовой жидкости в технологическую систему; 4 — технический манометр затрубного пространства скважины; 5 — фланцевые соединения высокого давления; 6 — конструкция скважины; 7 — открытый (без обсадной трубной колонны) забой скважины; 8 — продуктивный водонефтегазонасыщенный пласт пористо-трещиноватого известняка; 9 — поток глубинной пластовой жидкости к открытому забою (2635 м) из залежей от водонефтяного контакта (ВНК) на глубине 2466 м; 10 — график глубинной природной ста-

тической температуры  $S_t$ , °C по термоградиенту:  $GT = \frac{3^{\circ}}{100\,\mathrm{m}}$ ; 11 — график глубинной при-

родной динамической температуры действующей геотермальной скважины  $D_t$ , °C; 12 — прогнозные динамические потери температуры по геологическому разрезу реальной скважины № 30 Котовского месторождения за счет потерь природной теплоты в пласты:  $\Delta t_D = S_t - D_t$ , °C

Пластовое давление глубинных скважин Волгоградской области имеет приблизительно линейный характер с использованием зависимостей началь-

ных пластовых давлений от абсолютных отметок контактов Вешняковского, Моисеевского, Ключевского, Подпешинского, Антиповско-Лебжинского и Щербаковского месторождений. Получена математическая функция

$$P = 0.11 \cdot H,\tag{2}$$

где P — пластовое давление, кгс/см $^2$ ; H — глубина скважины, м.

Влияние глубины скважины и дебита геотермальных скважин на температуру флюида на устье скважины. Температура флюида на устье добывающих скважин зависит от глубины забоя, дебита, времени эксплуатации и конфигурации лифта скважин.

Флюиды месторождений законсервированных скважин содержат различное процентное соотношение воды, нефти и газа. Кроме того, 1 т нефти в пластовых условиях равна ≈ 0,67 т нефти после сепарации. Например, Котовское месторождение Волгоградской области: скважина № 119 имеет 97 % воды, скважина № 105 — 99,5 % воды и т.д. Конструкция лифта скважин № 105 и 119 приведена на рис. 2. Внутренний диаметр труб 0,061 м.

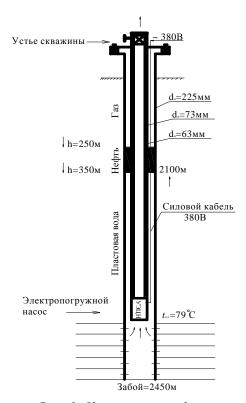


Рис. 2. Конструкция лифта скважин №105 и 119 Котовского месторождения Волгоградской области

При движении флюида по трубам скважины от забоя до устья температура его снижается за счет передачи теплоты в окружающую скважину среду. Вначале процесс теплопередачи и охлаждение флюида идет интенсивно, но постепенно породы, окружающие скважину, нагреваются, перепад температур между потоком флюида и средой уменьшается.

Процесс снижения интенсивности и охлаждения флюида может занимать от нескольких дней до месяца или более в зависимости от дебита. Чем больше дебит флюида, тем быстрее процессы теплопередачи и потерь теплоты в окружающую скважину среду выйдут в стационарный режим.

Полное термодинамическое равновесие между движущимся в скважине флюидом и окружающей скважину средой наступает (как показывает опыт эксплуатации и расчеты) через 5...10 лет эксплуатации скважин. Разница температуры флюида на устье скважин через 10 дней и 10 лет значительна и составляет от 6 до 12 °C.

По условиям отбора флюида температура на устье скважин не должна превышать 90 °C. Это связано с безопасностью сбора, транспорта и хранения нефти, содержащейся в флюиде.

Температура флюида на устье  $t_{\rm ycr}$ , °C, в общем случае может быть определена по формуле

$$t_{\text{VCT}} = t_{\text{IIJI}} - \Delta t_{\text{CK}},$$

где  $t_{\text{пл}}$  — температура пласта, замеренная датчиком, или статическая температура, определяемая по формуле (1), °С;  $\Delta t_{\rm ck}$  — потери температуры флюида в скважине, °С.

Потери температуры  $\Delta t_{\rm ck}$  в скважине зависят от многих факторов: структуры окружающей скважину среды, теплофизических свойств пород, конструкции и дебита скважины, а также времени эксплуатации скважины.

В общем случае температура флюида на устье добывающей скважины

$$t_{\text{VCT}} = f(t_{\text{пл}}; H_{\text{CK}}; G_{\text{CK}}; B; \nabla T),$$

где  $t_{\text{пл}}$  — температура пласта, °С;  $H_{\text{ск}}$  — глубина скважины, м;  $G_{\text{ск}}$  — суточный дебит флюида, т/сут; В — продолжительность эксплуатации скважин, год;  $\nabla T$  — температурный градиент скважины, °С/м.

С использованием методов математического анализа, моделирования, теории подобия, критериальных уравнений получена математическая зависимость, позволяющая с погрешностью до 10 % и надежностью 0,91 определять температуру флюида на устье действующей добывающей скважины. Температура на устье добывающей скважины определяется по формуле

$$t_{\text{VCT}} = 15 + \nabla T \cdot H - c \cdot G^n + 0,001 \cdot m \cdot H \cdot \lg B, \tag{3}$$

где 15 — температура грунта на глубине 25 м, °С;  $\nabla T$  — температурный градиент, °С /м; H — глубина скважины, м; G — суточный дебит флюида, T/сут; B — продолжительность эксплуатации скважин, год; c, n, m — безразмерные коэффициенты, зависящие от дебита и глубины скважин.

Температурный градиент определяется по формуле

$$\nabla T = \frac{t_{\text{III}} - 15}{H - 25},\tag{4}$$

где  $t_{\text{пл}}$  — температура пласта залежи или статическая температура, °C; 15 температура грунта на глубине 25 м,  $^{\circ}$ С; H — глубина скважины, м.

Безразмерный коэффициент c зависит от суточного дебита флюида G и определяется по табл. 2.

Значение коэффициента с

| Дебит, т/сут  | 50   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Коэффициент с | 1330 | 1835 | 2200 | 2330 | 2300 | 2170 | 2025 | 1865 |

Безразмерный коэффициент n зависит от глубины скважины H и определяется по табл. 3.

Таблица 3

Таблица 2

## Значение коэффициента п

| Глубина скважины $H$ , м | 2000  | 2500  | 3000  | 4000 | 4500  | 5000  |
|--------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Коэффициент п            | -0.82 | -0,79 | -0,76 | -0,7 | -0,67 | -0,64 |

Безразмерный коэффициент *т* зависит от дебита скважин и определяется по табл. 4.

Таблица 4

| Дебит, т/сут  | 50  | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Коэффициент т | 0,5 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |

Для примера определим температуру на устье скважины № 8М Моисеевского месторождения Волгоградской области: глубина скважины H = 3800 м; пластовая температура  $t_{\text{пл}} = 116$  °C. Расчет температуры на устье скважины  $t_{\text{уст}}$  проводится по формуле (3) для различных дебитов G и продолжительности эксплуатации 1 месяц, 1 год, 10 лет. Коэффициенты c, n, m выбираются из табл. 2, 3, 4. Результаты расчетов сведены в табл. 5.

Таблица 5 Температура на устье скважины Моисеевского месторождения в зависимости от дебита и продолжительности эксплуатации

|              | Температура на устье скважины $t_{ycr}$ , °С Продолжительность эксплуатации |       |        |  |  |  |  |
|--------------|---|-------|--------|--|--|--|--|
| Дебит, т/сут |   |       |        |  |  |  |  |
|              | 1 месяц   | 1 год | 10 лет |  |  |  |  |
| 50           | 31,2  | 33,3  | 35,2   |  |  |  |  |
| 100          | 42,1  | 46,2  | 50,0   |  |  |  |  |
| 200          | 60,5  | 65,0  | 69,2   |  |  |  |  |
| 300          | 75,0  | 75,4  | 79,6   |  |  |  |  |
| 400          | 79,2  | 83,3  | 87,1   |  |  |  |  |
| 500          | 85,9  | 90,0  | 93,8   |  |  |  |  |
| 600          | 90,7  | 94,4  | 97,8   |  |  |  |  |
| 700          | 95,0  | 98,2  | 101,2  |  |  |  |  |

#### Выводы

Получены формулы для расчета статической пластовой температуры и давления в зависимости от глубины скважины (3) и (4).

Впервые получена формула математической зависимости температуры на устье скважины (3) от пластовой температуры, температурного градиента, глубины, суточного дебита и продолжительности эксплуатации скважины.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Теплофизические свойства горных пород / В.В. Бабаев, В.Ф. Будымка, Т.А. Сергеева и др. М. : Недра, 1987. 156 с.
- 2. Влияние теплофизических свойств пластов на энергетический потенциал геотермальных скважин Нижнего Поволжья / Б.В. Панасов, В.М. Фокин, Е.П. Окунева, Т.Б. Александрина // Энергоэффективность Волгоградской области: специализированный научно-популярный журнал. 2008. № 4.
- 3. Автономные проекты эффективной утилизации природной геотермальной энергии в сельском хозяйстве Волгоградской области / Б.В. Панасов, В.М. Фокин, Т.Б. Александрина, Е.П. Окунева // Материалы Международной научно-практической конференции, 11—12 мая 2007, г. Волгоград. Волгоград, 2008. С. 157—159.

© Гопций Е.П., Фокин В.М., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 УДК 697.98

### В.Н. Азаров, А.С. Лукьянсков, Ю. Г. Самарская

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ АППАРАТОВ ПВ ВЗП С РАСКРУЧИВАТЕЛЯМИ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЫЛИВАЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Проведено исследование по определению аэродинамических характеристик аппарата ПВ ВЗП с раскручивателями. Получены зависимости аэродинамического сопротивления установки от основных влияющих факторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пылеуловители со встречными закрученными потоками; обеспыливание; вентиляция.

It is carried out research by definition of aerodynamic characteristics of device PV VZP with untwist device. Dependences of aerodynamic resistance of installation on the basic influencing factors are received.

Key words: vortex flows dust chambers; dedusting; ventilation.

В настоящее время пылеуловители со встречными закрученными потоками ПВ ВЗП нашли широкое применение в инженерно-экологических системах на предприятиях различных отраслей промышленности. В связи с этим возникло большое разнообразие конструкций этих аппаратов [1]. Одной из особенностей аппаратов ПВ ВЗП является относительно большая высота. В связи с этим при их установке в стесненных условиях применяются раскручиватели потока воздуха. Раскручиватели являются более компактными по сравнению с отводами.

Для исследования влияния ширины, высоты выходного патрубка раскручивателя, длины сепарационной камеры аппарата ПВ ВЗП на аэродинамическое сопротивление пылеуловителя сконструирована экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.

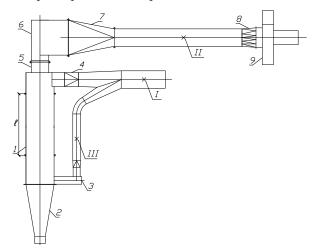


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: I — сепарационная камера; 2 — пылесборник; 3 — нижний закручиватель; 4 — верхний закручиватель; 5 — патрубок вывода очищенного газа; 6 — раскручиватель; 7 — переход; 8 — гибкая вставка; 9 — вентилятор; I, II, III — замерные точки

Основными элементами экспериментальной установки являются: аппарат на встречных закрученных потоках ПВ ВЗП (1), раскручиватель потока воздуха (6).

При проведении исследований методами планирования эксперимента [2] в качестве варьируемых факторов были выбраны: l — длина сепарационной камеры, м; b — ширина выходного патрубка раскручивателя, м; h — высота выходного патрубка раскручивателя, м. В качестве параметра оптимизации выбрано аэродинамическое сопротивление установки  $\Delta P$ , Па.

Был реализован факторный эксперимент [2] порядка типа 3<sup>3</sup> (где 3—число факторов), при этом определяющие факторы были приведены к виду

$$x_1 = \frac{\bar{l}_y - \bar{l}_{y_0}}{\Delta \bar{l}_y}; \ x_2 = \frac{\bar{b}_y - \bar{b}_{y_0}}{\Delta \bar{b}_y}; \ x_3 = \frac{\bar{h}_y - \bar{h}_{y_0}}{\Delta \bar{h}_y},$$

где  $\bar{l}_{y_0}$ ;  $\bar{b}_{y_0}$ ;  $\bar{h}_{y_0}$  — значения соответствующих факторов в центре плана;  $\Delta \bar{l}_y$ ;  $\Delta \bar{b}_y$ ;  $\Delta \bar{h}_y$  — интервалы изменений значения факторов.

Уровни и интервалы варьирования определяющих факторов приведены в табл.

| Фокторы  | Интервалы    | Уровни факторов |            |           |  |  |  |
|--|--------------|-----------------|------------|-----------|--|--|--|
| Факторы  | варьирования | Основной 0      | Верхний +1 | Нижний –1 |  |  |  |
| $\bar{l}$ — длина сепарационной камеры, м                    | 0,4          | 1,28            | 1,68       | 0,88      |  |  |  |
| $\overline{b}$ — ширина выходного патрубка раскручивателя, м | 0,025        | 0,1             | 0,125      | 0,075     |  |  |  |
| h - высота выходного патрубка раскручивателя м               | 0,15         | 0,3             | 0,45       | 0,15      |  |  |  |

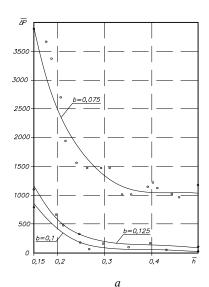
Уровни и интервалы варьирования определяющих факторов

Полученные результаты зависимости аэродинамического сопротивления установки от ширины выходного патрубка, высоты выходного патрубка раскручивателя, длины сепарационной камеры аппарата ПВ ВЗП приведены на рис. 2, a—e.

Для проверки воспроизводимости эксперимента и проведения статистических оценок его результатов проведены две параллельные серии опытов. Оценка воспроизводимости экспериментальных исследований выполнена на основании сопоставления расчетного и табличного критериев Кохрена, на уровне доверительной вероятности p=0.05 результаты экспериментальных исследований воспроизводимы. В качестве функции отклика определялось аэродинамическое сопротивление установки [2]. В результате аппроксимации экспериментальных данных полиномами второй степени с учетом значимости вычисленных коэффициентов на уровне значимости  $\alpha=0.05$ , принятом для технических экспериментов, уравнение регрессии ищем в виде

$$\eta = \eta(\bar{l}, \bar{b}, \bar{h}),$$

$$\eta = 77,95 - 12,42\bar{l} - 51,57\bar{b} - 59,36\bar{h} + 33,79\bar{l}\bar{b} + 27,67\bar{l}\bar{h} + 39,49\bar{b}\bar{h} + 4,302\bar{l}^2 + 8,47\bar{b}^2 + 10,16\bar{h}^2.$$



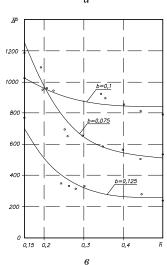
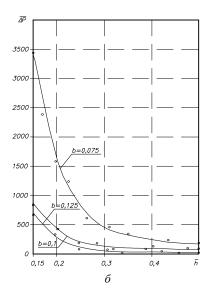


Рис. 2. Экспериментальные зависимости аэродинамического сопротивления установки от ширины и высоты выходного патрубка раскручивателя при длине сепарационной камеры  $\bar{l}: a = 0.88$ ;  $\delta = 1.28$ ;  $\epsilon = 1.68$ 



По результатам исследования наименьшее аэродинамическое сопротивление экспериментальной установки было получено при длине сепарационной камеры l = 1,28 м, что соответствует среднему значению и максимальной ширине b = 0.125 м, высоте раскручивателя h = 0.45 м, и составило  $\Delta P = 29$  Па. При длине сепарационной камеры l = 0.88 м минимальное значение сопротивления получено при ширине раскручивателя b = 0,1 м и максимальной высоте раскручивателя h = 0.45 м  $\Delta P = 47 \ \Pi$ а. При длине сепарационной камеры l = 1,68 м минимальное значение  $\Delta P = 279$  Па получено при максимальной ширине и высоте раскручивателя b = 0.125 м, h = 0.45 м соответственно.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Азаров В.Н.* Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Опыт внедрения : монография. Волгоград : РПК «Политехник» ВолгГТУ, 2003. 36 с.
- 2. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 327с.: ил.

© Азаров В.Н., Лукьянсков А.С., Самарская Ю.Г., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

2001..... 2011. 1.05.1. Cop. 1.01. 2001. 2001. 2001.

УДК 628.511:666.964.3:613.6

#### Л.И. Плеханова, Н.В. Мензелинцева

### СНИЖЕНИЕ ЗАПЫЛЕННОСТИ ВОЗДУХА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ОПЕРАТОРОВ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ЗАВОДОВ КАК ПРОФИЛАКТИКА ПРОФЗАБОЛЕВАНИЙ

Для оценки воздействия пыли на органы дыхания оператора сушильного барабана асфальтобетонного завода исследованы ее физико-химические свойства и дисперсный состав. Разработаны мероприятия по снижению уровня запыленности воздуха рабочей зоны. Определен социально-экономический эффект от уменьшения количества больничных листов, составивший 90 тыс. р./год.

К л ю ч е в ы е с л о в а: запыленность воздуха; пыль, дисперсный состав и физико-химические свойства; профессиональные заболевания; охрана труда.

High dustening of working zones air is one of the main causes of professional diseases of respiratory organs.

Physical and chemical properties of dust and its disperse components are studied to explore influence of dust on respiratory organs of asphaltoconcrete factorys drying machine. Measures for lovering level of dustening of working zones air are developed. Social-economic effect of reducing hospital leaves amount is 90 thousands of rubles per year.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : air dust content; dust, disperse composition and physical-and-chemical properties; occupational diseases; labour protection.

В последние годы в условиях рыночной экономики в строительном комплексе России произошли глубокие организационные и структурные изменения. В связи с ликвидацией строительных министерств была отменена отраслевая система управления охраной труда, что отрицательно сказалось на состоянии условий и охраны труда работников строительной отрасли.

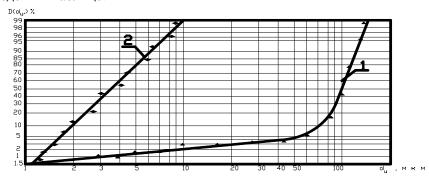
В настоящее время в отраслях строительства и промышленности строительных материалов на тяжелых работах и работах с вредными условиями труда занято около 30 % от списочного состава работающих. Из них более 9 % работают в условиях, не отвечающих требованиям санитарногигиенических нормативов. Следствием неудовлетворительных условий труда на строительных площадках и в цехах предприятий строительной индустрии являются повышенный травматизм и профзаболеваемость [1].

Одной из основных причин возникновения профессиональных заболеваний органов дыхания является повышенная запыленность воздуха рабочей зоны. Фиброгенное и раздражающее действие пыли зависит от ее дисперсного состава и свойств. Вследствие задержки мелкодисперсной пыли в альвеолярной области легких возникает целый комплекс заболеваний. В него входят силикозы, легочные фиброзы, кониозы различных типов, пылевые бронхиты и кожная экзема. Развитию пылевых заболеваний бронхолегочного аппарата предшествует формирование изменений со стороны верхних дыхательных путей в виде суб- и атрофического ринита, фарингита, ларингита, а также тотальные дистрофические изменения верхних отделов дыхательного тракта [2].

В сфере строительного производства к группе риска возникновения заболеваний верхних дыхательных путей относят работников производства асфальтобетона, в частности оператора, обслуживающего сушильный барабан.

Для оценки воздействия пыли на органы дыхания работающего были исследованы ее основные свойства, к которым относят физико-химические свойства и дисперсный состав.

Для проведения дисперсного анализа были отобраны пробы пыли на асфальтобетонных заводах г. Волгограда (ОГУП «Волгоградавтодор», АКОТ «Волгоградагродорстрой» и ДСУ-2). Отбор проб осуществлялся в системе аспирации, обслуживающей сушильные барабаны, а также в зоне загрузочновыгрузочных отверстий сушильных барабанов (запыленный воздух от разгрузочной части отсасывается из бункера и от укрытия тарельчатого питателя, а также от зонта над топочными дверцами, у разгрузочной части сушильного барабана пыль отсасывается из бункера и мест пересыпки на конвейер). Для определения дисперсного состава пыли применялась усовершенствованная методика микроскопического анализа с применением ПК и программы цифровой обработки отсканированного изображения DUST [3]. На рисунке приведены результаты дисперсионного анализа пыли, отобранной в системе аспирации (кривая 1), из которых следует, что пыль имеет среднемедианный диаметр  $d_{50} = 70$  мкм, диапазон изменения крупности 1...110 мкм. Результаты исследования основных физико-химических свойств асфальтобетонной пыли приведены в таблице.



Интегральная кривая распределения массы по диаметрам частиц  $D(d_{\rm q})$  в вероятностно-логарифмической координатной сетке для асфальтобетонной пыли: 1 — в системе аспирации; 2 — после зернистого фильтра

Физико-химические свойства асфальтобетонной пыли

| Свойство пыли, единицы измерения                                   | Величина             |
|--|----------------------|
| Плотность материала частиц пыли, кг/м <sup>3</sup>                 | 2600                 |
| Насыпная плотность в неуплотненном состоянии, г/см <sup>3</sup>    | 990                  |
| Насыпная плотность при максимальном уплотнении, кг/м <sup>3</sup>  | 1230                 |
| Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>                             | 620                  |
| Статический угол естественного откоса, град                        | 61,5                 |
| Динамический угол естественного откоса, град                       | 37                   |
| Разрывная прочность пылевого слоя, Па                              | 34                   |
| Коэффициент абразивности (в пересчете на Ст 3), $M^2/\kappa\Gamma$ | $0.3 \cdot 10^{-10}$ |
| Диспергируемость, %  | 83                   |

Частицы пыли остроугольные, неправильной формы, большинство частиц размером крупнее 5 мкм. Частицы мельче 5 мкм имеют игольчатую форму. Удельная поверхность частиц  $S_{v\pi} = 2700 \text{ cm}^2/\Gamma$ .

Для снижения запыленности на рабочем месте и повышения эффективности улавливания твердых частиц разработан аппарат на базе зернистого фильтра, где в качестве первой ступени может использоваться циклон. Аппарат включает в себя фильтр, содержащий зернистый фильтрующий материал, циклон, пылевыгрузочное устройство, патрубки подвода запыленного и отвода очищенного воздуха. Циклон выполнен в прямоточном исполнении и расположен над фильтром. Аппарат позволяет использовать крупные и средние фракции пыли, уловленной циклоном в качестве зернистого фильтрующего материала.

Процесс очистки воздуха от пыли осуществляется ступенчато. Запыленный поток воздуха подается через входной патрубок в циклон, где происходит I ступень очистки, под действием сил гравитации крупные и средние фракции пыли оседают между коаксиально расположенными жалюзийными решетками фильтра и, накапливаясь, образуют зернистый фильтрующий слой с размером частиц от 100 до 25 мкм, обусловливающих высокую насыпную плотность за счет увеличения объема пор и пустот между частицами пыли. ІІ ступень очистки воздуха осуществляется в фильтре. Поток с тонкодисперсными фракциями пыли проходит через зернистый фильтрующий слой, при этом очищенный воздух проходит через отверстия в наружной жалюзийной решетке, скапливается в зазоре и затем отводится через патрубок, а фильтрующий зернистый материал с уловленной тонкодисперсной пылью под действием сил гравитации опускается вниз и скапливается в конусе пылевыгрузочного устройства, откуда удаляется по мере необходимости при срабатывании весового дозатора. Вся уловленная пыль возвращается в производство [4]. Эффективность очистки составляет 99.5 %.

Проведенный дисперсионный анализ пыли после зернистого фильтра (кривая 2) показал, что среднемедианный ее диаметр  $d_{50}$ = 3,7 мкм, диапазон изменения крупности 1,1...10 мкм, что подтверждает эффективность применения данного аппарата.

Социально-экономический эффект за счет снижения количества больничных листов составляет 90 тыс. р./год.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Безопасность труда в строительстве : учебное пособие / Д.В. Коптев, Г.Г. Орлов, В.И. Булыгин и др. М. : Изд-во АСВ, 2003. 352 с.
- 2. Реакции организма человека на воздействие опасных и вредных производственных факторов (Метрологические аспекты) : справочник : в 2-х т. : Т. 2. Оценка реакций организма человека на воздействие опасных и вредных производственных факторов / под. ред. Б.В. Бирюкова. М. : Изд-во стандартов, 1991. 367 с., ил.
- 3. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) / В.Н. Азаров [и др.] // Законодательная и прикладная метрология. 2004. № 1. С. 46—48.
- 4. Двухступенчатый фильтр-циклон : пат. 74307 / Плеханова Л.И., Мензелинцева Н.В., Азаров В.Н., опубл. 27.06.2008, бюл. № 18.

© Плеханова Л.И., Мензелинцева Н.В., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

УДК 697.94

#### М.А. Гвоздков

# МЕХАНИЗМ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА В СИСТЕМЕ ВОЗДУХ — LICI

Рассмотрены особенности протекания процессов тепло- и влагообмена между воздухом и раствором хлористого лития с учетом явлений на границе раздела сред.

Приведены результаты анализа влияния концентрации раствора на протекание обменных процессов в условиях сорбции и десорбции влаги из воздуха.

К л ю ч е в ы е с л о в а: хлористый литий, концентрация, тепло- и влагообмен, коэффициент влагообмена, равновесное состояние.

The paper considers the specific features of the progress of heat and moisture exchange processes between air and lithium chloride solution taking into account the phenomena occurring at the boundary line of mediums.

The paper presents the analysis of the influence of the solution concentration on the progress of exchange processes in the conditions of sorption and desorption of moisture from air.

K e y w o r d s: Lithium chloride, concentration, heat and moisture exchange, coefficient of moisture exchange

Перспективным способом сокращения потребления энергии в системах кондиционирования воздуха и вентиляции (СКВиВ) является использование вторичных энергоресурсов (ВЭР), в частности теплоты и влаги низкопотенциальных вентиляционных выбросов [1].

В последнее время предложен ряд схемных решений систем утилизации ВЭР с промежуточным теплоносителем в виде водного раствора хлористого лития (LiCl) на базе контактных аппаратов [2, 3].

Использование раствора LiCl позволяет значительно расширить границы обработки воздуха, исключить нерациональные режимы их работы и т.д.

Описание процессов тепло- и влагообмена между воздухом и LiCl в контактных аппаратах в основном представляется в виде критериальных зависимостей типа

$$Nu = f(Re, Pr, Ar, T, p, ....);$$
 (1)

$$Nu' = f(Re, Pr', Ar, Sp, T, p, ...),$$
 (2)

где Nu, Nu' — тепловой и диффузионный критерии Нуссельта; Re, Ar — гидродинамические критерии Рейнольдса и Архимеда; Sp — критерий Стефана, учитывающий влияние поперечного потока влаги; T, p — параметрические критерии для учета начальных условий взаимодействующих сред.

Анализ критериальных зависимостей, полученных различными авторами [4, 5], показывает, что они носят частный характер и справедливы только для расчета процессов тепло- и влагообмена (ТВО) применительно к конкретным видам контактных аппаратов.

При этом авторами не учитываются условия ТВО на границе раздела сред, физико-химические особенности раствора LiCl и др., ввиду чего получаемые значения обменных коэффициентов имеют большой разброс значений (до 40 %), а выводы, получаемые авторами, носят противоречивый характер.

При данных обстоятельствах возникла необходимость проведения исследований по изучению механизма протекания процессов ТВО между воздухом и раствором LiCl.

*Метод исследования и результаты*. Для установления механизма протекания процессов ТВО в системе воздух — LiCl был использован термодинамический подход, основанный на теории потенциала влажности.

По своему термодинамическому смыслу потенциал влажности — это полный термодинамический потенциал влаги, определяющий ее состояние во всех фазах при различных значениях влажности и температуры [6]. Согласно теории потенциала влажности движущей силой процесса влагообмена является градиент, или разность потенциалов влажности, которая определяет предел переходного процесса влагообмена для взаимодействующих сред.

Для характеристики состояния влаги в системе воздух — LiCl используется единое термодинамическое уравнение относительно изменения свободной энергии в виде

$$dF = -sdT + \Theta dm, (3)$$

где  $\Theta$  — полный термодинамический потенциал состояния влаги в системе.

Как известно, на контакте сред находится переходная область, включающая в себя пограничные и поверхностные фазы со стороны воздуха и жидкости, в пределах которой характеристики сред изменяются от значений в одной до значений в другой объемных фазах [7].

Термодинамическая модель системы воздух — LiCl приведена на рис. 1.

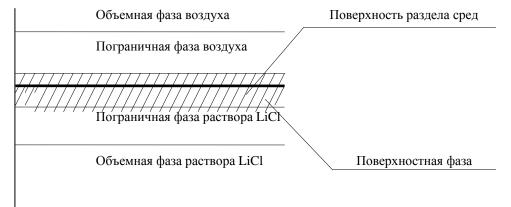


Рис. 1. Термодинамическая модель системы воздух — LiCl

В пределах поверхностной фазы находятся молекулы воды, направление перемещения которых относительно поверхности раздела сред зависит от состояния контактирующих сред в их объемных фазах.

Рассмотрим физико-химические свойства раствора хлористого лития.

Как известно, LiCl является сильным электролитом, диссоциированным на ионы, которые окружены молекулами воды, имеющими дипольное строение. Молекулы воды находятся в сольватных оболочках ионов  ${\rm Li}^+$  и  ${\rm Cl}^-$ . Различают первую, вторую и т.д. оболочки.

Наиболее сильными являются связи между ионами и первой сольватной оболочкой, приведенной на рис. 2.

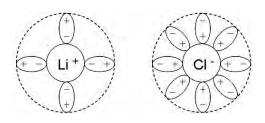


Рис. 2. Структура первой сольватной оболочки и<br/>онов  ${\rm Li}^+$  и  ${\rm Cl}^-$ 

Число частиц в первой сольватной оболочке называется координационным числом сольвации. Для ионов  ${\rm Li}^+$  координационное число равно 4, а для  ${\rm Cl}^-$  — 8, т.е. одна молекула LiCl связывает 12 молекул воды.

При концентрации раствора LiCl, когда вся наличная влага включена в гидратные сферы, наблюдается граница полной гидратации (ГПГ).

Она связана с определенной концентрацией раствора и составляет 16,4 % (1 г-моль LiCl связывает 12 г-молей воды, т.е. 42,3 г LiCl связывает 216 г воды, что соответствует концентрации раствора  $\varepsilon_p$  = 16,4 %).

Таким образом, ГПГ является одним из определяющих факторов при изучении механизма процессов ТВО между воздухом и раствором LiCl.

Также следует отметить то обстоятельство, что LiCl относится к поверхностно инактивным веществам (ПИВ) [8]. При растворении ПИВ в воде происходит их самопроизвольное вытеснение из пограничной фазы в объемную фазу раствора. Из сказанного выше следует, что концентрация раствора LiCl в пограничной фазе будет несколько ниже, чем в объемной.

Анализ экспериментальных данных, полученных в [3], показал, что минимальное изменение концентрации раствора составляет 2,5...3 %.

Рассмотрим характерные сочетания параметров воздуха и раствора LiCl, приведенные на I-d- $\Theta$ -диаграмме (рис. 3).

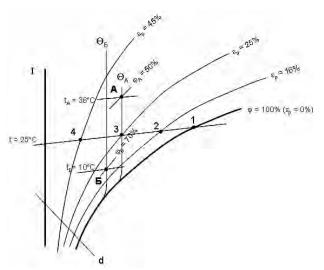


Рис. 3. Характерные сочетания параметров воздуха (т. А и Б) и раствора LiCl (т. 1, 2, 3 и 4) на *I-d*- $\Theta$ -диаграмме: параметры воздуха в объемной фазе (т. А —  $t_c$ =36 °C,  $\varphi$  = 50 %; т. Б —  $t_c$ =10 °C,  $\varphi$ =70 %), параметры раствора LiCl в его объемной фазе (т. 1, 2, 3, 4) составляют:  $t_p$ =25 °C,  $\epsilon_p$ =0...45 %

При значениях параметров воздуха в объемной фазе  $t_A = 36$  °C,  $\phi_A = 50 \%$  (т. A) и изменении параметров раствора LiCl, в частности его концентрации от 0 (т. 1) до 25 % (т. 3) разность потенциалов влажности  $\Delta\Theta =$  $=\Theta_{\rm p}-\Theta_{\rm B}>0,$ т.е. будет иметь место процесс десорбции, т.е. поток влаги будет направлен от раствора к воздуху.

При повышении концентрации раствора от 25 % (т. 3) до 45 % (т. 4) разность потенциалов влажности  $\Delta$   $\Theta$  =  $\Theta_p$ – $\Theta_в$ <0, т.е. будет иметь место процесс сорбции, когда поток влаги будет направлен от воздуха к раствору.

В условиях десорбции при концентрации раствора  $\epsilon_p = 0...16,4$  % связи ионов LiCl и воды ослаблены и молекулы воды практически свободно могут перемещаться из объемной фазы раствора в объемную фазу воздуха. В данных условиях концентрация раствора не будет оказывать существенное влияние на результирующее значение коэффициента влагообмена.

При увеличении концентрации раствора  $\varepsilon_p$  от 16,4 до 25 % будет иметь место усиление межмолекулярных связей, молекулы воды начнут отбираться от сольватных оболочек, поэтому будут активно удерживаться в объемной фазе растворе LiCl. То есть увеличение концентрации раствора приводит к снижению интенсивности процесса десорбции, в результате чего будет иметь место снижение результирующих значений коэффициента влагообмена.

В условиях сорбции при максимальных значениях концентрации раствора  $\epsilon_p=40...45$  %, когда раствор близок к состоянию насыщения (т. 4), связи ионов LiCl и воды очень сильны. В данном случае раствор имеет максимальную сорбционную активность, а положительная разность потенциалов массопереноса ( $\Delta\Theta=\Theta_{\rm B}-\Theta_{\rm p}>0$ ) усиливает процесс сорбции, результирующее значение коэффициента влагообмена имеет максимальное значение.

По мере приближения к равновесному состоянию между параметрами воздуха и раствора в их объемных фазах (т. 3,  $\varepsilon_p$ = 25 %)  $\Delta\Theta=\Theta_B-\Theta_p=0$ , процесс влагообмена прекращается, однако сорбционная активность раствора сохраняется ввиду того, что  $\varepsilon_p$  превышает 16,4 % соответствующей ГПГ.

Таким образом, при изучении механизма процессов тепло- и влагообмена в системе воздух — LiCl следует учитывать два определяющих фактора:

движущие силы влагообмена ( $\Delta\Theta$ ), которые определяют направление протекания процесса и предельное равновесное состояние;

силы межмолекулярного взаимодействия в объемной фазе раствора (относительно  $\Gamma\Pi\Gamma$ ), изменяющие сорбционные свойства LiCl при изменении его концентрации.

Для установления количественных зависимостей необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования процессов тепло- и влагообмена с учетом явлений на поверхности раздела фаз.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Петров Л.В. Эффективность применения устройств теплоутилизации в системах вентиляции и кондиционирования воздуха // Современные системы теплогазоснабжения и вентиляции : сб. тр. М. : МГСУ. 2003.
- 2. *Богословский В.Н., Поз М.Я.* Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983.
- 3. Гвоздков А.Н. Использование систем с промежуточным теплоносителем для целей кондиционирования параметров воздуха и утилизации ВЭР / Материалы международного научного симпозиума «Экология и безопасность жизнедеятельности». Ч. 2. Волгоград, 1996.
- 4. Гвасалия Т.Г. Исследование процессов воздушной десорбции в системах кондиционирования воздуха при нагреве растворов хлористого лития низкотемпературной водой: дис. канд. техн. наук; МИСИ им. В.В. Куйбышева. М., 1978.
- 5. Внутренние санитарно-технические устройства : в 3-х ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха : кн. 2 / Б.В. Баркалов, Н.Н. Павлов, С.С. Амирджанов и др. ; под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. М. : Стройиздат, 1992.
- 6. *Богословский В.Н., Гвоздков А.Н.* Процесс тепловлагообмена с позиции теории потенциала влажности // Водоснабжение и санитарная техника. 1994. № 3.
  - 7. Русанов А.И. Поверхностные явления в жидкостях и жидких растворах. Л.: Химия, 1971.
- 8. *Мищенко К.П., Полторацкий Г.М.* Термодинамика и строение водных и неводных растворов электролитов. Л. : Химия, 1976.

Поступила в редакцию 06.04.09

© Гвоздков М.А., 2009

УДК 697.94

#### А.Н. Гвоздков, М.А. Гвоздков

# ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА В ФОРСУНОЧНОЙ КАМЕРЕ ОРОШЕНИЯ КАПЕЛЬНО-ПЛЕНОЧНОГО ТИПА

Представлены результаты разработки конструкции форсуночной камеры орошения капельно-пленочного типа и экспериментального изучения процессов тепло- и влагообмена.

Ключевые слова: контактный аппарат, процесс тепло- и влагообмена.

The paper presents the results of the development of the construction of trickling-film spray air washer, and of the experimental study of heat and moisture exchange processes.

K e y w o r d s: contacting unit, heat and moisture exchange.

Повышение эффективности систем кондиционирования воздуха и вентиляции (СКВиВ) связано с решением вопросов оптимизации их энергопотребления и снижения затрат энергии на тепловлажностную обработку приточного воздуха в контактных аппаратах.

Наиболее широкое применение в СКВиВ получили форсуночные камеры орошения ( $\Phi$ KO), которые используются в качестве блок-секций центральных кондиционеров или воздухоприготовительных центров.

В ФКО поверхность контакта образуется каплями воды, разбрызгиваемой форсунками. При этом происходит диспергирование воды на достаточно мелкие капли, что обеспечивает развитую поверхность контакта. Следует отметить, что площадь контакта сильно зависит от числа капель, их величины, скорости движения относительно воздуха и траектории движения в рабочем пространстве камеры орошения. В свою очередь, на эти параметры влияет конструкция форсунок, давление воды, направление выпуска воды относительно воздуха и др.

Таким образом, имеет место сложный характер взаимодействия воздуха и воды, что затрудняет дать однозначную оценку эффективности протекания процессов тепло- и влагообмена (ТВО) [1].

Особенностью работы ФКО в процессе ее эксплуатации является изменение в широком диапазоне начальных тепловлажностных параметров и расходов контактирующих сред. Это приводит к нарушению оптимальных условий взаимодействия и снижению интенсивности протекания процессов тепло- и влагообмена.

Критический анализ известных технических решений, направленных на оптимизацию работы ФКО, показал, что для интенсификации процессов обработки воздуха предлагаются более совершенные конструктивные решения рабочего пространства и способы образования поверхности контакта. Однако при этом не учитывается изменение режимов работы ФКО и, как следствие этого, возможность нарушения гидродинамических условий взаимодействия из-за неравномерного распределения жидкости по высоте камеры, особенно в нижней ее части, что значительно снижает эффективность ее работы.

С учетом данного обстоятельства было предложено использовать плоскопараллельную насадку в нижней части камеры орошения, которая позволяет

стабилизировать гидродинамические условия взаимодействия, увеличить площадь контакта воздуха и воды, уменьшив при этом неравномерность обработки воздуха в живом сечении.

Для исследования протекания процессов тепло- и влагообмена в форсуночной камере орошения капельно-пленочного типа и определения ее теплотехнических характеристик был изготовлен опытно-промышленный образец ФКО, на базе которого был разработан экспериментальный стенд, представляющий собой малогабаритную приточную установку (рис. 1).

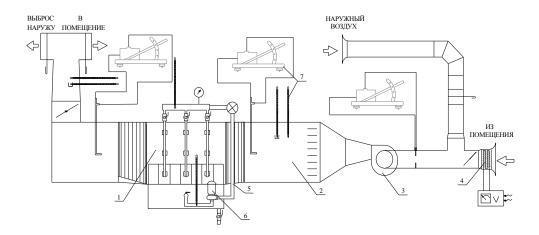


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

Экспериментальный стенд состоит из форсуночной камеры 1, участков стабилизации потока и аэродинамических замеров 2 и центробежного вентилятора 3, электронагревателя 4, циркуляционного трубопровода 5 с центробежным насосом 6 и комплекта измерительных приборов 7.

В камере орошения предусмотрена возможность установки трех рядов форсунок, расстояние между которыми 225 мм. Общая длина испытываемой камеры, включая входной и выходной сепараторы, составляет 1330 мм. От входного сепаратора до первого рада форсунок и от третьего ряда форсунок до выходного сепаратора принято расстояние 190 мм.

В нижней части камеры, над зеркалом воды, размещена плоскопараллельная насадка с возможностью ее перемещения на высоту 200 мм.

При проведении экспериментальных исследований имело место изучение адиабатических процессов обработки воздуха. В качестве основных факторов, влияющих на интенсивность протекания процессов тепло- и влагообмена, рассматривались коэффициент орошения, скорость движения воздуха, а также конструктивные особенности рабочего пространства форсуночной камеры орошения, в частности высота насадки и количество рядов форсунок.

Экспериментальные исследования были проведены в следующем диапазоне изменения параметров воздуха:  $t_c = 21,2...27,8$  °C;  $t_H = 11,8...18,1$  °C. Изменение коэффициента орошения B проводилось в диапазоне B = 0,46...3,0 кг/кг. Изменение массовой скорости  $\nu\rho$  проводилось в диапазоне  $\nu\rho = 1,08...2,35$  кг/м²с.

В процессе проведения экспериментов изменялись следующие конструктивные характеристики:

высота насадки (h = 0...200 мм) при соответствующем значении отношения H/(H-h) = 1...1,48;

число рядов форсунок n = 1...3.

На основании замеренных параметров воздуха определялись основные показатели, характеризующие интенсивность протекания процессов тепло- и влагообмена в аппарате.

Для обобщения результатов исследования и получения аналитических зависимостей, описывающих процессы тепло- и влагообмена, были использованы методы теории подобия.

Результаты экспериментов обрабатывались

в явном виде:

$$E_a = f = (v\rho; B; H / (H - h)), \tag{1}$$

в критериальном виде:

$$Nu; Nu' = f(Re; Pr, H/(H-h)).$$
(2)

Математическая обработка графической зависимости позволила получить аналитическое выражение описания коэффициента адиабатической эффективности в виде

$$Ea = 0,675(\nu\rho)^{0.13}B^{0.16}(H/(H-h))^{0.5}.$$
(3)

Уравнение справедливо в следующих диапазонах изменения основных параметров:  $v\rho = 1,08...2,35 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{c}$ ; B = 0,46...3,01 кг/кг; H / (H - h) = 1...1,48.

При математической обработке графических зависимостей в критериальном виде для учета соотношения толщин динамического и теплового пограничных слоев вблизи поверхности раздела использован критерий Прандтля в степени 0,33.

При обобщении результатов экспериментальных исследований по теплообмену использовался критерий Nu, учитывающий в качестве движущей силы теплообмена разность температур.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить аналитическое выражение для описания процессов теплообмена в виде:

Nu = 3758,3 Re<sup>0,4</sup> Pr<sup>0,33</sup> 
$$(H/(H-h))^{0,54}$$
. (4)

Диапазоны изменения параметров основных критериев находились в диапазоне: Re = 35000...75000; H/(H-h)=1...1,48.

При обобщении результатов экспериментального исследования по влагообмену использовался критерий Nu', учитывающий в качестве движущей силы влагообмена разность парциальных давлений.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить аналитическое выражение для описания процессов влагообмена в виде

$$Nu' = 342,6 \operatorname{Re}^{0.52} \operatorname{Pr}^{0.33} (H/(H-h))^{0.52}.$$
 (5)

Диапазоны измерения основных критериев аналогичны вышеприведенным для процессов теплообмена.

Результаты, полученные по выражениям (1), (2), (3), хорошо совпадают с опытными данными. Результаты сравнения приведены в таблице.

Сравнение опытных и расчетных данных, полученных при испытании форсуночной камеры орошения капельно-пленочного типа

| No on   | № оп. <i>H/(H-h)</i> | Re    | Опытные            | значения            | По формулам        |                     |  |
|---------|----------------------|-------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--|
| Nº OII. |                      |       | Nu·10 <sup>5</sup> | Nu'-10 <sup>4</sup> | Nu·10 <sup>5</sup> | Nu'-10 <sup>4</sup> |  |
| 1       | 1,48                 | 75000 | 3,06               | 9,87                | 3,11               | 9,865               |  |
| 2       | 1,48                 | 35000 | 2,19               | 7,19                | 2,2                | 7,205               |  |
| 3       | 1,2                  | 35000 | 2,186              | 7,07                | 2,2                | 7,05                |  |
| 4       | 1,2                  | 75000 | 2,565              | 8,41                | 2,52               | 8,4                 |  |

Для оценки термодинамической эффективности процессов тепло- и влагообмена использовались относительные избыточные значения величин потенциалов влажности  $E_{\square}$  и температуры  $E_{t}$ :

$$E_{\theta} = \frac{\theta_{H}^{B} - \theta_{B}^{K}}{\theta_{H}^{B} - \theta_{W}^{K}} \qquad E_{t} = \frac{t_{H}^{B} - t_{B}^{K}}{t_{H}^{B} - t_{W}^{K}}, \tag{6}$$

где  $\theta_{\rm B}^{\rm K}; \theta_{\rm B}^{\rm H}; \theta_{\rm K}^{\rm K}$  — начальные и конечные значения потенциалов влажности воздуха и воды;  $t_{\rm B}^{\rm H}; t_{\rm K}^{\rm K}$  — начальные и конечные значения температуры воздуха и воды.

Выводы

Было установлено, что более эффективным будет считаться тот контактный аппарат, который обеспечивает максимальные значения  $E_{\theta}$  и  $E_{t}$  в наиболее широком диапазоне изменения начальных параметров контактирующих сред при сохранении оптимальных гидродинамических условий их взаимодействия.

Обработка экспериментальных данных с использованием относительных избыточных значений  $E_{\theta}$  и  $E_{t}$  позволила установить, что при использовании плоскопараллельной насадки эффективность процессов тепло- и влагообмена возрастает в среднем на 6...10~%.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Андреев Е.И*. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. Л. : Энергоатомиздат, 1985.
- 2. *Богословский В.Н.*, *Поз М.Я.* Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983.

© Гвоздков А.Н., Гвоздков М.А., 2009

Поступила в редакцию 06.04.09

# ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.345.1

#### А.Б. Голованчиков, Н.О. Сиволобова, М.Г. Новиков

#### ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

Приведено описание гидродинамического способа обеззараживания воды, а также результаты исследований его использования.

К лючевые слова: обеззараживание воды; кавитация; дросселирование.

Authors describe a hydrodynamic way of disinfecting of water and also results of researches of its use.

Keywords: water disinfection; cavitation; throttling.

Обеззараживание воды является важнейшим процессом для обеспечения биологического и санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Процессы обеззараживания применяются в качестве заключительных стадий как водоподготовки, так и очистки и обезвреживания сточных вод. Современные жесткие требования к качеству обезвреженной воды вынуждают искать различные пути отказа от традиционных реагентных методов обеззараживания, вносящих изменения в ее химический состав.

Одним из направлений безреагентной обработки является использование гидромеханических воздействий [1].

Известно, что при ускорениях, превышающих 10g (g — ускорение силы тяжести), наблюдается разрушение кровеносных сосудов у млекопитающих. Разрушение простейших клеточных требует более значительных ускорений, оцениваемых величиной порядка 100...1000g.

По данным [2] возможно механическое разрушение простейших клеточных при сильных гидродинамических воздействиях. Такой способ обеззараживания позволяет отказаться от реагентов и не вызывает изменения химических и физико-химических свойств жидкости (которые возможны при электролизе), природа и степень опасности которых неизвестны.

Достаточно сильное гидродинамическое возмущение можно вызвать с помощью процессов кавитации и дросселирования. Осуществление этих методов не требует создания специального оборудования и больших энергозатрат.

Кавитационное течение — это явление парообразования и выделения воздуха, обусловленное понижением давления жидкости. Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкостях становится ниже некоторого критического, соответствующего порогу кавитации. Процесс расширения пузырьков-зародышей обусловлен: давлением газа и пара в пузырьках, превышающим давление в окружающей жидкости; диффузией газа в пузырьки из жидкости; испарением жидкости и увеличением массы пара в пузырьке, коагуляцией зародышей. Повышение давления может привести к полному исчезновению пузырьков (захлопыванию), причем давление в пузырьках перед захлопыванием может быть очень большим. При захлопывании пузырьков в кавитационной области возникают мощные гидродинамические возмущения в виде сильных импульсов сжатия (микроударных волн), что вызывает разрушение поверхности тел (микроорганизмов), граничащих с кавитирующей жидкостью.

Установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1, состоит из центробежного насоса I с входным 2 и выходным 3 патрубками и рабочим колесом 4, эжекторной трубки 5, установленной осесимметрично с входным патрубком 2 центробежного насоса и всасывающим трубопроводом 6. На эжекторной трубке 5 расположены расходомер воздуха 7 и регулирующий вентиль 8, а на выходном патрубке 3 установлены датчики давления 9, расхода воды 10 и температуры воды 11. Рабочее колесо 4 центробежного насоса 11 соединено с приводом 111, а входной патрубок 111 с исходной водой. Выходной патрубок 1111 центробежного насоса 1111 с исходной водой. Выходной патрубок 1111 центробежного насоса соединен с нагнетательным трубопроводом 1111

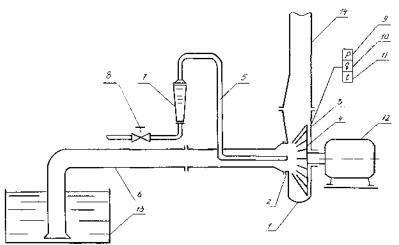


Рис. 1. Установка для кавитационного обеззараживания воды

Расход воздуха, подаваемого для аэрации воды под разряжением, устанавливается так, чтобы он составлял 0...1,2 от предельной растворимости воздуха, соответствующей температуре воды. Возникающие вблизи лопаток центробежного насоса зоны пониженного давления — области разряжения — приводят к кавитационному течению.

Максимальная степень обеззараживания при кавитационной обработке воды составляет 70 %. Зависимость бактерицидного эффекта от доли предельной растворимости воздуха имеет выраженный максимум. Это говорит о том, что процесс обеззараживания возможно проводить только в строго ограниченной области значений объемов воздуха, подаваемого на аэрацию.

Высокая степень обеззараживания воды достигается при ее аэрации под разряжением и кавитации в зоне рабочего колеса насоса, при этом аэрация воды составляет 0,6...1 от предела растворимости воздуха в воде при температуре ее обработки и соответствующем давлении на выходе насоса.

Увеличение аэрации воды сверх предела растворимости воздуха в воде при температуре ее обработки и соответствующем давлении на выходе насоса резко снижает эффект обеззараживания из-за демпфирующего влияния избыточных пузырьков воздуха, нивелирующих кавитационные колебания давления в зоне рабочего колеса насоса. Кроме того, чрезмерное количество воздуха в воде приводит к «захлебыванию» насоса и отрицательному явлению помпажа.

Уменьшение аэрации воды ниже предела 0,6 от максимально возможной растворимости воздуха в воде при температуре ее обработки и соответствующем давлении на выходе насоса также резко снижает степень обеззараживания из-за ограниченного кавитационного эффекта в зоне рабочего колеса насоса.

Экспериментальные исследования по влиянию кавитации на степень обеззараживания показали, что 100 % обеззараживания не достигается. Объяснить это можно тем, что не вся жидкость попадает в область кавитации. Для увеличения степени обеззараживания целесообразно использовать каскад установок.

Предлагаемый способ обеззараживания воды можно использовать для обеззараживания и других жидкостей и растворов при соответствующем растворении в них воздуха, так как кавитационный эффект имеет место во всех жидкостях.

Также вместо воздуха можно подавать воздух, обогащенный кислородом или озоном. В этом случае помимо кавитационного эффекта обеззараживания возникает дополнительный эффект обеззараживания за счет интенсивного окисления. Расход газовой фазы в этом случае выбирается с учетом максимальной ее растворимости при рабочей температуре жидкости и ее давлении в выходном патрубке.

Кроме того, вместо центробежных насосов можно использовать осевые насосы, также приводящие к кавитации при аэрации воды.

Предлагаемый способ обеззараживания воды прост в реализации, и его несложно внедрить на действующих станциях водоподготовки, в плавательных бассейнах, коммунальных предприятиях по очистке бытовых стоков и станциях очистки промышленных сточных вод.

По результатам исследований получен патент России [5].

Достаточно сильное гидродинамическое возмущение, также приводящее к механическому разрушению микроорганизмов, может быть вызвано с помощью процесса дросселирования.

Дросселирование — процесс необратимого понижения давления струи жидкости при прохождении через сужение в канале. Если вследствие какого-либо препятствия поперечное сечение струи внезапно сужается, а затем расширяется, происходит падение давления в объеме жидкости, расположенном за источником гидравлического сопротивления, что объясняется значительным трением в месте сужения. Уменьшение давления в потоке не сопровождается внешней работой, поэтому процесс является необратимым. При дросселировании работа расширения струи жидкости полностью затрачивается на образование турбулентных завихрений и преодоление сопротивления трения.

Можно предположить, что при определенных условиях дросселирование воды приведет к разрушению микроорганизмов. Резкий перепад давления, «вскипание» воды в результате возникновения и роста пузырьков газа (микроскопический пузырек, попадая в область разряжения, сильно расширяется, так как давление содержащихся в нем пара и газа оказывается больше давления в жидкости) являются факторами обеззараживания.

Предполагается, что механизм процесса обеззараживания при дросселированиии следующий.

Микроорганизмы, содержащиеся в газожидкостной смеси, находятся в течение некоторого времени в области высокого давления. При этом происходит насыщение их газами (за счет диффузии и химических процессов, протекающих в клетке) до величины, соответствующей температуре и давлению среды. При последующем дросселировании газожидкостной смеси происходит резкое снижение предельной растворимости газов в среде, приводящее к образованию пузырьков газа как в жидкости, так и в клетках микроорганизмов. Последние при этом погибают. Гибель микроорганизмов может быть обусловлена как изменением физических свойств клеток (давления, объема), так и нарушением химических процессов, протекающих в них.

Установка для обработки воды методом дросселирования, принципиальная схема которой представлена на рис. 2, состоит из корпуса 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками и рабочим колесом 4, газового патрубка 5 с регулирующим вентилем 6, соединенных с центральной трубой 7, установленной осесимметрично с входным патрубком 2. Выходной патрубок 3 корпуса герметично соединен с входным патрубком 8 емкости высокого давления 9, на выходном патрубке 10 которой установлен дросселирующий клапан 11.

Под действием разряжения, создаваемого в центре вращающегося рабочего колеса 4, очищаемая жидкость всасывается во входной патрубок 2. Из-за возникающего эжекционного эффекта по газовому патрубку 5 и центральной трубе 7 одновременно с подачей жидкости в центр вращающегося рабочего колеса 4 всасывается газ. Газожидкостная смесь центробежными силами отбрасывается по лопаткам рабочего колеса 4 от центра к периферии с увеличением давления до 2...6 атм. Так как с повышением давления растворимость газа в жидкости возрастает, то часть газа растворяется в жидкости, которая по выходному патрубку 3 через входной патрубок 8 поступает в емкость 9 высокого давления. За время пребывания в емкости 9 клетки микроорганизмов, содержащиеся в очищаемой жидкости, в результате своей жизнедеятельности насыщаются растворенными в жидкости при высоком давлении газом. При открывании дросселирующего клапана 11, установленного на выходном патрубке 10, давление в жидкости быстро изменяется от 2...6 атм до 1 атм. При такой быстрой декомпрессии растворимость газа в жидкости резко уменьшается и происходит разрушение клеток микроорганизмов из-за увеличения внутри них объема свободных пузырьков газа.

Максимальная степень обеззараживания составляет 85 %. Бактерицидный эффект зависит от времени обработки и находится в пределах от 8 до 30 мин. в зависимости от перепада давления. Выбор рабочего перепада давления обусловлен только технологическими и экономическими показателями, так как максимального бактерицидного эффекта (85 %) можно достичь при любом давлении (2...6 атм) при соответствующем оптимальном времени пребывания в зоне повышенного давления.

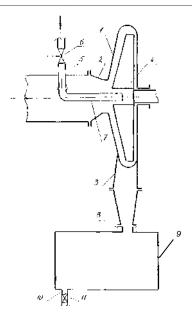


Рис. 2. Установка для обеззараживания воды дросселированием

Сокращение времени пребывания в зоне повышенного давления, необходимого для достижения максимального бактерицидного эффекта, при высоких значениях давления можно объяснить зависимостью величины растворимости газов в жидкости от давления.

На основании лабораторной установки разработано устройство для обеззараживания воды, на конструкцию которого получен патент России [6].

Особенностью процесса гидродинамического обеззараживания воды является отсутствие последействия, что, с одной стороны, ограничивает его применение для процессов водоподготовки, оно возможно только на предварительном этапе и требует внесения дезинфекантов при транспортировке и хранении. С другой стороны, в целях обеззараживания сточных вод метод имеет преимущество, так как обеззараженная сточная вода сама не несет никаких реагентов, окислителей и других веществ, губительно влияющих на микрофлору водоемов, в которые сбрасываются стоки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Гигиеническая оценка технологии кондиционирования качества питьевой воды, реализованнной на установке ЭД-500 / Ю.В. Новиков, Г.В. Цыплакова, А.В. Тулакина и др. // Гиг. и сан. 1994. № 4. С. 20—26.
- 2. Голдаев В.С. Обеззараживание жидких материалов высоковольтными разрядами // Электронная обработка материалов. 1994. № 2. С. 47—48.
  - 3. Перри Дж. Справочник инженера-химика. Т. 1. Л.: Химия, 1969. С. 386—387.
- 4. МУК 4.2.671—97 Методы санитарно-бактериологического анализа питьевой воды. М. : Изд-во стандартов, 1997. 183 с.
- 5. Патент 2080300 Российская Федерация. Способ обеззараживания воды / А.Б. Голованчиков, Н.О. Сиволобова, Г.Л. Дахина, ВолгГТУ; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ; опубл. 20.09.97. Бюл. № 15.
- 6. Пат. 2114791 Российская Федерация. Устройство для обеззараживания воды / Голованчиков А.Б., Сиволобова Н.О., Дахина Г.Л.; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ; опубл. 14.11.98. Бюл. № 22.

© Голованчиков А.Б., Сиволобова Н.О., Новиков М.Г., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

УДК 628.356

#### Д.П. Фомин, Д.С. Морозов, К.В. Цыганкова

# К РАСЧЕТУ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ СТРУЙНОЙ АЭРАЦИИ ЖИДКОСТИ

Приведены обобщающие зависимости по результатам экспериментальных исследований процессов струйной аэрации воды с различным солесодержанием и методика расчетов параметров струйной аэрации.

Ключевые слова: аэрация жидкостей; струйная аэрация.

The article gives the data of the experimental investigation of the processes to jet aeration of water with different contents of the salts and methods calculation parameter to jet aeration.

K e y w o r d s: aeration of liquids; jet aeration.

Аэрация жидкостей незатопленной струей применяется в промышленных установках различного назначения с последующей флотацией объема рабочей жидкости мелкодисперсной воздушной средой. Оптимизация рабочих режимов вызывает необходимость изменения параметров процессов струйной аэрации с целью влияния на фракционный состав воздушной фазы аэрированной жидкости и геометрические параметры факела. Последнее определяет в значительной мере и степень его взаимодействия с объемом жидкости.

В ряде известных работ [1—5] основным недостатком технических устройств струйной аэрации является ограниченное взаимодействие водовоздушного факела с объемом жидкости. При этом воздействию воздушной среды подвергается ограниченный объем жидкости в поверхностном слое, тогда как основной глубинный объем подвержен лишь воздействию конвективных токов жидкости. При этом периферийные поверхностные зоны рабочей жидкости практически не контактируют с мелкодисперсной воздушной фазой.

Данный недостаток устраняется в установке [6] с придонным аэратором. В ней аэрируемая жидкость находится под интенсивным воздействием всплывающей воздушной фазы, эжектируемой при повышенном давлении воздуха. Данная конструкция (рис. 1) позволяет изменять глубину и диаметр водовоздушного факела и интенсивность взаимодействия сред.

Количественные характеристики струйной аэрации в виде расхода эжектируемого воздуха и размеров пузырьков дисперсной воздушной фазы в значительной мере зависят от гидродинамического воздействия аэрирующей струи и степени ее взаимодействия с воздухом. По данным ряда авторов [1, 3—5], механизм захвата воздуха определяется степенью волновой деформации поверхности падающей струи.

Воздух, транспортируемый волновыми неровностями струи, защемляется при слиянии отдельных объемов струи с массой «покоящейся» жидкости (рис. 2).

Если обозначить величину воздушной прослойки между поверхностью струи и поверхностью кратера равной  $\epsilon$  , тогда объем эжектируемого воздуха определится как

$$Q_{\rm B} = f\left(\left(\varepsilon^2 + 2\varepsilon r\right)\pi W_{\rm H}\right). \tag{1}$$

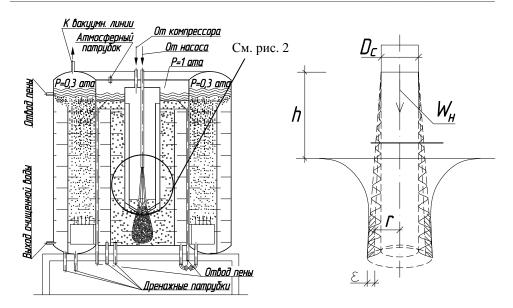


Рис. 1. Глубинный аэратор, работающий при повышенном давлении аэрирующего воздуха [6]

Рис. 2. Схема взаимодействия струи с поверхностью жидкости [1, 3—5]

Измеряемый объем воды:

$$Q_{\mathbf{x}} = \pi W_{\mathbf{H}} r^2 \,. \tag{2}$$

Коэффициент эжекции:

$$K_{9} = \frac{Q_{B}}{Q_{xr}} = f\left(\frac{\varepsilon}{r}\right)^{2} + 2\left(\frac{\varepsilon}{r}\right),\tag{3}$$

где  $W_{\rm H}$  — скорость жидкости в насадке; r — радиус струи;  $\epsilon$  — толщина воздушной прослойки.

Прямым измерением определить величину є довольно сложно. Поэтому величина воздушной прослойки определена методом косвенного измерения.

Для упрощения расчетов приняты некоторые допущения:

скорость жидкости по сечению струи постоянна и в любом сечении равна скорости струи в насадке;

струя жидкости не распыляется и сохраняет свою массу и объем по всей длине;

скорость перемещения воздушной прослойки равна скорости струи жидкости и постоянна по всему сечению  $\epsilon$  .

Тогда величина прослойки воздуха определится следующим образом: измеряемый объем воздуха

$$Q_{\rm B} = f\left(\left(r + \varepsilon^2\right) - r^2\right)\pi W_{\rm H},\tag{4}$$

отсюда

$$(r+\varepsilon) = \sqrt{\frac{Q_{\Gamma} + w_{\rm H}\pi r^2}{w_{\rm H}\pi}},$$
(5)

где

$$W_{\rm H}\pi r^2 = Q_{\rm w} \,, \tag{6}$$

получаем:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{Q_{\rm B} + Q_{\rm x}}{w_{\rm H}\pi}} - r. \tag{7}$$

На основании теории подобия и метода анализа размерностей [8—10] получены обобщающие зависимости вида

$$\frac{w_{\rm B}\varepsilon}{v_{\rm B}} = f\left(\frac{D_{\rm c}\sigma_{\rm m}}{v_{\rm m}^2\rho}; \frac{w_{\rm H}^2\rho_{\rm m}D_{\rm c}}{\sigma_{\rm m}}; \frac{\rho_{\rm B}}{\rho_{\rm m}}; \frac{w_{\rm B}}{w_{\rm H}}; \frac{v_{\rm B}}{v_{\rm m}}; \frac{h}{D_{\rm c}}; Cs\right); \tag{8}$$

$$\frac{d_{\Pi}}{D_{c}} = f\left(\frac{D_{c}\sigma_{\mathcal{K}}}{v_{\mathcal{K}}^{2}\rho}; \frac{w_{H}^{2}\rho_{\mathcal{K}}D_{c}}{\sigma_{\mathcal{K}}}; \frac{\rho_{B}}{\rho_{\mathcal{K}}}; \frac{w_{B}}{w_{H}}; \frac{v_{B}}{v_{\mathcal{K}}}; \frac{h}{D_{c}}; Cs\right),\tag{9}$$

или

$$Re_{B} = f\left(Lp_{K}; We; P; W; N; H; Cs\right); \tag{10}$$

$$\frac{d_{\Pi}}{D_{c}} = f\left(\operatorname{Lp}_{\mathcal{K}}; \operatorname{We}; P; W; N; H; Cs\right),\tag{11}$$

где  $Lp_{\pi}$  — критерий Лапласа, характеризует соотношение сил вязкости жидкости и поверхностного натяжения; H — безразмерная высота падения струи; We — критерий Вебера; W — отношение скоростей газовой среды и жидкости; P — учитывает инерционные свойства газовой среды и жидкости; N — отношение сил вязкости газообразной среды и жидкости,

$$N = \frac{h}{D_c} \,; \tag{12}$$

Cs — концентрация солей NaCl в жидкости;  $d_{\Pi}/D_{c}$  — безразмерный средний диаметр пузырьков воздуха;  $Re_{B}$  — критерий Рейнольдса, характеризующий течение воздуха в прослойке,

$$Re_{\rm B} = \frac{w_{\rm B}\varepsilon}{v_{\rm B}}.$$
 (13)

С учетом результатов [7], а также ряда допущений, принятых авторами ранее, считаем, что параметр N не является существенным для условий аэрирования воды воздухом, так как обе среды обладают невысокой вязкостью [7]; параметр W равен 1, так как  $W_{\rm B}=W_{\rm H}$ .

Исходя из этого запишем критериальные зависимости в окончательном виде:

$$Re_{B} = CLp_{K}^{a}We^{b}P^{d}H^{f}Cs^{j};$$
(14)

$$\frac{d_{\Pi}}{D_{c}} = C \operatorname{Lp}_{\mathfrak{K}}^{a} \operatorname{We}^{b} P^{d} C s^{j} H^{f} , \qquad (15)$$

где C, a, b, d, f, j — коэффициенты пропорциональности.

Для расчета значений параметров и критериев подобия процесса по результатам экспериментальных исследований применены программы Excel, STATISTICA.

$$Re_{B} = 0,578136 \cdot We^{0,690559} \cdot H^{0,308824}$$
(16)

или

$$\frac{w_{\rm B}\varepsilon}{v_{\rm B}} = 0.578136 \cdot \left(\frac{w_{\rm H}^2 \rho_{\rm x} D_{\rm c}}{\sigma_{\rm x}}\right)^{0.690559} \cdot \left(\frac{h}{D_{\rm c}}\right)^{0.308824}.$$
 (17)

Данная зависимость описывает 95,6 % объема экспериментального материала. На рис. 3 полученная зависимость представлена графически.

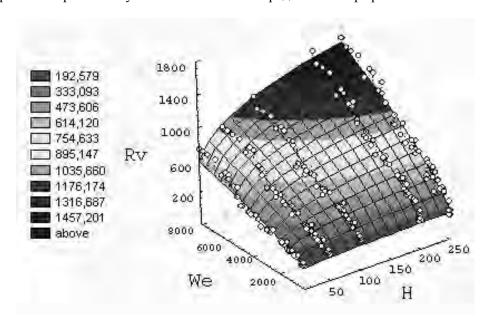


Рис. 3. График зависимости Re<sub>в</sub>

После некоторых преобразований уравнения (17) получаем зависимость для определения толщины воздушной прослойки  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 0,578136 \cdot \frac{\omega_{\rm H}^{0,381118} \cdot \rho_{\rm K}^{0,690559} \cdot D_{\rm c}^{0,381735} \cdot h^{0,308824} \cdot \nu_{\rm B}}{\sigma_{\rm K}^{0,690559}} \,. \tag{18}$$

Из данного уравнения видно, что значение величины  $\varepsilon$  повышается с увеличением скорости истечения жидкости из насадка  $W_{\rm H}$ , плотности жидкости  $\rho_{\rm ж}$ , диаметра сопла  $D_{\rm c}$ , расстояния от среза насадка до поверхности жидкости h, коэффициента кинематической вязкости газа  $\nu_{\rm r}$  и понижается с увеличением коэффициента поверхностного натяжения жидкости  $\sigma_{\rm ж}$ .

Диаметр воздушных пузырьков, характеризующий дисперсность воздушной фазы, в значительной степени определяет флотационные возможности аэрируемой среды и обусловливает интенсивность взаимодействия воздуха и примесей в жидкости на примере флотационных очистных сооружений. На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость среднего (измеренного с помощью скоростной киносъемки) диаметра пузырьков воздуха  $d_{\rm п \ cp}$  от солесодержания воды Cs. Пунктирной линией обозначен результат аппроксимации опытных данных полиномом четвертого порядка.

Средний диаметр пузырьков воздуха, м, в процессе струйной аэрации для воды с различным солесодержанием определяется зависимостью вида:

$$d_{\Pi} = 136460Cs^4 - 7501,1Cs^3 + 148,72Cs^2 - 1,257Cs + 0,0041,$$
 (19)

полученной методом интерполяции опытных данных полиномом четвертого порядка с использованием программы Excel.

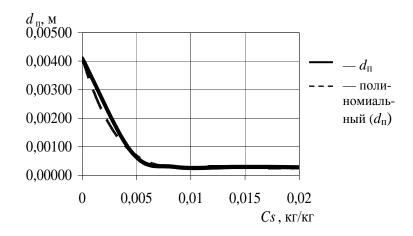


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра пузырьков воздуха  $d_{\rm n}$  от солесодержания воды Cs

Анализ экспериментальных данных для диапазона скоростей струй  $W_{\rm n}=4,6...24,4$  м/с, диаметров сопел  $D_{\rm c}=0,00056...0,00136$  м и солесодержания Cs=0...0,02 кг/кг позволил сделать следующие выводы:

1) захват воздуха аэрирующей струей начинается лишь при достижении некоторой минимальной скорости  $W_{\rm H\ min}$ , что объясняется отсутствием захвата воздуха при низких скоростях истечения даже при сохранении сплошной структуры струи. Значение  $W_{\rm H\ min}$  растет с увеличением длины струи вследствие нарушения ее сплошности при низких скоростях истечения и значительных длинах. Обозначим минимальную скорость, при которой начинается захват воздуха при заданной относительной длине струи  $W^{h/d}_{\rm H\ min}$ ;

- 2) расход воздуха  $Q_{\rm B}$  растет с увеличением выходной скорости струи  $W_{\rm H}$  до некоторого максимального значения  $Q_{\rm B}^{\rm w}$  мах, после чего происходит его резкое снижение вследствие нарушения сплошности струи и перехода на капельный режим аэрации;
- 3) коэффициент эжекции  $K_9$  растет с увеличением выходной скорости струи  $W_{\rm H}$  до некоторого максимального значения  $K_9^{\rm w}$  после чего происходит его резкое снижение вследствие нарушения сплошности струи и перехода на капельный режим аэрации;
- 4) значения максимумов расхода воздуха  $Q_{\text{в max}}^{w}$  и коэффициента эжекции  $K_{\text{э max}}^{w}$  наступают при различных скоростях струи  $W_{\text{н}}$ . Максимальное значение коэффициента эжекции  $K_{\text{э max}}^{w}$  наступает раньше максимального значения расхода воздуха  $Q_{\text{в max}}^{w}$ ;
- 5) солесодержание воды Cs практически не влияет на коэффициент эжекции  $K_3$  и расход воздуха  $Q_{\rm B}$ ;
- 6) расход воздуха  $Q_{\rm B}$  и коэффициент эжекции  ${\rm K}_{\rm 9}$  растут с увеличением относительной длины струи  $h/D_{\rm c}$  от 0 до некоторого предельного значения  $(h/D_{\rm c})_{\rm max}$ , при котором наблюдаются максимальный расход воздуха  $Q^{\rm w}_{\rm B~max}$  и коэффициент эжекции  ${\rm K}^{\rm w}_{\rm 9~max}$ . Дальнейшее увеличение длины струи приводит к резкому падению расхода воздуха и коэффициента эжекции вследствие нарушения сплошности струи и перехода на капельный режим аэрации.

Настоящие экспериментальные исследования и результаты работ других авторов обобщают расчетными зависимостями процессы струйной аэрации лишь в диапазоне дискретных экспериментальных характеристик. Получение универсальных расчетных зависимостей требует разработки и аналитического решения математической модели по гидродинамике струи, а также ее устойчивости и распаду.

Данная задача может быть решена в цилиндрических координатах в форме Лагранжа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Попкович Г.С., Репин Б.Н. Системы аэрации сточных вод. М. : Стройиздат, 1986. 136 с.
- 2. Мещеряков Н.Ф. Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины. М. : Недра, 1990. 210 с.
- 3. Богданов В.Ф., Евсеева О.Я., Заславский Ю.А. Флотационная водоочистка с применением струйной аэрации. Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 1991. 52 с.
- 4. *Фетисов Ю.М.* Захват воздуха при взаимодействии струи с покоящейся жидкостью: дис. ...канд. техн. наук. / Ю.М. Фетисов ; Моск. гос. строит. ун-т. М., 1995. 216 с.
- 5. Яблокова М.А. Аппараты с инжектированием и диспергированием газа турбулентными струями жидкости : дис. ...д-ра. техн. наук / М.А. Яблокова ; Санкт-Петербург. гос. технол. инт (техн. ун-т). СПб, 1995. 360 с.
- 6. Патент №72967, RU 72967 U1. Устройство для очистки сточных вод / Г.А. Захаров, Д.П. Фомин, В.П. Черненков, К.В. Цыганкова, Д.С. Морозов, М.И. Звонарев // Заявка 09.01.2008; №2008100949/22; опубл. 10.05.2008; Бюл. №13.
- 7. Дитяткин Ю.Ф., Клячко Л.А. Распыливание жидкости. М. : Машиностроение, 1977. 234 с.
  - 8. Гухман А.А., Зайцев А.А. Обобщенный анализ. М.: Факториал, 1998. 304 с.
- 9. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена. М. : Высшая школа, 1967. 304 с.
- 10. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели / АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики. Новосибирск : Наука, 1986. 295 с.

© Фомин Д.П., Морозов Д.С., Цыганкова К.В., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

УДК 502.51:504.5(470.45)

#### С.М. Мусаелян, С.А. Аверкова, А.Б. Петросян

# АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

На основе анализа качества воды в речной и овражно-балочной сети Волгоградской области, а также типичного для Волги изменения режима под влиянием гидротехнического строительства сделан вывод об обострении проблемы загрязнения и истощения водных ресурсов и труднопоправимости нанесенного ущерба.

Ключевые слова: водные ресурсы; сточные воды; качество природных вод; загрязнение природных вод.

The Volgograd Region receives the flows of the most developed industrial territory. In the conditions of the water regime changement, typical for the Volga and Dona because of water engineering, the problem of pollution and of water resources exhaustion that have already been damaged almost irreversibly, has worsened. Anthropogenic influence on water objects may lead to irreversible processes accompanied with ecocatastrophe.

K e y w o r d s: water resources; waste water; natural water quality; natural water pollution.

Речную сеть Волгоградской области составляют бассейны рек Волги и Дона, самых крупных, полноводных и судоходных рек на ее территории. Территория области покрыта довольно густой речной сетью, которая представлена, как видно из табл., 202 реками, из которых 199 — длиной более 10 км (по данным [1], по трем нет сведений). Общая их длина 8080 км.

Основу гидрографической сети области составляет овражно-балочная сеть (до 90 % общего количества водотоков и 60 % суммарной длины всех водотоков). Эта сеть довольно сильно развита. Бассейны рек изрезаны многочисленными малыми и большими балками, оврагами. Поэтому густота овражно-балочной сети очень высока — от 0,5 до 3,0 км/км². Речная же сеть характеризуется значительно меньшей густотой — в среднем 0,075 км/км².

Количество и протяженность водотоков в бассейнах рек Дона и Волги в пределах Волгоградской области

| Градация  | Общее ко                      | оличество во  | одотоков   | % от общего количества водото- |           |           |  |
|-----------|-------------------------------|---------------|------------|--------------------------------|-----------|-----------|--|
|           | (числитель                    | ь) и их сумма | арная дли- | ков (числитель) и их суммарной |           |           |  |
| , ,       | рдотоков на (знаменатель), км |               |            | длины (знаменатель)            |           |           |  |
| по длине, | Бассейн                       | Бассейн       | Бассейн    |                                | Бассейн   | Dagna     |  |
| KM        | Дона                          | Волги         | Всего      | Дона                           | Волги     | Всего     |  |
| 1025      | 93/1371                       | 23/308        | 116/1679   | 55/18,9                        | 76,6/36,9 | 58,3/20,8 |  |
| 2650      | 34/1154                       | 2/67          | 36/1221    | 20,1/15,9                      | 6,7/8,0   | 18,1/15,1 |  |
| 51100     | 26/1705                       | 3/204         | 29/1909    | 15,4/23,5                      | 10/24,5   | 14,6/23,6 |  |
| 101200    | 11/1420                       | 2/255         | 13/2675    | 6,5/19,6                       | 6,7/30,6  | 6,5/20,7  |  |
| Более 200 | 5/1596                        | 0/0           | 5/1596     | 3,0/22,1                       | 0/0       | 2,5/19,8  |  |
| Итого     | 169/7246                      | 30/834        | 199/8080   | 100/100                        | 100/100   | 100/100   |  |

Малые реки длиной 10...25 км составляют 58,3 % общего количества водотоков и 20,8 % суммарной их длины. Общее количество рек длиной до 200 км составляет 194 (97,5 %), длиной более 200 км — 5 (в бассейне Дона:

Хопёр, Медведица, Иловля, Бузулук, Аксай Есауловский). Их протяженность в пределах области 1596 км. Более 85 % рек области принадлежат бассейну Дона, а их суммарная длина 7246 км (89,7 %) [2].

Результаты анализов качества воды основных водотоков Волгоградской области, по данным Нижне-Волжского бассейнового водного управления, по-казывают, что вода загрязнена в основном по восьми ингредиентам: аммонию-иону, нефтепродуктами, меди, алюминию, сульфатам, фосфатам, марганцу. Ухудшение качества воды происходит в основном за счет медно-цинковых, органических и щелочно-земельных соединений. Это свидетельствует о том, что на гидрохимический режим рек существенное влияние оказывают промышленные, коммунально-бытовые и сельскохозяйственные объекты городов и поселков, расположенных по берегам водных объектов.

Водные объекты области загрязнены выше уровня ПДК для водоемов рыбохозяйственного водопользования в основном следующими веществами:

Волгоградское водохранилище и р. Волга — фенолами, ионами меди, фастаком, фозолоном, нитратами;

рукав Ахтуба — сульфатами, нитратами, ионами меди и марганца, хлорофосом, фастаком и фозолоном;

- р. Дон и Цимлянское водохранилище нитратами, нефтепродуктами, ионами меди, хлорофосом и фозолоном;
  - р. Хопёр фенолами, ионами меди и марганца, фозолоном;
- р. Медведица органическими веществами, сульфатами, фенолами, ионами меди, хлорофосом, фосфамидом и фозолоном;
  - р. Иловля сульфатами, ионами меди и марганца, фозолоном.

Исследования качества воды в шести ериках Волго-Ахтубинской поймы (Аверкин, Затонский, Дегтярный, Жерновой, Песчаный, Судомойка) показали, что оно не соответствует требованиям к воде водоемов по шести ингредиентам:  $БПК_{\Pi O \Pi}$ , нефтепродуктам, фенолу, ионам меди и цинка, фосфамиду. Наиболее загрязненной является вода в ер. Аверкин.

Важно отметить, что качество воды, поступающей на территорию Волгоградской области из сопредельных областей (Саратовской, Ростовской и Воронежской), не соответствует нормам рыбохозяйственного водопользования по основным ингредиентам загрязнения.

По гидробиологическим показателям качество воды Волгоградского водохранилища соответствует категории «умеренно загрязненная с уклоном в загрязненную» — в начале лета и «загрязненная» — в летне-осенний период.

Качество воды рек Хопёр, Медведица и Кумылга, особенно на устьевых участках, оценивается как грязная и очень грязная, Иловли и Бузулук — умеренно грязная, Дона и Цимлянского водохранилища — грязная с превышением ПДК тяжелых металлов, соединений азота и фосфора.

В воде малых рек, впадающих в Цимлянское водохранилище, превышение ПДК наблюдается по хлоридам, сульфатам, органическим веществам, ионам тяжелых металлов. Из левых притоков наиболее загрязнена р. Аксай Курмоярский, вода правых притоков является менее загрязненной пестицидами, фенолом, нитратами и железом.

Из 204 выпусков сточных вод в поверхностные водные объекты области ни один не оборудован водоизмерительной аппаратурой. На долю г. Волго-

града приходится 20 выпусков, сбрасывающих в р. Волгу неочищенные бытовые и производственные сточные воды.

В Волгограде имеется 42 выпуска дождевых вод, через которые без какой-либо очистки сток сбрасывается в р. Волгу. Большая часть этих выпусков используется также для отведения промышленных, а порой и бытовых стоков. Практически весь сектор частной застройки не имеет дождевой канализации. В других городах области, а тем более в малых населенных пунктах, положение еще хуже.

Очистные сооружения предприятий области не в состоянии обеспечить нормативную очистку сточных вод (неудовлетворительная эксплуатация, несоответствие технологии требованиям к качеству очистки и ряд других) [4].

В ст. 1 Водного кодекса РФ [3] сточными водами называются воды, сбрасываемые в установленном порядке в водные объекты после их использования или поступившие с загрязненной территории. В ст. 95 «Охрана водных объектов от загрязнения» отмечается, что в целях предупреждения и устранения загрязнения водных объектов определяются источники их загрязнения, с которых осуществляется сброс или иное поступление в водные объекты вредных веществ, ухудшающих качество поверхностных и подземных вод, ограничивающих их использование.

Таким образом, сточные воды — это воды, использованные на бытовые, производственные или другие нужды и загрязненные различными примесями, изменившими их первоначальный состав и физические свойства, а также воды, стекающие с территории населенных пунктов и промышленных предприятий в результате выпадения атмосферных осадков или поливки улиц.

Систему водоотведения — сброса сточных вод — следует подразделить на следующие категории: 1) бытовые; 2) производственные (предприятия машиностроения, металлургии, теплоэнергетики, химии, нефтехимии, нефтедобычи др.); 3) сельскохозяйственные (коллекторно-дренажные воды с орошаемых полей); 4) атмосферные (дождевые и талые воды, вместе с атмосферными отводятся воды от полива улиц, от фонтанов и дренажей).

Производственные сточные воды делятся на две основные категории: загрязненные и незагрязненные (условно чистые). Загрязненные производственные сточные воды подразделяются на 3 группы:

- 1) загрязненные преимущественно минеральными примесями (предприятия металлургической, машиностроительной, рудо- и угледобывающей промышленности; заводы по производству кислот, строительных изделий, минеральных удобрений и др.);
- 2) загрязненные преимущественно органическими примесями (предприятия мясной, рыбной, молочной, пищевой, целлюлозно-бумажной, микробиологической, химической промышленности, заводы по производству каучука, пластмасс и др.);
- 3) загрязненные минеральными и органическими примесями (предприятия нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, текстильной, легкой, фармацевтической промышленности; заводы по производству сахара, консервов, органического синтеза и др.).

Кроме вышеуказанных 3 групп загрязненных производственных сточных вод имеет место сброс нагретых вод в водоем, что является причиной так называемых *тепловых загрязнений*.

К основным промышленным объектам, сточные воды которых поступают в поверхностные водные объекты по Волгоградской области, относятся: ЗАО «ВМЗ «Красный Октябрь», ОАО «Волгограднефтемаш», филиал ОАО энергетики и электрификации «Волгоградэнерго» «Волгоградская ТЭЦ-2», ОАО «Волгоградский судостроительный завод», ОАО «Волгоградский завод ЖБИ-1», ФОАО ЭиЭ «Волгоградэнерго» «Волгоградская ГРЭС», ОАО «Себряковцемент». Отметим также, что на долю предприятий г. Волгограда приходится от 70 до 90 % загрязняющих веществ, а именно: БПК<sub>ПОЛ</sub> — 85 %, нефтепродуктов — 80, взвешенных веществ — 90, сухого остатка — 65, сульфатов — 80, хлоридов — 70, фосфора общего — 80, алюминия — 78, нитратов — 75, азота аммониевого — 80, СПАВ — 90, тяжелых металлов — 85 %. Таким образом, главный загрязнитель водного бассейна нашей области — г. Волгоград. Как и следовало ожидать, основная нагрузка загрязняющих веществ приходится на р. Волгу (от 90 до 95 %), в частности, по СПАВ, нитратам, хлоридам, нефтепродуктам, тяжелым металлам — почти полностью.

В общем количестве сброса сточных вод области около 45 % приходится на долю г. Волгограда. Имеющиеся здесь две станции очистки городских и промышленных сточных вод (на острове Голодный и в южной части города — ПО «Каустик») и ряд локальных очистных сооружений промышленных предприятий работают неэффективно, сильно перегружены по расходу, количеству и концентрации загрязнений.

Очистные сооружения имеются также в 17 других городах области, из них 10 — на полную биологическую очистку в искусственных условиях, 5 — в естественных условиях. Многие из них маломощны, технология очистки воды несовершенна, не решена утилизации сухого остатка сточных вод.

Весьма неэффективна работа земледельческих полей орошения. Так, отсутствие локальной очистки на предприятиях г. Волжского и сброса химзагрязненных стоков в Б. Лиман привело к тому, что уровень в пруденакопителе часто превышает проектную отметку и поэтому происходит сброс неочищенных бытовых стоков в рукав Ахтуба.

Дождевые стоки и дренажные воды с орошаемых сельскохозяйственных полей не проходят очистку (за исключением очистных сооружений на Нижнем поселке тракторного завода). С атмосферными осадками с сельскохозяйственных полей поступают взвешенные вещества, минеральные удобрения, ядохимикаты и другие загрязнения. При современном экологическом положении области улучшение мелиоративного состояния орошаемых земель, строительство дренажа и систем утилизации дренажного стока практически невозможно. Дренажные воды, которые сильно минерализованы (концентрация солей более 4 г/л), фильтруются в ближайшие водоносные горизонты, подрусловые воды или в поверхностные водоисточники.

Город Волгоград сбрасывает свои сточные воды следующим образом: в поверхностные водные объекты —  $165\,$  млн м $^3$  ( $80\,$ % всех сброшенных вод области), из них 33 млн м $^3$  ( $20\,$ %) без очистки,  $132\,$  млн м $^3$  ( $80\,$ %) — недостаточно очищенных. Город Волжский все свои сточные воды в объеме  $25\,$ млн м $^3$  в год сбрасывает в накопители и впадины в рельефе местности.

Сброс сточных вод по бассейнам рек распределяется так: 87.5 % — в бассейн Волги, 12.5 % — Дона. Из общего объема  $298 \text{ млн м}^3$  в год сброса сточных вод в р. Волгу  $211 \text{ млн м}^3$ , или 71 %, сброшено в поверхностные водные

объекты, из которых, в свою очередь, 38 млн м³, или 18 %, без очистки, 160 млн м³ (76 %) — недостаточно очищенных, 13 млн м³ (около 6 %) — нормативно очищенных. Остальные 87 млн м³ (29 %) сброшено в накопители и впадины рельефа. В бассейне Дона из общего объема 42,5 млн м³ сточных вод 19 млн м³, или 45 %, приходится на поверхностные водные объекты, которые, в свою очередь, распределяются так: 8,7 млн м³ (46 %) — без очистки, 4,9 млн м³ (26 %) — недостаточно очищенных и 5,4 млн м³ (28 %) — нормативно-чистых. Из оставшихся 23,5 млн м³ сточных вод 9,4 млн м³ (40 %) сброшено в накопители и впадины рельефа, 14,1 млн м³ (60 %) — в подземные горизонты.

Ежегодно в водные объекты Волгоградской области сбрасываются сточные воды, имеющие загрязняющие вредные вещества в объеме около 270 млн м $^3$ . С этими водами поступает более 20 видов загрязнителей, наиболее опасными из которых являются: органические вещества (по БПК $_{\Pi O \Pi}$ ) — 4,6, нефтепродукты — 0,05, взвешенные вещества — 5,0, сухой остаток — 63,0, сульфаты —11,0, хлориды — 18, фосфор общий — около 200, азот аммонийный — 800, нитраты — 1100, СПАВ — 29 (всего 104 тыс. т). На долю г. Волгограда приходится более 76 % объема сточных вод, имеющих загрязняющие вредные вещества: БПК $_{\Pi O \Pi}$  — 91, нефтепродуктов — 80, взвешенных веществ — 91 %, сухого остатка — 65, сульфатов — около 80, хлоридов — 70, фосфора общего — 80, азота аммонийного — 82, нитратов — 75, СПАВ — 90 %.

На долю основных городов области (Волжский, Камышин, Михайловка, Урюпинск) приходится 10...20 % всех загрязнений.

Из административных районов наибольшее количество азота аммонийного (30...40 т ежегодно) сбрасывают Среднеахтубинский и Суровикинский районы, гг. Камышин, Урюпинск, каждый 20...25 т ежегодно. Значителен также сброс фосфора этими же городами (15...20 т ежегодно). По количеству сброса нитратов и СПАВ после Волгограда следует г. Камышин (250 и 3 т соответственно).

В водный бассейн Волгоградской области ежегодно сбрасывается также 265 т тяжелых металлов и других крайне вредных веществ, из них: железа — 30,0, меди — 0,14, цинка — 1,5, никеля — 0,4, хрома — 0,4, алюминия — 0,5, органических сернистых соединений — 1,50, сероводорода — 5,5, магния — 200, нитратов — 17, фтора — 7,5, формальдегида — 1,0. Доля г. Волгограда составляет от 80 до 95 %, остальные 20...15 % — гг. Камышин, Михайловка и Урюпинск.

В отраслевом разрезе характеристика загрязненных веществ такова. По основным ингредиентам загрязнения (БПК $_{\Pi O \Pi}$ , нефтепродукты, сухой остаток, сульфаты, хлориды, фосфор общий, азот аммонийный, нитраты, СПАВ) на первом месте жилкомхоз (около 75 % всех загрязняющих веществ), по тяжелым металлам — промышленность (около 30 %, черная металлургия, теплоэнергетика). Сельское хозяйство сбрасывает в основном азотсодержащие сточные воды.

Систематическое изучение экологического состояния поверхностных вод Волгоградской области осуществляется Волгоградским гидрометеоцентром Северо-Кавказкого управления гидрометеослужбы, а также Госкомэкологией области.

Контроль качества природных вод по химическим показателям проводился на 24 водных объектах, в т. ч.: двух водохранилищах (Волгоградском и Цимлянском), 18 реках (Волга, Ахтуба, Дон, Хопёр, Медведица, Иловля, Кумылга, Арчеда, Перевезинка и 9 рек, впадающих в Цимлянское водохранилище), одном озере, двух прудах и одном ерике.

Результаты этих исследований показали, что водные объекты области загрязнены выше уровня ПДК для водоемов рыбохозяйственного водопользования.

Очистка воды на всех очистных сооружениях производится в основном от взвешенных веществ. В лабораториях очистных сооружений не выполняются анализы очищенной воды по таким важным ингредиентам, как нефтепродукты, тяжелые металлы, ГХЦГ, и поэтому нет уверенности в том, что подаваемая в г. Волгоград вода всегда и по всем показателям соответствует ГОСТу.

Из-за дефицита свободных водных ресурсов, низкого качества поверхностных источников значительно осложняется решение проблем водоснабжения городов и населенных пунктов области. Особенно следует учитывать роль малых рек как источников водоснабжения для коммунальных и сельскохозяйственных объектов области, тем более, что основная часть из них — около 200 малых рек, используемых в качестве источников централизованного водоснабжения, — находится на Донском склоне. Малые реки, подвергаясь большой экологической нагрузке, деградируют, крайне сильно загрязнены, мелеют, истощаются, а порой и исчезают вовсе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Сыпункова Н.В. Малые реки Волгоградской области // Вопросы краеведения. Волгоград : Перемена, 1994. Вып. 3. С. 88—92.
- 2. *Мусаелян С.М., Лобойко В.Ф.* Использование и охрана водных ресурсов. Гидрология регионов. Волгоград, 2002. С. 21.
- 3. Водный кодекс Российской Федерации : официальный текст. М. : Изд-во НОРМА, 2001. С. 64.
- 4. *Мусаелян С.М., Быков А.А.* Экологическое состояние водных объектов Волгоградской области и пути его улучшения : монография. Волгоград, 2004. С. 44—54.

© Мусаелян С.М., Аверкова С.А., Петросян А.Б., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

#### ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 502.17 + 504.03

А.М. Шубин

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Рассмотрено экологическое состояние прибрежных территорий крупных водохранилищ, рек Волги и Ахтубы, характеризуемое активным развитием оползней, эрозии, переработки берегов. Обосновывается необходимость принятия мер по защите земель и водных объектов от загрязнения отходами хозяйственной деятельности. Выявлено противоречие между исключительно высокой стоимостью берегоукрепительных сооружений и недостаточной их эффективностью.

Ключевые слова: берега; оползни; эрозия; переработка; берегоукрепление, эффективность

Ecological conditions of the coastal territories of large reservoirs, Volga and Ahtuba rivers are notable for active dynamics of landslides, erosion, and abrasion. Taking into account the water and soil pollution of different wastes, it has created a dangerous ecological situation, which requires protective measures. However, the exceptionally high cost of bank protection rarely insures its required efficiency.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s:$  coast, landslides, erosion, abrasion, bank protection efficiency.

Процесс переработки берегов рек и водохранилищ весьма активен и наносит значительный ущерб народному хозяйству Волгоградской области. В опасной зоне находятся практически все прибрежные населенные пункты, насосные станции, рыборазводные предприятия, ценные сельскохозяйственные угодья, а также кладбища и скотомогильники. Интенсивная переработка берегов на участках левого берега Волгоградского водохранилища, превысившая 250...300 м, обусловила необходимость переноса ряда населенных пунктов дальше от уреза воды. Во многих селах разрушены целые улицы с различными постройками и приусадебными участками. Реальная угроза разрушения ряда важных объектов, не говоря уже о многочисленных частных домовладениях, существует на Цимлянском водохранилище, по берегам рек Волги и Ахтубы.

Интенсивность процесса переработки берегов водохранилищ изменчива во времени и пространстве в зависимости от величины коэффициента размываемости пород по Е.Г. Качугину [1], волно-энергетических характеристик и параметров склона.

Отдельно следует остановиться на характеристике экологических условий прибрежной зоны рек и водохранилищ. Однозначно можно оценить экологическое состояние этих территорий как неудовлетворительное, местами

опасное. По существу во всех населенных пунктах, включая г. Волгоград, прибрежная полоса превращена в свалку мусора, бытовых и строительных отходов (рис. 1).

Вопиющая экологическая и этическая ситуация сложилась в южной части пос. Приморск в районе мыса Большой Балки. Здесь было расположено старое кладбище, созданное задолго до сооружения Волгоградского водохранилища. В последние годы захоронения интенсивно размываются. В береговом склоне и на мелководье видны разрушенные гробы, останки человеческих тел, черепа, кости.



Рис. 1. Загрязнение берега в Краснооктябрьском районе

Аналогичная ситуация, связанная с разрушением прибрежных захоронений, отмечается на берегу Цимлянского водохранилища в хуторе Попов. Ни органы местного самоуправления, ни областные власти не предпринимают никаких усилий по переносу захоронений и ликвидации существующей ситуации, что может иметь

весьма негативные последствия для экологического состояния этих крупнейших водоемов рыбохозяйственного назначения.

Эрозионно-оползневые процессы, развивающиеся по берегу р. Волги на территории Волгограда, наносят ощутимый ущерб народному хозяйству города в связи с уничтожением ценных земель, разрушением крупных сооружений, необходимостью проведения дорогостоящих защитных мероприятий. По результатам мониторинга оползней г. Волгограда в 2007—2008 гг. необходимо отметить, что широкое освоение гражданским строительством прибрежных и склоновых приовражных территорий в последние годы привело к ликвидации многих ранее активных оползневых участков или их стабилизации в результате проведения планировочных и берегоукрепительных работ.

Тем не менее сохраняется угроза разрушения важных объектов транспорта и ценных городских территорий в зоне наиболее крупных и опасных оползней у Волгоградского речного порта, на 10-м километре железной дороги Волгоград — Тихорецкая и в районе ул. Тургенева и Гомельской, развитие которых может угрожать многоэтажной жилой застройке. Здесь необходимо провести первоочередные противооползневые и берегоукрепительные мероприятия.

Не следует забывать, что нередко деформации склонов приводили к катастрофическим последствиям, как это было при разрушении дамбы накопителя токсичных отходов «Белое море» ПО «Химпром». До сих пор продолжается сброс в р. Волгу неочищенных ливневых стоков, и не секрет, что многие предприятия пользуются ливневой канализацией для сброса своих производственных отходов.

Переработка берегов р. Волги определяется активным развитием эрозионных процессов на всем протяжении речной долины от г. Волгограда до г. Астрахани. На правобережье эти процессы развиваются более интенсивно, а на отдельных участках берегового склона протекают одновременно с оползневыми процессами [2].

Основными факторами, влияющими на переработку берегов р. Волги, являются морфология и геологическое строение склонов, ледовый и уровенный режимы, а также стоковые течения, определяющие аккумуляцию и перемещение наносов. Колебания уровня воды в нижнем бъефе р. Волги происходят в течение всего года и находятся в прямой зависимости от режима сброса воды Волжской ГЭС. Периодическое насыщение водой и осушение грунтов при прохождении паводков и суточных колебаний уровня в значительной степени способствует разрушению берегов. Особенно интенсивно воздействие течения проявляется на участках крутых поворотов береговой черты. Стоковые течения активизируют процессы эрозии за счет подрезки берегового склона на разных отметках при изменениях высоты уровня воды, размывания и перемещения обрушившихся пород. На процессы речной эрозии оказывает влияние также ледовый режим [3].

Интенсивность эрозионных процессов на берегах р. Ахтубы определяется в первую очередь гидрометеорологическими факторами. Они включают подъем уровня воды в паводковый период за счет попуска воды Волжской ГЭС; подрезку берегового уступа ледоходом с последующим образованием обвалов, осыпей и оползневых деформаций; сток поверхностных вод в период весеннего снеготаяния и выпадения атмосферных осадков. Сезонные, а также суточные колебания уровня воды ухудшают устойчивость берегов за счет насыщения грунта водой и развития механической суффозии при понижениях уровня воды в реке, что приводит к активному развитию эрозионно-оползневых процессов. Наиболее интенсивно размыв берегов идет в паводковый период, продолжительность которого составляет 50...60 дней.

В процессе изучения переработки берегов в 2007—2008 гг. установлено, что формы и скорость процесса за последние годы практически не изменились. С учетом этого размещение, эксплуатация и защита существующих сооружений в прибрежной зоне должны осуществляться на основе тщательного анализа характера и интенсивности развития процесса переработки берегов на данном участке, а также на прогнозе дальнейшего развития этого процесса.

Правильно составленные прогнозы развития абразионных и эрозионнооползневых процессов являются основой для выбора и обоснования рационального комплекса берегоукрепительных и противооползневых мероприятий, который должен обеспечить требуемый запас устойчивости склона с заданной вероятностью.

Такая задача была решена для г. Волгограда на основании разработанной Генеральной схемы берегоукрепительных и противооползневых работ, охватывающей правый берег р. Волги. Противооползневые мероприятия, предусмотренные Генеральной схемой, включают устройство контрбанкета с берегоукрепительными конструкциями и устройство системы дренажа. Контрбанкет является основным элементом противооползневой защиты, предназначенным для перераспределения напряжений в массиве оползневого склона в сторону повышения его общей устойчивости. Кроме того, контрбанкет благоустраивает береговую полосу и решает вопросы воднотранспортных связей [3].

Система дренажей предназначена для перехвата напорных вод хазарского водоносного горизонта, а также безнапорных вод хвалынских отложений и верховодки. Для снятия напора и отвода хазарских вод предусматривается

устройство комбинированного дренажа. Перехват хвалынского горизонта осуществляется с помощью дренажных прорезей, выполняемых в виде траншей, которые трассируются по склону через 40 м. Вода из дренажных прорезей поступает в отводящий коллектор и сбрасывается в р. Волгу через водовыпуски из сборных железобетонных труб, расположенные через 150 м. Перехват грунтовых вод покровных отложений предусматривается устройством откосного дренажа из керамических труб диаметром 250 мм. Берегоукрепительные мероприятия предназначены для защиты берегового склона от размыва волнами, ледовых нагрузок, суточных и сезонных колебаний уровня воды в р. Волге. Береговые укрепления в зоне до строительного горизонта представляют собой сборные железобетонные плиты на фильтровой подготовке, а выше, в зоне колебания уровня воды — монолитные железобетонные плиты толщиной 15...20 см. Верх крепления принят на уровне нижней террасы, низ — на уровне упорной конструкции.

Конструкция упорного пояса, в зависимости от наличия и стоимости строительных материалов, ледовых условий г. Волгограда и возможности оползневых деформаций склонов, принята в виде бетонных тетраэдров (тетраподов) или массивных блоков. Береговой склон выше зоны волновых воздействий уполаживается срезкой и террасированием неустойчивых участков для ликвидации обрушений грунта и перераспределения напряжений в толще массива в сторону повышения его устойчивости. Пологие террасированные откосы защищаются от ветровой эрозии посевом трав и посадкой кустарников. Для защиты берегового склона от размыва дождевыми и талыми водами после проведения берегоукрепительных и противооползневых мероприятий предусматривается организация поверхностного стока.

В настоящее время в г. Волгограде берегоукрепительные и противооползневые работы проведены на участках общей протяженностью свыше
30 км. Опыт эксплуатации построенных защитных сооружений показал их
высокую эффективность и, следовательно, надежность принятых проектных
решений. Тем не менее, исключительно высокая стоимость строительства
подобных сооружений существенно ограничивает их применение на других
участках, в частности по берегам р. Ахтубы в г. Волжском. Здесь в пределах
поселка Металлург долина р. Ахтубы испытывает резкий поворот, что и обусловливает активность эрозии и оползней на этом участке (рис. 2).

По результатам мониторинга в 2008 г. установлено, что на участке проводятся капитальные берегоукрепительные работы: склон и уступ спланированы, устанавливаются бетонные защитные сооружения (рис. 3).

Борьба с размывом берегов водохранилищ крайне затруднительна из-за большой протяженности берегов и высокой стоимости берегоукрепительных сооружений. Этим объясняется строительство таких сооружений лишь на участках размываемых ценных городских территорий и в районах ответственных сооружений. Так, в г. Камышине в 1960—1961 гг. была устроена набережная, в составе которой находится песчаный контрбанкет с перекрытием из бетонных плит. Несмотря на капитальность сооружения, периодически отмечается его деформация, в связи с чем применяется дополнительная наброска бетонных элементов и крепление набережной. На других участках водохранилища выполненные без надлежащего проектирования берегоукрепительные мероприятия не только не способствовали защите берегов, но и

привели к активизации размыва (рис. 4, 5). На отдельных участках водохранилища для защиты берегов от размыва применяются ряды свай и каменная наброска (рис. 6). Следует отметить, что многолетний зарубежный и современный отечественный опыт берегоукрепления свидетельствует о наибольшей эффективности защитных конструкций в виде габионов, которые успешно применяются на Северном Кавказе и на Цимлянском водохранилище.



Рис. 2. Панорама склона на участке пос. Металлург в 2007 г.



Рис. 3. Панорама склона на участке пос. Металлург в 2008 г.



Рис. 4. Неудачная попытка укрепления берега автопокрышками в с. Пичуга



Рис. 5. Разрушение берегоукрепительных сооружений в с. Кислово



Рис. 6. Берегоукрепление в с. Колышкино

Что касается оценки экономической эффективности берегоукрепительных мероприятий, следует иметь в виду, что стоимость 1 пог. км капитальных сооружений с устройством контрбанкета с берегоукрепительными конструкциями и системой дренажа, террасированием откосов и организацией поверхностного стока составляет не менее 100 млн р., а строительство габионов обходится примерно в 60 млн р. за километр. При этом столь высокая стоимость таких мероприятий далеко не всегда обеспечивает требуемую техническую эффективность.

Самые приблизительные оценки стоимости прибрежных земель в населенных пунктах [4] достигают в среднем около 500 р. за 1 м² площади. При длине защищаемого участка 1 км стоимость 10-метровой полосы земли составит лишь 5 млн р. Таким образом, в защите нуждаются лишь наиболее ответственные сооружения, стоимость которых заведомо превышает затраты на берегоукрепление, или важные социальные объекты. На других участках следует рекомендовать принятие решений по переносу отдельных сооружений или домовладений из опасной зоны.

Расчеты экономической эффективности показали, что такие решения зачастую значительно дешевле и надежнее.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Качугин Е.Г.* Геологическое изучение движения берегов водохранилищ. М. : Наука, 1975. 145 с.
- 2. *Мильшин Е.Д.* Влияние инженерно-геологических и гидрологических факторов на переформирование левого берега р. Волги у Волгограда // Вопросы инженерной геологии, проектирования и строительства оснований и фундаментов в Волгоградском Поволжье. Волгоград, 1977. С. 29—35.
- 3. *Шубин М.А.* Литомониторинг: теоретические и прикладные аспекты. Волгоград : Принт, 2005. 276 с.
- 4. Альтернативные подходы к эколого-экономической оценке земли и механизмы управления землепользованием / ред. И.М. Шабунина. Волгоград, 1996. 224 с.

© Шубин А.М., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

## ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ. АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 72

Ю.В. Янушкина

# ОБРАЗЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОСТРОЕНИЙ В СОВЕТСКОЙ АРХИТЕКТУРЕ 1930—1950-х гг.

Анализируются содержание, структура и принципы организации архитектурного образа в контексте советской действительности 1930—1950-х гг.

Ключевые слова: архитектурный образ; советская архитектура.

This article deals with the content, structure and principles of architectural form organization in the context 1930-1950s Soviet reality.

K e y w o r d s: architectural image; soviet architecture; architectural form.

Характер образов пространственных построений в советской архитектуре 1930—1950-х гг. предопределен феноменом тоталитарной идеологии, конституирующей действительность не с точки зрения объективного познания, а с целью нравственного оправдания групповых интересов. Поскольку никакая идеология не способна признать собственную частичность, советский миф всеобъемлющ. Он не терпит противостояния, создавая понятийную сеть, фиксирующую нормы и правила, под которые подгоняется реальная жизнь.

Советская архитектура 1930—1950-х гг., создававшаяся внутри необходимого противостояния «внешнему» врагу и маниакального стремления отграничиться от всего остального мира, также претендует на включающий универсализм. Широко используя исторический опыт, она выстраивает пространственные границы-маски, где членения фасадов изображают пространственную структуру, не соответствующую реальному наполнению. Тоталитарная идеология питается пафосом радостного жизнестроения общества, возникающего как реакция на полную необеспеченность жизни индивида. Все советское искусство (кино, литература, живопись) пронизано атмосферой ликования, и архитектура первая в этом ряду. Она становится одним из мощнейших средств, способствующих стиранию различий между желаемым и действительностью, обеспечивая перевод государственной идеологии в пространственную модель организации жизни. Советская идеология воплощала революционно-мифологическое понимание целей общественного развития и принципов справедливого мироустройства, где

«порядок слов» непреложно соответствовал порядку мира. Вербальнопроективный, мифологический характер советской идеологии придавал мощную поэтико-риторическую окраску всем образно-пространственным построениям в советской архитектуре.

Архитектура, согласно ленинской теории отражения, не только отражала реальную действительность и, вследствие этого, идеологически воздействовала на человека, но и являлась основным орудием конструирования и средством утверждения этой реальности. Архитектор должен был не просто сделать свое произведение художественно выразительным, а «оформить» его так, «чтобы материальное, необходимое выступило в нем как должное, как желаемое, чтобы казалось, что иначе и не может быть, т. е. приобрело качество прекрасного» [1]. Любой постройке необходимо было придать такие художественные качества, которые бы раскрыли идейный смысл событий эпохи, а основой творческого метода полагался «гениально сформулированный товарищем Сталиным метод социалистического реализма», опирающийся на отражение «типических, существенных явлений, реальной действительности», выявляемых с помощью принципов правдивости, идейности, партийности, народности и понятности [1]. Так, действительность полностью теряла статус реальности, превращаясь в произведение искусства.

Существует мнение, что истоком подобного подхода к конструированию смысловой реальности является искусство советского авангарда 1910—1920-х гг., которым революция воспринималась «как точка возврата к исходному акту творения, возможность новыми техническими средствами установить утраченное единство природы и человека, иначе говоря, превратить весь мир в произведение искусства» [2]. Так, любое произведение искусства становится не столько способом выражения какой-либо идеи, сколько непосредственно представляет собой реальную вещь среди других вещей. Меняется понимание деятельности художника: он не изображает мир, а трансформирует его. Из программы эстетической революции вытекает программа социальнополитическая, и в итоге создается проект преобразования мира, заключающийся в возвращении его техническими средствами к архаико-магическому единству. Метод соцреализма носит сугубо проективный характер. Отсюда вытекает оценка авангарда как прелюдии к тотальному космическому обновлению, сменяющейся в результате закономерной эволюции архаизирующего авангардного сознания «зрелым классицизмом» сталинской архитектуры.

С другой стороны, обращение к классическому наследию можно связать с представлениями о коммунистической утопии как венце эволюции. Создание всеобъемлющей, законченной модели реальности требовало опоры на нечто незыблемое и общезначимое, и поскольку советская доктрина претендовала на абсолютную истинность, «великая эпоха» ощущала себя наследницей всех времен и народов, призванной воплотить мечты человечества о рае. Тоталитаризм был не просто государственной идеологией, насаждаемой в авторитарном порядке. Многими исследователями русской истории и культуры стремление к тоталитарности признается неотъемлемым свойством русского национального самосознания (А. Безансон, Н.А. Бердяев, В.С. Библер и др.).

В стремлении к исторической завершенности идеологические конструкты полностью подменяли творческое освоение мира — любое произведение архитектуры обретало смысл и красоту только через причастность к

ценностям социальной доктрины. Архитектурный «канон» разрабатывался не в сфере рационального мышления, а исходя из глубин коллективного подсознательного, обретающего форму социальных архетипов. Советская архитектура провозгласила себя законной наследницей всей человеческой культуры, рассматриваемой сквозь призму социалистической доктрины, согласно которой производился отбор прототипов, складывалась иерархия мести и времен.

На правах «наследницы всего прогрессивного человечества» советская архитектурная мысль 1930—1950-х гг. интерпретировала исторически устоявшиеся архитектурные типы. Создавалось новое пространство существования нового человека, где общую структуру архитектурного образа определял принцип жесткой иерархии — симметричные, центрально-осевые башенно-пирамидальные композиции. Мессианская идея: Москва — третий Рим, образ которого олицетворял возвышающийся на семи холмах центр мира — нашла свое воплощение в идее государства ІІІ Интернационала: от одноименной башни В. Татлина до башни Дворца Советов в проектах Б. Иофана. Меняется толщина поэтико-риторических наслоений в советской архитектуре, но границы пространственного смыслообразования строго очерчены темой башни.

Анализ логики образно-пространственных построений в советской архитектуре требует обращения к осмыслению сущности архитектурной деятельности Г.В.Ф. Гегелем. Эстетика Гегеля близка духу сталинской культуры взглядом на развитие искусства как постепенное восхождение к совершенной форме, воплощающей совершенную действительность; категоричностью оценок, претендующих на всеобщность и историческую завершенность.

Согласно Гегелю сталинская культура рассматривает эволюцию мирового искусства с точки зрения двух моментов: общекультурного развития (материальный и духовный уровень цивилизации) и политического строя (социальная и государственная форма жизни). Несмотря на то, что философия Гегеля «недостаточно научна» и в ней много «фантастики», она признается весьма актуальной: «У Гегеля мистически предопределенное восхождение «мирового разума» по ступенькам познания, даже искаженная у него идея волнообразного и спиралевидного развития искусства, взятого как комплекс разных видов и форм — необычайно плодотворна» [3]. Поскольку «основной недостаток» системы Гегеля — разрыв между «идеализирующими лозунгами» и практическим содержанием (буржуазная собственность) — в рамках сталинской культуры преодолен, гегелевский гуманизм получает новое выражение.

На смену пониманию духовного развития индивида как восхождения по ступеням самопознания мирового духа приходит абсолютизация социальной материи — коллектива, ведомого партией и ее вождем. Данный факт отражает становление нового типа мифотворчества, новой системы жизни и мысли, где антитеза авторитарного (восточного и антично-средневекового) и либеральногуманистического (новоевропейского) сознания снимается [4]. Социалистический тип мифотворчества утверждает новый монизм субъекта и объекта, в основе которого лежит производственная деятельность и, соответственно, обожествление техники и ее носителя — пролетариата. Так, эстетическая система Гегеля в сталинской культуре существенно трансформируется.

Согласно Гегелю все художественные формы в культуре проходят три последовательно сменяющие друг друга стадии: символическую, классиче-

скую и романтическую, а неравномерность развития истории искусства объясняется тем, что формы культуры определяются общественно-политическим устройством. По Гегелю, архитектура как форма выражения в целом принадлежит символической сфере, но, следуя законам диалектики, в ходе своего исторического становления также последовательно проходит все три стадии. В символической архитектуре внешняя форма получает самостоятельное значение, объективно-вещественное выражение трансцендентной идеи (алтарь, обелиск, пирамида, буддийская ступа). В классической архитектуре внешняя форма становится средством для достижения чуждой ей цели (приобретение алтарем внутреннего пространства и превращение его в храм — дом бога). В романтической (готической) архитектуре происходит синтез символической и классической форм, т.е. внешняя форма выступает как субъективное проявление общей идеи и в то же время приобретает самостоятельное значение.

Поскольку романтизм по своей природе индивидуалистичен, сталинская культура не могла признать его не только завершающим этапом эволюции искусств, но и вообще воспринять как нечто значительное. Романтизм трактовался как отражение иррационального мира, распадающегося на индивидуализированные единицы и, соответственно, приобретающего противоречивый и незавершенный характер. Положение Гегеля о слиянии символического и классического в романтической форме готического собора рассматривалось как «натяжка» и «абстрактная игра в понятия». Но в то же время в его эстетике, прочитанной «творчески и критически», увидели нечто, что свидетельствовало о преодолении романтизма — идею синтеза «двух устремлений в архитектуре: одного — к формам, придающим грандиозному внутреннему пространству выразительность и идейное значение, характерное для архитектуры нового времени, и другого — к красоте внешних форм и целесообразности архитектурного построения, отличавших античную архитектуру» [3]. Сталинская культура чутко улавливала близкие ей по духу черты — предпосылки синтеза авторитарного и гуманистического, идейного и целесообразного.

С одной стороны, величие, демократичность и практическая целесообразность, отмеченные Гегелем в классической архитектуре, определили ее непреходящее значение как символа устремлений советской культуры к духу коллективизма, ясности и простоте строго очерченной идеологической модели. Чаще, правда, используются не классические первоисточники, а их ренессансные и классицистические интерпретации. С другой стороны, авторитарные установки на незыблемость и вечность требовали обращения к формам символической архитектуры. Все это определяет репертуар заимствуемых пространственных образов и форм, формирующих архитектурный стиль 1930—1950-х гг., и принципы творческой переработки «избранного» наследия.

Из «самостоятельной» символической архитектуры Древнего Востока, в которой народы поклонялись своей порабощенности природным началом, индивидуализированным в образе государя, наделенного полнотой духовной власти над ними, заимствуются архитектурные типы пирамиды, зиккурата, ступы, обелиска, «мемнона». По Гегелю, подобные сооружения — суть символы и в своем образе выражают священное, объединяющее людей начало [5]. Простота и геометрическая ясность этой архитектуры пробуждает всеобщие «архетипические» представления, т.к. образ здесь моделируется на основе символических кодов, где отношения между формой и содер-

жанием непреложны, ибо полагаются установленными Богом. Подобная архаизация образа отличает архитектуру первых послереволюционных лет, так называемый период символического романтизма. Наиболее ярко это проявляется в мемориальной архитектуре: в монументах героям (Н. Колли, Л. Руднев, И. Фомин и др.), конкурсных проектах крематориев (А. Гегелло, И. Голосов, Н. Колли, И. Фомин и др.) и Мавзолея В.И. Ленина (Л. Руднев, И. Фомин, А. Щусев и др.).

Поскольку простота многозначна, а, следовательно, допускает различные трактовки, возникает потребность в конкретизации. При рассмотрении символической архитектуры невозможно указать постоянного содержания и способа формирования в качестве принципа. Здесь разные знаки могут нести одно значение, и их трансформация не порождает новых смыслов, а выражает различные степени приближения смысла к абсолюту. Архитектурный символизм требует вербальных пояснений для неискушенного народа. Возникает необходимость в использовании изобразительно-повествовательных свойств скульптуры и живописи, т.е. в обращении к синтезу искусств с опорой на устоявшиеся ассоциации и национальные традиции.

В 1933 г. при создании архитектурно-планировочных мастерских Моссовета первый секретарь МК КПСС Л. Каганович поставил перед руководителями мастерских задачу: ориентироваться в вопросах формы на классику и, прежде всего, на Ренессанс. Таким образом, тенденции, проявлявшиеся в попытках романтической архаизации архитектурного образа (конкурсные проекты Дворца рабочих в Петрограде 1919 г. и Дворца труда в Москве 1922—1923 гг.), официально закрепляются (конкурсные проекты Дворца Советов 1932—1934 гг.). Творческие дискуссии 1933—1934 гг. посвящены поиску подходов к освоению наследия: «пониманию механики возникновения художественного образа» и «изысканию новых форм, связанных с новым содержанием» на основе использования нового «творчески-функционального» метода.

Например, характер иерархии пространственных отношений между объектами восточной символической архитектуры носит незавершенный характер. В их основе лежит идея бесконечного пути перерождений: как горизонтального простирания в вечность (египетский храм), так и вертикального к Богу (Вавилонская башня, пирамида). И поскольку сталинская культура стремилась к полному завершению своей иерархической модели, заимствуемые прототипы трансформируются. Архитектурно-пространственный тип Дворца Советов представляет собой их гибрид, на который затем наслаиваются классические и ренессансные формы. Правомочность такого синтеза объясняется тем, что архитектура ренессанса, с ее тяжелыми венчающими частями зданий, как бы стремится замкнуть пространство. К тому же тип ренессансного палаццо, следуя традициям неоклассики 1910-х гг., воспринимался в сталинской культуре как «норма» представительного городского здания.

Советская архитектура строила реальность, в которой архитектурный объект не мог служить ее знаком, а должен был олицетворять саму реальность. Символический смысл архитектурной формы может восприниматься осознанно, а может включаться в сложную систему ассоциативных связей и стереотипов на подсознательном уровне. Со временем символическое значение может стираться, постепенно трансформируясь и становясь атрибутом

художественно-композиционного языка архитектуры. Так, согласно Гегелю, осуществляется переход к формообразующему принципу «служебной классической архитектуры» — рациональному оформлению независимо существующего смысла, непосредственно не выраженного архитектонически [5].

В вербальном плане советская архитектура движется в русле логики рационального, но на практике целесообразность формы сомнительна. Например, А.В. Щусев, поясняя логику архитектурного формообразования гостиницы «Москва», пишет: «Советская архитектура придает большое значение образу. Я пытался проводить архитектурный образ в здании гостиницы художественно и научно. Советская власть строит для народных масс так, чтобы это было убедительно и показательно для всего социалистического строительства, чтобы строительство было основано на рациональных материалах, на рациональном образе и на рациональной функции образа. Эти предпосылки должны быть обязательны, иначе образ будет фальшивым или неполноценным» [7]. Возможно, функция образа в сталинской культуре и рациональна, но логика формообразования гостиницы «Москва» совершенно иррациональна. Особенно дисимметрия главного фасада, утвержденного Сталиным.

Классическое наследие стало в 1930—1950-е гг. символом высших ценностей, но, в отличие от античного мировоззрения, в советской архитектуре этого периода смысл не мог существовать независимо. Потому что, во-первых, для советского человека существовала только одна реальность — идеологическая, определяющая и включающая абсолютно все смыслы, а в эпоху античности вполне осознавали границу между мифом и реальностью; во-вторых, сталинская архитектура была выражением иерархической системы пространственных отношений, а античная архитектура — результат дискретного характера пространственных отношений, выражающих относительную независимость греческих полисов. Характеру греческой классики присущ диалогический характер отношений между объектом и средой, в отличие от монологического характера «сталинской классики», проявляющегося в ее стремлении к завершенности и агрессивной отграниченности от всего, что не вписывается в идеологическую систему. Суть архитектурного формообразования в такой культуре — полагание границ по отношению к внешнему миру. Отсюда и предпочтение римской классики и Ренессанса, разрабатывавших тему стены.

К концу культурного цикла в 1950-е гг. архитектурная граница полностью превращается в декорацию. Яркой иллюстрацией данного процесса являются заполнившие центры крупных городов неоренессансные сооружения, подобные жилым домам А.К. Бурова, И.З. Вайнштейна, А.Г. Мордвинова, З.М. Розенфельда и др. или отмеченному госпремией дому И.В. Жолтовского на Большой Калужской улице в Москве. В стремлении «преодолеть монотонность» стены Жолтовский передает ведущую композиционную роль карнизу (ограничение по вертикали). «Карниз дома на Большой Калужской улице — своеобразный итог творческих исканий мастера, его многолетних анализов и обобщений. ... Мастер не стал продолжать этот карниз на дворовом фасаде дома — иная функция, иная трактовка архитектуры. Завернув его от бокового фасада на дворовой, архитектор тут же его обрывает» [8]. Этого очень опасался А.С. Никольский, когда в 1929 г. в открытом письме И.А. Фомину писал: «Я отказываюсь жить в мире масок, ... я хочу видеть

лицо подлинной жизни, лицо современности» [9]. Никольский, подобно многим сторонникам конструктивизма, хотел взглянуть в глаза жизни, не надевая на свои творения маски. Его слова воспринимаются как протест против полного поглощения реальности советским Утопосом. Советскому режиму было что скрывать. Это и демонстрирует жилая архитектура 1930—1950-х гг., где богатая деталировка фасадов маскирует примитивную пространственную структуру жилых ячеек.

Гегель же трактовал классическую архитектуру и античное пространство именно как пространство для реальной жизни. Он особо подчеркивал общественную направленность греческой архитектуры, ее целесообразную тектоничность в оформлении акрополей и агор, аскетизм индивидуального жилища по сравнению с римской архитектурой, в которой всецело преобладает польза, высвобождающая место декоративной красоте частных вилл, императорских дворцов и терм [5]. В сталинской архитектуре это понимание рациональной целесообразности полностью инвертируется. Во-первых, официально признается только одна реальность, и, во-вторых, она конструируется для мифического коллективного субъекта, поскольку сфера действительного существования советского человека вытесняется в сферу несуществующего.

Именно осознание величия коллективного субъекта пробуждает пласт образности, связанный с древневосточной тематикой, с ее любовью к гипертрофированному масштабу. В результате возникает новая синтетическая архитектура для отправления нового культа — будь то Дворец Советов или более ранний материализованный символ эпохи — Мавзолей Ленина. На примере этих объектов легко проследить смысловую инверсию архитектурного образа сталинской эпохи: от первоначального варианта, в котором Мавзолей трактовался как постамент для колоннады или ротонды (символов греческой демократии), через его преображение в трибуну для ЦК Компартии и прототип постамента вавилонской башни, вознесшей в небеса великого вождя в проекте Дворца Советов.

В объединении принципов, присущих и «символической», и «классической» форме архитектурного мышления, проявляется своеобразие мифологического ядра сталинской культуры, ее героико-романтический пафос коллективного жизнетворчества. Архитектурный образ, подчиняясь спускаемым сверху директивам, перестает быть продуктом переработки представления индивида и лишается целесообразности классики в понимании Гегеля. Принципы тектонической организации архитектурного сооружения становятся в полную зависимость от идеологических кодов.

Вербальный характер сталинской культуры, конструирующей идеологические штампы, напрямую отразился в эволюции архитектурной теории и практики. Если в 1930-е гг. теория «соцреализма» в основном проговаривалась вслух, а на уровне практики происходило примеривание одних и тех же архитектурно-пространственных типов и форм к различным по функциональному назначению сооружениям, то к концу 1940-х гг. уже можно говорить о полностью сформированном архитектурно-пространственном словаре.

Следующий этап — формирование образных высказываний или градостроительных ансамблей. Исходным пунктом в формировании универсаль-

ной модели градостроительного творчества явился тиражируемый по всей стране генеральный план реконструкции Москвы 1935 г., где каждому градостроительному элементу, помимо определенного места в пространственной иерархии, ставился во взаимно однозначное соответствие определенный набор формальных прототипов. Советский город рассматривался как мощное средство формирования общественного самосознания, где понятие красоты отождествлялось с идеологической необходимостью. Эти тенденции усилились в послевоенный период, когда появилась необходимость отстраивать практически с нуля некоторые города, подобно Сталинграду утратившие свое прошлое, а следовательно, появилась возможность реализовать в чистом виде теоретическую концепцию советского города.

Начав с отрицания и «разрушения до основания» существующих канонов и «очищения» художественного языка: революционно-символический романтизм в архитектуре, абстракционизм в живописи, поэтический футуризм в слове — советские архитекторы строили «новый мир», наполняя старые формы новыми смыслами. В архитектонической системе этого мира нашлось место практически всем архитектурно-пространственным типам и стилям, когда-либо возникавшим в истории, но все они трактовались как некое приближение к идеалу, воплотившемуся в образе Дворца Советов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Минервин*  $\Gamma$ . Ленинская теория отражения и вопросы теории советской архитектуры // Архитектура СССР. 1953. № 1. С. 1—8.
- 2. *Гройс Б*. Русский авангард по обе стороны «черного квадрата» // Вопросы философии. 1990. № 11. С. 67—73.
  - 3. Верцман И. Гегель об архитектуре // Архитектура СССР. 1936. № 6. С. 65—70.
  - 4. Лосев А.Ф. Диалектика мифа. М.: Мысль, 2001. С. 494.
  - 5. *Гегель Г.В.Ф.* Эстетика. Т. 3. М.: Искусство, 1971.
- 6. *Щусев А.В.* Анализ архитектурных форм гостиницы «Москва» // Академия архитектуры. 1936. № 3.
  - 7. Рябушин А.В. Гуманизм советской архитектуры. М.: Стройиздат, 1986. С. 240—242.
  - 8. Мастера советской архитектуры об архитектуре. Т. 1. М.: Искусство, 1975. С. 488.

© Янушкина Ю.В., 2009

Поступила в редакцию 28.04.09

#### ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА. УПРАВЛЕНИЕ ИНВЕСТИЦИОННО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ

УДК 711.1

Н.Г. Юшкова

## ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИИ: ПРОБЛЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ И ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Показаны взаимосвязи стратегических задач развития экономической системы и приоритетных направлений территориально-пространственной политики. Установлена и раскрыта зависимость принципов структурно-пространственной организации территории от характера размещения секторов экономики.

K л ю ч е в ы е с л о в а: территориально-пространственная политика; пространственное развитие территории.

The author shows the interrelations of strategic tasks of economic system development and foreground directions of territory-space policy. The dependence of the principles of structure-and-space territory organization on the character of economics sectors location was determined and described.

K e y w o r d s: territory-space policy; spatial territory development

В процессе становления рыночных отношений в градостроительстве зарождаются новые принципы формирования материально-пространственной среды, отражающие характерные социально-экономические преобразования в обществе. В современном российском городе проявляются те же закономерности пространственного развития территории, что и во многих странах с аналогичной экономической системой. Взаимосвязь социально-экономических и территориально-пространственных процессов на различных этапах развития общества является одной из парадигм теории градостроительства. В индустриальном обществе производственная сфера является приоритетной, а различия между промышленным и товарным производством имеют выраженный характер. На этих характерных признаках базируются принципы социально-экономической и градостроительной политики. Развитие социально-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> В индустриальной экономике производственная сфера (профиль промышленных предприятий, особенности технологических процессов) обусловливает типологическое ранжирование градостроительных систем, направления их пространственного развития, особенности функционирования сфер потребления и обмена. Тенденции размещения территориальных зон и объектов промышленного производства предопределяют стратегии расселения, структурно-пространственной организации функциональных процессов. В индустриальной системе основные сферы, влияющие на механизм градообразования: производство, потребление и обмен — взаимодействуя в экономическом отношении, позволяли получать совершенно определенные, прогнозируемые градостроительные результаты.

экономических отношений в последние полвека привело к значительным структурно-технологическим и организационным изменениям в общественном устройстве [1]. Технологические принципы организации общественного производства формируют методологические основы теории постиндустриального общества, согласно которой различные этапы городского развития (доиндустриальный, индустриальный, постиндустриальный) дифференцируются в зависимости от характера изменения роли производственных секторов (первичного, вторичного, третичного, четвертичного). Идеи взаимосвязи социально-экономической и пространственной систем, дифференцирующихся в зависимости от преобладающих факторов (ресурсов) развития, берут начало в довоенной зарубежной урбанистике (А. Фишер, К. Кларк).<sup>2</sup>

Каждый этап развития города имеет отличительные особенности. Эти различия объясняются принципиальным переходом от материального производства к производству услуг, все большим вовлечением в него значительных объемов информационных ресурсов как средства интенсификации производственных отношений. Дифференцированный характер экономической активности субъектов рынка, развитие технологических процессов в городах, формирование новых типов экономических, социально-общественных и пространственных связей в последние полвека свидетельствуют о переходе к постиндустриальному этапу развития общества. В постиндустриальном обществе по сравнению с индустриальным постепенно размывается граница между предприятиями промышленной индустрии, преобладают третичные формы производственной деятельности, выделяется в самостоятельное направление сектор обслуживающих предприятий. Структурно-функциональное наполнение экономических секторов, в свою очередь, оказывает существенное влияние на процессы градостроительного развития территории и предопределяет новые принципы использования и застройки территории. Вследствие этого отмечаются ведущие градостроительные тенденции централизации (сосредоточения в центральном ядре города селитьбы, общественного обслуживания, транспорта) или децентрализации (пространственного рассредоточения производства, вызывающего трансформацию и преобразования сопряженных с ним видов деятельности).

Постиндустриальный период социалистической экономики отличается особенностями: одним из ведущих направлений социально-экономической политики становится стремление к постоянному возрастанию уровня жизни на основе принципа равномерности распределения и потребления материальных благ и услуг, а сферы обмена и потребления рассматриваются как второстепенные по отношению к производственному сектору. Вместе с тем изменение ха-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Первичный сектор объединяет виды деятельности, связанные с получением первичных ресурсов (сельское и лесное хозяйство, рыболовство, горно-, нефте- и газодобыча). К вторичному сектору относятся отрасли обрабатывающей промышленности. В третичном секторе представлены виды производственной деятельности (сферы услуг), включающие практически все системы обеспечения функционирования первичного и вторичного секторов экономики. Четвертичный сектор развивается ускоренными темпами за счет интенсификации функций управления, торговли, сбыта, материально-технического снабжения, связи, транспорта, системы обеспечения (информационные услуги, консалтинг, страхование, аудит, некоторые виды проектирования, ведение биржевых и экономических операций и другие услуги общего характера). Кроме того, в этом секторе представлена группа услуг, рассчитанных на элитные группы потребителей, которая сопоставима по значимости в экономическом и градостроительном отношении с первичными и вторичными видами деятельности.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> В работах, изучающих социальные аспекты формирования и развития градостроительных объектов [2], «обмен» (социальный обмен или общение, взаимодействие социальных субъектов) рассматривается как специфический вид деятельности, играющей системообразующую роль в развитии градостроительных систем. Сфера обмена представляет собой одно из важных идеологических средств стимулирования установленных нормативов

рактера трудовой занятости городского населения, улучшение его благосостояния на основе роста объемов производительности труда задает новые градостроительные факторы развития сферы потребления. Этот принцип в градостроительстве вызвал появление идентичных (пропорциональных) методов формирования элементов материально-пространственной среды и разработку подавляющего количества градостроительных концепций, например модель организации системы ступенчатого общественного обслуживания. Несмотря на прогрессивность принципов развития сферы потребления, они не способствовали качественному совершенствованию пространственной организации среды обитания. Существовавшая социально-экономическая система предоставляла формальные гарантии многообразия форм предоставляемых услуг, но, в то же время предоставление нестандартных услуг и удовлетворение потребностей, не предусмотренных этой системой, было не допустимо. Вариабельность спроса потребителей не могла найти отражения в характере размещения объектов, их функциональном наполнении и пространственной организации территории. Несмотря на фактическое многообразие видов предложения, не учитывались особенности потребления в многообразных градостроительных ситуациях, различающихся, например, природно-климатическими условиями. Жителям южных и северных районов нашей страны предоставлялись одинаковые продукты и услуги, не адаптированные к специфике потребления, они не дифференцировались в характерные группы, а градостроительная организация объектов для их предоставления если и различалась, то незначительно. Если и выявлялись различные потребности, они не имели реальных возможностей удовлетворения. Подобное уравнивание послужило основной причиной того, что пространственная организация территории для градостроительного размещения этих видов деятельности варьировалась незначительно и не позволяла выходить за рамки типовых структурно-планировочных и пространственных решений.

Условия рыночной экономики постоянно предъявляют новые и все более высокие требования к функциональной организации деятельности в каждом из секторов экономики. Третичный и четвертичный секторы, являясь источником получения дополнительной прибыли, открывая возможности привлечения инвестиций, становятся доминирующими. Требования этих секторов экономики к пространственной организации территории отличаются от традиционных, предъявляемых сферой промышленного производства. Способ организации территории активно реагирует на перераспределение на рынке производства и потребления, а пространственная локализация населения, занятого в этих видах деятельности, отражает данную специфику. С расширением сфер влияния предприятий третичной и четвертичной индустрии, все более неравномерным характером их размещения возникают новые характерные приемы пространственного развития и преобразования территории. Предприятия третичного и четвертичного секторов предъявляют особые требования к выбору территорий

контактов, прежде всего, в целях нравственного и духовного становления личности, а количественные и качественные характеристики, описывающие ее, нормируются, структурная и пространственная организация территории в пределах градостроительной системы являются предметом государственного (муниципального) регулирования. В экономической системе социализма (на примере СССР) создавались равноценные (одинаково доступные) блага для всех граждан (дифференцированные на материальные блага и услуги), распределяемые среди потребительй относительно равномерно в целях последующего удовлетворения потребностей (потребления) безотносительно к их социальной приналлежности.

для своего размещения: в основном это репрезентативные части города, незначительные по величине фрагменты территории. Но, в то же время, благодаря высокой инвестиционной отдаче от их функционирования, привлечению потоков потребителей (вне зависимости от мест их проживания и трудовой деятельности) и повсеместному распространению в границах города отмечаются новые формы экстенсивного землепользования. Вследствие этого проявляются характерные тенденции качественных структурных изменений в сложившемся функциональном зонировании территории, увеличения удельного веса урбанизированных территорий в пределах градостроительной системы, активизации инвестиционно-градостроительной деятельности, прежде всего в форме реконструктивных мероприятий.

С изменениями социально-экономической политики в нашей стране возникает необходимость обоснования новых направлений пространственной организации процессов жизнедеятельности на территории [3]. Правовые принципы построения новой, рыночно-ориентированной экономики позволили значительно расширить рамки хозяйственной деятельности ее субъектов. 4 Возрастание роли потребительского сектора, уравнивание в правах индустриальных и обеспечивающих видов деятельности приводит к тому, что в градостроительстве наряду со сложившимися принципами организации в пространстве процессов жизнедеятельности возникают новые приоритеты. Рыночная экономика создает условия сферам потребления и обмена для конкурентного развития: становясь равноправными видами производственной (хозяйственной) деятельности, они проявляют различную степень экономической активности, фиксируемую финансовыми результатами, позволяющими претендовать на наиболее привлекательные, с точки зрения потенциального использования, территории. На новом урбанизации отмечается интенсификация процессов социальноэкономического развития, изменяется характер экономической активности субьектов рынка, сфера потребления предлагает многообразие товаров и услуг, четвертичные виды деятельности становятся главенствующими и характеризуются пространственной экспансией. На укрепление этих тенденций оказывают влияние технологические изменения в производственной сфере и расширение сферы применения средств телекоммуникаций, систем информационных технологий, пассажирского и грузового транспорта. Предприятия третичного и четвертичного секторов пополняются за счет значительного высвобождения трудовых ресурсов из сферы промышленного производства, в то время как предприятия первич-

<sup>4</sup> В период перестройки экономического механизма производственная сфера трансформировалась, сложившиеся принципы взаимного пространственного размещения градостроительных объектов уграчивали свое значение, крупные территориально емкие объекты перестают играть градообразующую роль, трансформируя структурнопространственную организацию территории. С изменением характера функционирования объектов промышленного производства не возникает более рационального территориально-пространственного их перераспределения, а городская инфраструктура, функциональные и планировочные связи, до недавнего времени подчиненные промышленности, оказались лишены своей базы. Снижение значимости производства, устойчивых функциональных и планировочных связей сфер деятельности между собой вызвало необходимость разработки новых приоритетных направлений экономической и территориальной политики. Доступ к рыночным ресурсам открыл перспективы принятия управленческих решений в сфере градостроительства, а многообразие форм собственности способствовало проведению отдельными собственниками самостоятельной экономической политики, но и привело в подавляющем объема отечественного промышленного производства. Новые хозяйствующие субъекты: акционерные компании, общества с ограниченной (полной) ответственностью, различные виды товариществ, — являясь собственниками объектов, расположенных на территориях промышленных предприятий, использовали недвижи-

мость не по ее прямому назначению, а исключительно с целью извлечения прибыли.

ного и вторичного секторов экономики не выдерживают конкуренции с ними, утрачивают экономическое значение, смещаясь, из соображений экономической целесообразности, на периферию города. А с повышением их удельного веса возникает необходимость в увеличении общей площади территории для размещения этих секторов. Эти процессы повторяются на территории постоянно. Преобладание непроизводственных объектов, выполняющих управленческие, обслуживающие и информационные функции, трансформирует сложившуюся градостроительную организацию территории и вызывает необходимость включения механизма их целенаправленного регулирования.

Наряду с этими тенденциями происходят социальные изменения в сфере потребления (образе жизни горожан и их системе ценностей). Дифференцируются требования, предъявляемые жителями города к потребляемым товарам и услугам. И, как следствие этого, выделяется одновременно большое количество типов (групп) потребителей, общество все более расслаивается. Современные представления об обмене как о сфере городской жизнедеятельности стали значительно более сложными и интегрированными, а типы обменных отношений дифференцированы в зависимости от принадлежности к социальным группам (социальный статус горожанина определяет вид обмена (общения)). Сфера обмена используется с целью развития индустрии развлечений и других видов прибыльной деятельности. Ее функционирование осуществляется под воздействием рыночных факторов спроса и предложения, а параметры процессов определяются исходя из предпочтений потребителей. Потребление, становясь все более активным видом экономической деятельности, приобретает в современном городе былую значимость производственной сферы и соответствует характеру спроса. Сфера потребления позволяет привлекать и приращивать капитал, так как ее продукты, благодаря их конкурентоспособности, востребованы потребителями (пользователями), а расширение сферы способствует значительному увеличению дохода инвесторов. Пространственный характер размещения материальных благ и услуг — результатов деятельности в сфере потребления и обмена — отражает специфику распределения капитала, а его комплексный анализ становится определяющим для принятия градостроительных решений. Градостроительная деятельность переориентируется в большей степени на эти процессы. Вследствие этого объектами первоочередного инвестирования строительства, реконструкции — становятся территории, реализующие процессы в сфере потребления и обмена, в ряду которых особое место занимают объекты науки, управления, образования, а также всех видов производства информации. Однако эти тенденции не устойчивы: любые колебания состояния экономической системы приводят к новым пространственным схемам размещения функций, востребованных рынком, и вызывают корректировку структурных связей предприятий этих секторов.

Расслоение видов деятельности в сфере обмена является своеобразным индикатором рыночной экономики: количеству «слоев» соответствует аналогичное количество вариантов выбора способов обмена и количество потенциальных потребителей и производителей этой услуги. На каждом из таких слоев формируется определенный «потребительский стандарт». В современных условиях выделение двух характерных типов потребления основано на классических представлениях о социальных гарантиях, предоставлении каждому индивиду жизненно необходимого социального минимума, гарантированного

конституционным правом гражданам страны [4, с. 23—24]. Оба типа различаются пространственными и экономическими принципами их формирования и развития. Общедоступный, социально гарантированный вид, не предполагающий широкой вариабельности предложения материальных благ и услуг, особенностей потребительских групп, обеспечивается соответствующими государственными (муниципальными) службами и реализует на практике одну из основных функций управления — регулирование как способ учета усредненных потребностей пользователя. Территориальное развитие градостроительных объектов, реализующих первый тип потребления, является одним из ведущих направлений цивилизованной градостроительной политики. Второй тип потребления является, в отличие от первого, своеобразным индикатором состояния рыночных (экономических) отношений: разнообразие потребностей вызывается уровнем благосостояния потребителей, а рынок реагирует на это предложением новых видов товаров и услуг. Потенциальные пользователи товаров (услуг) этой группы крайне избирательны, их вкусы отличаются динамичностью (непостоянны). Это влечет за собой необходимость для рыночных структур ориентироваться в собственном производстве на рыночно востребованные продукты и осуществлять предложение товара (услуги) в соответствии с многообразием спроса. Каждое из таких предложений гипотетически способно найти потребителя (покупателя). Производители благ (услуг) в стремлении к получению прибыли сталкиваются с необходимостью расширения круга потребителей, что заставляет их постоянно развивать свою деятельность. В результате этих процессов происходит насыщение рынка. Предложения этого типа рассчитаны на потребителей, способных (имеющих желание и возможность) приобрести определенный продукт (услугу). Ярко выраженная коммерческая подоплека потребления этого типа позволяет ему активно воздействовать на формирование рыночных отношений. В градостроительном отношении это выражается в дифференциации и многоуровневости пространственной организации территории.

Для современной сети потребления характерны значительное многообразие форм потребностей, их постоянное расширение и изменение. В зависимости от уровня спроса и в соответствии с ним корректируются потребительские предложения. Для каждой группы потребителей (например, с различным уровнем дохода) предлагается свой, уникальный продукт. Этим специфическим способом предложения достигается чрезвычайное разнообразие пространственной организации территории, градостроительных систем и комплексов и сооружений. Востребованность определенных групп товаров (услуг) соответствующими группами потребителей придает им статус доходных видов деятельности и является стимулом к расширению территории, а затем и к усложнению ее пространственной организации. С учетом возможности предоставления услуг, фокусирующих потоки посетителей с определенным уровнем спроса, территории осваиваются неравномерно и дифференцированно, с выделением отдельных планировочных частей города, отличающихся инвестиционным потенциалом. Учитывая данные экономические тенденции и закономерности потребления в обществе с развитой рыночной экономикой, причины возникновения разнообразных форм предложения и способов их потребления, можно планировать направления структурно-функциональной трансформации территории. Благодаря способности градостроительной деятельности аккумулировать экономически активные процессы, создаются предпосылки формирования современного инструмента, позволяющего прогнозировать количественные и качественные характеристики пространственных преобразований территории. В то же время активно воздействовать на процессы потребления, даже учитывая имеющиеся преимущества государственного (муниципального) управления, не представляется возможным: градостроительная организация деятельности в этой сфере регулируется в основном действием рыночного механизма.

Общественные отношения в современной России переходят на новый этап своего развития, а рыночная система переориентируется в большей степени на четвертичный и пятеричный секторы. 5 Размещение объектов пятеричной индустрии, как правило, не связано с освоением и использованием крупных массивов территории. Лишь в некоторых случаях отмечаются процессы градостроительного освоения значительных по величине земельных участков. Но это происходит в результате целенаправленной градостроительной политики. 6 Неравномерная пространственная локализация на территории пятеричного сектора приводит преимущественно к инфраструктурным, а не структурным преобразованиям, и зависит от степени активности социально-экономических процессов. То, что развитие осуществляется в основном на территориях, способных давать экономический эффект (особой категории экономически активных территорий), предопределяет выработку градостроительной политики и необходимость вмешательства органов государственной и муниципальной власти в эти виды деятельности, включения механизма управления [6]. В зависимости от экономической ситуации органы государственного (муниципального) управления проводят дифференцированную градостроительную политику, целенаправленно интенсифицируя (ограничивая) развитие отдельных рыночных сегментов и, соответственно, территорий. Для этих целей в градостроительной деятельности используются специальные технологии управления, сочетающие функции стимулирования и регулирования, основанные на выявлении и дифференцированном учете экономических процессов на территории.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Власова Н.Ю. Структурная модернизация экономики крупнейших городов России. Екатеринбург, 2000.
  - 2. Яргина З.Н., Хачатрянц К.К. Социальные основы архитектурного проектирования. М., 1990.
- 3. *Юшкова Н.Г.*, *Долотова Ю.А*. Проблемы пространственной реорганизации градостроительных систем и совершенствование документации территориального планирования // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Стр-во и архит. 2008. Вып. 11 (30). С. 144—150.
- 4. Донцов Д.Г., Юшкова Н.Г. Градостроительное регулирование рационального использования территории. М., 2007.
  - 5. Занадворов В.С., Занадворова А.В. Экономика города. М., 2003. С. 214.
- 6. *Юшкова Н.Г.* Приоритеты управления градостроительным освоением территории на современном этапе изменений социально-экономического устройства общества // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Стр-во и архит. 2005. Вып. 5 (17). С. 212—217.

© Юшкова Н.Г., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Согласно новейшим исследованиям [5], среди экономических секторов выделяются пятеричные виды деятельности, ориентированные на использование интеллектуальных ресурсов и привлечение высококвалифицированных кадров и включающие «высокие» технологии, управление, административное обеспечение, отдельные формы науки, образования, медицины.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Характерным примером градостроительной тенденции этого типа является строительство комплекса зданий компании «Газпром» на ул. Наметкина в Москве, концентрирующих управленческие, научные и информационно-технологические функции.

#### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА. ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА. ГОСТИНИЧНОЕ И КУРОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 711.433.01

Н.В. Иванова, И.Н. Тюкова (Тур)

# К ВОПРОСУ ОБ ОСНОВАХ ВИЗУАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ ОТКРЫТЫХ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ОПТИМИЗАЦИЮ КОМФОРТНОСТИ ЖИТЕЛЕЙ

Рассматриваются вопросы комплексного исследования городского пространства с точки зрения объективных и субъективных факторов визуальной экологии.

К л ю ч е в ы е с л о в а: визуальная экология, видеоэкология, визуальный комфорт, визуальное восприятие, городское пространство, формирование городской среды, формальная композиция, декоративность.

The article presents various issues of complex research of open urban space taking into consideration various factors (impartial and personal) of visual ecology.

K e y w o r d s: visual ecology, video ecology, visual comfort, visual perception, urban space, consolidation of urban environment, perfunctory composition, décor.

Визуальный дискомфорт в городском пространстве негативно воздействует на характер мироощущения человека, развивая усталость, апатию, раздражение. Эта экологическая проблема находится в зоне пристального внимания многих наук, в том числе психологии, философии, социологии, экологии, искусствоведения и архитектуры, и требует всестороннего изучения.

Проблема комфорта при визуальном восприятии интересовала многих ученых прошлого века, среди них: Фехнер, Гельмгольц, Вундт и др. Их исследования основывались на физиологической реакции зрителей при восприятии архитектурно-пространственных объектов. При этом ставилась цель выявления предпочтений в пропорциях и соотношений форм. Рассматривались следующие физиологические реакции: динамика мимики, пульса, дыхания в момент восприятия. Так Вундт подошел к созданию основ экспериментальных методов анализа, позволяющих выражать эстетические проявления в количественной форме. В развитие этого в дальнейшем были созданы различные методы исследования пространства, такие как: квалиметрия, метод когнитивных карт, метод локусов, метод «энергетического поля» и «визуального поля» [1]. Новые возможности в понимании и оценках возникли с появлением концепции «автоматии саккад» [2], которая раскрывает ранее не изученный механизм работы аппарата человеческого зрения при восприятии объекта. Физиологические реакции, исследуемые на уровне не только мимики, пульса

и частоты дыхания, а непосредственно — на уровне движения человеческого глаза, позволили еще более полно понять комфортные предпочтения человека. Концепция об автоматии саккад широко и полно разработана в новом направлении биологической науки — видеоэкологии, которая изучает «факторы
природной визуальной среды, оказывающие положительное или негативное
воздействие на физиологию человека и, в итоге, дает возможность объяснить
не только инструмент фиксации взгляда, но и механику выбора эстетических
предпочтений» [3]. Оказывается, человеческий глаз как наиболее комфортную
воспринимает природную среду, отличающуюся максимальным разнообразием реперных точек для фиксации взора, что позволяет ему осуществлять поиск характерности, своего рода сравнительный анализ, который задействует
глубинные пласты всего накопленного человеком визуального опыта.

Представляется очевидным, что для оценки визуальных качеств городского пространства одного лишь физиологического фактора недостаточно. Для большей объективности требуется комплексная оценка, учитывающая все факторы, связанные с формированием зрительного образа данного места, рождающего особое эмоциональное впечатление, что и является главным признаком визуальной экологии. Корбюзье писал: «...дело заключается в том, чтобы из всех частей архитектурного произведения создать единство, возбуждающее эстетическое волнение» [1, с. 113]. Своего рода перекличкой выглядит определение художественного образа в трактовке В.В. Портновой: «...художественный образ представляет собой свободное, активное и устойчивое единство. Оно возникает как результат слияния противоположных активных начал, полученных путем дробления в познавательном акте, самостоятельных инертных сущностей» [4]. Таким образом, может быть поставлена задача исследования, создания основ визуальной экологии и научного обоснования причин, не позволяющих сформировать в сознании субъекта комфортный и целостный образ городского пространства с эстетической и физиологической точек зрения.

Целью исследования является разработка научно обоснованных предложений, направленных на формирование у индивида через визуальное восприятие целостного образа городского пространства.

Теперь потребуется подробный анализ факторов визуальной экологии. Такой анализ позволит выявить их полный перечень и определить наиболее существенные из них для целей нашего исследования.

Прежде всего, сразу следует определиться в терминах.

Под визуальной экологией городского пространства будем понимать систему совокупных факторов, позволяющих обозначить комфортный по зрительному восприятию, а также целостный, запоминающийся по семантическим признакам образ городского пространства, иначе — образ места. Такое определение не вызывает противоречия и может быть принято как отражающее в полной мере смысловую часть предмета.

Под понятие «факторы» сводятся как объективные признаки восприятия, основанные на единых для всех людей свойствах человеческого организма, так и субъективные признаки восприятия, учитывающие различный уровень подготовки к восприятию. Таким образом, к субъективным факторам относятся те, которые основаны на особенностях зрительного восприятия (принцип автоматии саккад), законах психологии восприятия (гештальтпсихология), законах восприятия цвета (цветоведение), то есть на законах, единых для всех людей,

основанных на особенностях человеческого зрения и свойствах мозга. В свою очередь, к субъективным факторам следует отнести факторы, зависящие от типа нервной системы человека, его принадлежности к той или иной социальной и возрастной группе, культуре, уровня образования и самосознания человека (фрейдизм). Причем, все это — на фоне географического, исторического, национального, а также социального и функционального аспектов и аспекта динамики восприятия в зависимости от целей передвижения в пространстве.

Восприятие обычного зрителя с учетом возраста и поведенческих характеристик и профессионалов, вовлеченных в создание архитектурных пространств, к которым относятся практикующие архитекторы, дизайнеры, теоретики-аналитики, является различным. Это достаточно убедительно описано в работе Ю.С. Янковской [5].

Важно отметить, что оценка теоретика-аналитика является специфической, поскольку призвана не только оценить настоящее состояние визуального пространства с точки зрения исторического опыта и вышеперечисленных факторов, но и предположить развитие этого пространства в будущем.

Приведем высказывание И.А. Добрициной, основанное на разработках так называемой «новой науки»: «Новая наука построена на парадигме нелинейности, в рамках которой развивается представление о мире как о множестве систем, каждая из которых живет по законам самоорганизации и переживает периоды стабильности и скачкообразных переходов в иное состояние» [6], и далее: «...Закономерность улавливается сознанием в «поведенческом» сходстве систем — Вселенная находится в процессе творчества, как и общество, как и индивид» [6, с. 149]. Эти суждения указывают на ценность мнения индивида в оценке восприятия пространства, в которой проявляется его творчество по отношению к визуальной среде.

Таким образом, можно выстроить достаточно широкую шкалу оценок по анкетному опросу жителей, с учетом их возрастных, поведенческих и профессиональных признаков.

В итоге, выявив факторы оценок по объективным и субъективным признакам и определив баланс их различия и совпадения, возможно получить адекватную оценку исследуемого пространства различного уровня с целью выдачи комплексных рекомендаций по улучшению визуального комфорта исследуемого пространства.

Зона исследования может иметь различный диапазон: от отдельных рекреаций до города в целом, включая панорамные обзоры различных категорий. В зависимости от этого те или иные факторы оценок будут иметь большее или меньшее значение.

Исследование конкретных городских пространств с точки зрения визуальной экологии важно проводить по градообразующим группам и в сравнительном анализе с другими городами. Это связано с необходимостью определения общей шкалы оценок.

Определим границы исследования, его характеризующие факторы и методы исследования. Конкретизируем термин «городское пространство».

Городскую среду можно рассматривать как систему открытых и закрытых городских пространств. Рассмотрим визуальную экологию открытых городских пространств, требующих реконструкции, благоустройства и эстетической организации.

К таким пространствам относят исторические, общественные, жилые и рекреационные пространства. Приведем определение данного пространства, предложенное Е.О. Смоленской: «Открытое архитектурное пространство городской среды — это внешнее городское пространство, обладающее собственной композиционной структурой и композиционными элементами, контуром или пространственными границами, осями композиции или направлениями, акцентами или ориентирами» [7]. Все эти характеристики, в том числе не включенная сюда цветовая палитра, имеют визуальное проявление и определенным образом влияют на визуальный комфорт и формируют образ данного места.

Поэтому такие визуальные элементы пространства, как плоскопространственные формы, орнаментальные и декоративные структуры, фактура и цветовые акценты могут быть рассмотрены с определенных видовых точек или траекторий движения субъекта. Анализ визуальных элементов пространства возможно провести по признакам формальной композиции с точки зрения соответствия критериям искусства и с помощью упомянутых ранее методов: квалиметрии, метода когнитивных карт, метода локусов, метода «энергетического поля» и «визуального поля».

С этой целью воспользуемся результатами, полученными исследователями психологии визуального восприятия произведений станкового, декоративного и монументального искусства. При этом примем во внимание, что, несмотря на открытие объективных законов восприятия, язык плоскости не переведен в зону пространства.

Законы визуального восприятия искусства открыты известным американским эстетиком и психологом искусства Рудольфом Арнхеймом. Теория эстетического восприятия, которую развивает Арнхейм, строится на том, что «восприятие в основе своей представляет познавательный процесс, определяемый формами и типом зрительного воспитания» [8]. Законы восприятия, обозначенные им: закон завершения, закон продолжаемости (направления движения), закон подобия (похожести), закон соседства (близости), закон выравнивания — являются едиными для всех людей. Это, по сути своей, способы анализа зрительного ряда, присущие человеческому мозгу, для получения познавательной информации. Открытие данных законов позволило подтвердить верность композиционных принципов, интуитивно выработанных старыми мастерами. На основе данных законов построены принципы композиции, позволяющие решать практические задачи при построении гармоничных композиций на плоскости.

Поскольку восприятие пространства строится в основном из множества фиксированных точек, соединяющихся в сознании индивидуума в единый образ, мы можем рассматривать отдельные фиксированные точки как картинные обзоры данного пространства. И далее брать картинные обзоры за основу исследования с формальной точки зрения, применяя опыт, накопленный в решении композиционных декоративных решений в живописи и сценографии на плоскости и в пространстве. Таким образом, исследуя ряд фиксированных картинных обзоров по формальным признакам, мы получим возможность покадрового перенесения исследования в зону объемно-пространственного поля. Предлагаемый метод назовем методом формально-декоративного анализа пространства. С помощью данного метода становятся возможными: выявление степени несбалансированности формального композиционного решения на

различных видовых уровнях; определение зон недостаточной детализации, зон монотонности фактур, вялости силуэта; определение степени выразительности всей исследуемой зоны и уровня динамики развития пространства по определенным линиям передвижения жителей. Анализ вышеперечисленных факторов необходим на предпроектной стадии с целью оптимизации различных городских пространств с помощью планировочных и цветопластических решений.

В современных городах частым явлением становится реконструкция уже застроенных зон, когда происходит снос старых строений и замена их новыми или уплотнение существующей застройки. В этих случаях в застройку включаются новые объекты, требующие гармоничного решения по их размещению. Традиционными всегда считались решения, основанные на принципах подчинения и подобия нового старому, когда встраиваемый объект либо имеет подобные черты с окружающей застройкой, либо подчиняется ей по какимто признакам, таким образом органично вписываясь в существующую среду. Но не всегда применение данных принципов возможно, поскольку современное городское пространство сформировано неоднородными строениями. Как альтернатива традиционным решениям выступает принцип, отвечающий современному мировоззрению — так называемый «диалогизм» [9], выраженный в диалоге стилей и форм, в необходимости к органичному соединению разностильных разнокачественных начал.

Именно этот принцип, по мнению теоретика архитектуры И.А. Азизян, должен лечь в основу оптимизации современного архитектурного пространства, поскольку именно диалогизм соответствует естественному процессу в природе и обществе. Данный принцип органично вливается в парадигму нелинейности «новой науки», о которой говорилось выше.

Конструктивный и гармоничный диалог различных по стилистике и другим характеристикам архитектурных объемов и пространств является важным критерием оптимизации, однако традиционный способ оптимизации, основанный на подобии и подчинении нового старому, в ряде случаев остается незаменимым. В свете концепции диалогизма и задач визуальной экологии становится актуальным визуальный диалог объектов городских пространств между собой. В завершение уместным будет привести цитату Н.В. Гоголя из его заметок «Об архитектуре нынешнего времени»: «Город должен состоять из разнообразных масс, если хотим, чтобы он доставлял удовольствие взорам. Пусть в нем совокупится более различных вкусов. Пусть в одной и той же улице возвышается и мрачное готическое, и обремененное роскошью украшений восточное, и колоссальное египетское... Пусть в нем будут видны: и легко выпуклый млечный купол, и религиозный бесконечный шпиц, и восточная митра, и плоская крыша италианская, и высокая фигурная фламандская, и четырехгранная пирамида, и круглая колонна, и угловатый обелиск. Пусть как можно реже дома сливаются в одну ровную однообразную стену, но клонятся то вверх, то вниз. ... Город нужно строить таким образом, чтобы каждая часть, каждая отдельно взятая масса домов представляла живой пейзаж. Нужно толпе домов придать игру, чтобы она, если можно так выразиться, заиграла резкостями, чтобы она вдруг врезалась в память и преследовала воображение» [10].

В заключение необходимо сказать о широкой практической ценности исследований по разработке основ визуальной экологии городских пространств. Результаты в виде предложений и рекомендаций найдут применение не толь-

ко в качестве реальной помощи проектировщикам, дизайнерам при проектировании объектов городской застройки и формирования городской среды, но и для создания 3D-моделей виртуальных миров как в качестве апробации архитектурных и планировочных решений, так и в качестве самостоятельных рекомендаций для создания виртуальных миров.

Выводы. 1. Визуальный дискомфорт городов нуждается во всестороннем осмыслении и требует нового комплексного подхода. 2. Художественный (эстетический) образ места является главным фактором в оценке визуальной экологии городского пространства. 3. Выявлены объективные факторы оценок визуальной экологии пространства, основанные на свойствах человеческого мозга: на чувстве пропорций и взаимоотношений форм; законах восприятия цвета; законах визуального восприятия композиции, на физиологии глаза, выраженном в автоматии саккад. 4. Выявлены субъективные факторы оценок, основанные на анкетном опросе жителей различных возрастов и различных групп, исследуемого объекта по параметрам: восприятие образа места и воздействие на поведение. 5. Выявлены субъективные факторы оценок, зависящие от типа нервной системы, принадлежности к той или иной группе, культуре, уровня образования и самосознания человека (фрейдизм) с учетом географического, исторического, национального, а также социального и функционального аспектов и аспекта динамики восприятия в зависимости от целей передвижения в пространстве. 6. Обозначены методы исследования городского пространства: квалиметрия, метод когнитивных карт, метод локусов, метод «энергетического поля» и «визуального поля», метод фиксированных точек, метод равномерности восприятия, метод формально-декоративного анализа. 7. Определены принципы оптимизации: принцип подобия, принцип подчинения и принцип диалогизма. 8. Определен прием оптимизации: пространственный декоративизм. 9. Определен инструмент апробации — 3D-моделирование. 10. Обозначена сфера применения результатов исследования: реальное проектирование и проектирование виртуальных миров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.  $\it Conoдилова Л.A.$  Методы предпроектного анализа. Ростов-на-Дону : Рост. гос. акад. архит. и иск-ва, 2006.
- 2. Филин В.А. Видеоэкология. Что для глаза хорошо, а что плохо. М. : Видеоэкология, 2006. С. 10—47.
- 3. *Кузнецова А.Г.* Знакомьтесь: визуальная экология // Архитектура. Строительство. Дизайн. www.archjournal.ru. 2004.
- 4. *Портнова В.В.* Художественный образ как онтологическое основание искусства (Опыт феноменологической редукции): дис. ... канд. филос. наук. 2004.
- 5. Янковская Ю.С. Обыденное и профессиональное мышление в архитектурно-композиционном процессе : автореф. дис. ... канд. архит. 2000.
- 6. Добрицина И.А. Нелинейная парадигма в архитектуре 90-х годов XX века // Вопросы теории архитектуры. Архитектурное сознание XX—XXI веков: разломы и переходы : сб. науч. тр. Эдиториал УРСС, 2001. С. 147.
- 7. *Смоленская Е.О.* Метод моделирования открытых архитектурных пространств в городской среде : автореф. дис. ...канд. архит. 2004.
  - 10. Анхейм Р. Искусство и визуальное восприятие. М.: Архитектура-С, 2007.
- $11.\$ Азизян И.А. Рождение диалогизма сознания XX века // Вопросы теории архитектуры. Архитектурное сознание XX—XXI веков: разломы и переходы : сб. науч. тр. Эдиториал УРСС, 2001.
  - 12. Гоголь Н.В. Об архитектуре нынешнего времени // Полн. собр. соч. М., 1952. Т. 8. С. 71—72.

© Иванова Н.В., Тюкова (Тур) И.Н., 2009

УДК 504.5:662.76

#### Г.А. Булычев, В.И. Воробьев, Ф.Г. Булычев

# ГИПОТЕЗА ЛОКАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ОПАСНОСТЕЙ (К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ СНИЖЕНИЯ ГАЗОВОЙ ОПАСНОСТИ)

Исследовано формирование локальных вихревых токов атмосферных частиц на примере газовых потоков на Нижнем Поволжье, в частности над Волгоградом. Выражена математическая взаимосвязь поведения летучих частиц и скоплений выбросов в форме уравнений закона сохранения массы и энергии, закона количества движения и закона парусности частиц, притягивания и взаимоотталкивания. Сделан вывод о наибольшем притяжении выбросов к земле при большей разности температур и масс воздушных слоев.

К лючевые с лова: газовые выбросы; защита атмосферы; техногенные источники загрязнения окружающей среды.

The authors studied the formation of local vortex currents of atmospheric particles by the example of gas flows in the Lower Volga region, in particular above Volgograd. The mathematical interrelation of volatile fractions behaviour and emission accumulations is expressed in the form of the equations of mass and energy conservation law, law of motion amount and the law of particles windage, attractiveness and interrepulsion. The authors draw a conclusion on the maximum attractiveness of emissions to the Earth at greater difference of temperatures and masses of air layers.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : gas emissions; atmosphere protection; man-caused sources of environmental pollution.

Разведка, добыча и реализация природного газа и нефти сопровождается случайными и организованными сбросами газов.

Во время стравливания газа при испытаниях скважин, продувке технологических трубопроводов, пусконаладочных, аварийных и ремонтных работах, выхлопах подвижных транспортных средств и т.п. все выбросы считаются эпизодическими, имеют кратковременный, залповый, технологический характер, т.к. источники функционируют не постоянно и не одновременно. Места сброса могут быть случайными и необорудованными свечой или факелом, т.е. выпуск вредных газов ведется в приземные слои атмосферы. В то же время, изменяя свою плотность и динамику в связи с колебаниями температуры и окружающего давления, газовые потоки и попутные механические частицы находятся в атмосфере всегда в сложном движении, по любым направлениям. Это давно и убедительно подтверждается наблюдениями за природными атмосферными явлениями, движением искусственных летательных устройств, летающих живых существ и легких механических частиц.

В период эксплуатации нефтегазовых объектов газы допускаются только через специальные устройства: свечи, факелы, сборные трубопроводы низконапорных газов и «хвостовые» сбросы предохранительных клапанов организованным и постоянным способом до 30 м.

При заводской переработке нефти, газа и углей тепловых станций сбросы «хвостовых» газов осуществляются на большую высоту — снижается местный ущерб природе, но увеличивается разброс вредных продуктов.

Сложные газы деятельности природы и гниения отбросов могут появляться в различных местах, их количество увеличивается с увеличением населения и энергопотребления планеты.

Появление газов в атмосфере может быть в виде высоконапорной струи, разовых выхлопов или легкорассеиваемого облака.

В любом случае кажется, что вредные выбросы в атмосфере разносятся ветром самым причудливым образом [5]. Фактически же газы могут не только смешиваться с воздухом, но и долго оставаться обособленным облаком. Их дальнейшее движение реагирует на разность скоростей потоков, давления, температур слоев по высоте, конденсацию, испарение и т.п. При этом происходит захватывание частиц и целых включений силами электромагнитного притяжения, эжектирования и коагуляции.

Таким образом, имеем комплекс сложнейших явлений со средствами разнообразного переменного состава и свойств, весьма непредсказуемого легковесного состояния и направления перемещения, многообразия скоростей и ускорений, падений, подъема, взаимного сближения и разделений.

Газовые потоки на Нижнем Поволжье, в частности над Волгоградом, эскизно показаны на рисунке.



Возможные локальные вихревые токи атмосферных частиц над г. Волгоградом

Местные продукты деятельности промышленно-бытовых объектов и переработки выбросов и верхние газовоздушные потоки могут в результате притягивать друг друга, проявлять свое негативное действие там, где это не ожидалось, и приводить к болезни и гибели растительной живой природы.

Эти явления могут описываться законами термогазодинамики, гидравлики, электромеханики и т.п.

Например, математическая взаимосвязь летучих частиц и скоплений может быть записана в форме уравнений закона сохранения массы и энергии, закона количества движения и закона парусности частиц, притягивания и взаимоотталкивания [1-4].

Частичка газа, жидкости или пыли парит в «спокойных» слоях атмосферы с расчетными параметрами, которые можно определить из уравнений сохранения энергии. Здесь частица опускается в нижнее положение под воздей-

ствием собственной массы, а поднимается в верхние слои воздуха за счет его восходящих потоков [1].

$$G_r = k \frac{F_r \rho_B V_B^2}{2q}, \qquad (1)$$

где  $G_r$  — масса частицы;  $F_r$  — площадь наибольшего поперечного сечения частицы;  $\rho_{\rm B}$  — плотность воздуха;  $V_{\rm B}$  — скорость движения воздуха; k — коэффициент сопротивления движению, который характеризует баллистические качества частицы; q — ускорение силы тяжести.

Так как в природе движение частиц газов в массиве воздуха имеет в основном объемный характер, то и уравнение их совместных потоков усложняется.

Уравнение количества движения потоков газа, воздуха и смеси при совместном эжектировании (см. рис.)

$$F_{c}\rho_{c}V_{c}^{2} - F_{R}\rho_{R}V_{R}^{2} - F_{r}\rho_{r}V_{r}^{2} = F_{r}P_{r} + F_{R}P_{R} - F_{c}P_{c},$$
 (2)

где  $F_{\rm B}$ ,  $\rho_{\rm B}$ ,  $P_{\rm B}$  и  $V_{\rm B}$  — площадь сечения, плотность, давление (энергия) и скорость движения потока воздуха соответственно;  $F_{\rm r}$ ,  $\rho_{\rm r}$ ,  $P_{\rm r}$  и  $V_{\rm r}$  — площадь сечения, плотность, давление и скорость движения потока газа соответственно;  $F_{\rm c}$ ,  $\rho_{\rm c}$ ,  $P_{\rm c}$  и  $V_{\rm c}$  — площадь сечения, плотность, давление и скорость движения потока смеси соответственно.

После сложных математических преобразований имеем уравнение массового движения потоков

$$\frac{F_{\rm c}V_{\rm c}\rho_{\rm c}}{F_{\rm R}V_{\rm R}\rho_{\rm R}} = \frac{G_{\rm r}}{G_{\rm R}} + 1,\tag{3}$$

что при условии  $\frac{G_{_{\Gamma}}}{G_{_{\mathrm{B}}}} \! = \! U_{_{_{_{}}}}$  дает, с учетом температур,

$$U = \frac{T_{\rm B} - T_{\rm c}}{T_{\rm c} - T_{\rm r}} \,. \tag{4}$$

Главное уравнение газовых потоков в атмосфере

$$\frac{F_{\rm c}V_{\rm c}\rho_{\rm c}}{F_{\rm B}V_{\rm B}\rho_{\rm B}} = \frac{T_{\rm B} - T_{\rm c}}{T_{\rm c} - T_{\rm r}} + 1. \tag{5}$$

Отсюда следует и частный вывод, что наибольшее притяжение выбросов к земле следует ожидать при большей разнице температур и масс воздушных слоев.

В результате многовариантных положений отдельных частиц в воздушных слоях в итоге они все равно опускаются на землю. Так и массы вредных выбросов все равно оседают на поверхность земли, наращивая плодородные слои, а иногда и отравляя все живое. Не дожидаясь результатов дальнейших исследований, опережая их блуждания в лабиринтах проб и ошибок, надо

срочно использовать уже имеющиеся инновационные наработки, которые способны если уж не исключить вредные факторы в атмосфере, то хотя бы существенно снизить вредные выбросы газов в цепи скважина — промысловые и транспортные системы — заводы — частные и массовые потребители углеводородов. И это не за счет количества и высоты дымовых труб, а благодаря более совершенной очистке «хвостовых» выбросов в результате применения безотходных технологий.

Из приведенного следует гипотеза экстремального появления источников отравления — суммирования и сложного взаимодействия газовых выбросов от местных и дальних производителей, вызывающего неожиданные проявления газовоздушных потоков, в том числе и ядовитых.

#### Выводы

- 1. Рост газовых выбросов в атмосферу может вызывать аномальные явления с локальными осложнениями в природе.
- 2. Снижение техногенных опасностей требует более полного изучения экстремальных проявлений газов различных источников.

#### БИЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Булычев Г.А.* Роторный отсекатель потока // Газовое дело. М. : ВНИИОЭНГ, 1971. С. 16—18.
- 2. *Булычев Г.А., Михальков П.В.* Способ исследования газоконденсатных скважин. А.С. СССР № 112825, 07.11.84. Бюл. № 41.
- 3. *Булычев Г.А.* Подготовка сероводородосодержащего газа // Применение эжектирования при эксплуатации нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 1989. С. 116.
- 4. Повышение безопасности нефтегазового дела / Г.А. Булычев, Ф.Г. Булычев, Н.Г. Кафидов, Ф.И. Шейкин // Промышленная безопасность. 2003. № 3.
- 5. *Воробьев В.И*. Эколого-градостроительные основы расчета приземных концентраций газов. Волгоград: ВолгГАСУ, 2005. С. 63—71.

© Булычев Г.А., Воробьев В.И., Булычев Ф.Г., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09 УДК 502.3:504.5:061.5 (470.45)

#### Д.К. Князев, Н.В. Иванова

# ОБ ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКОМ БЛАГОПОЛУЧИИ ЗОН ОТДЫХА КАК ГЛАВНОЙ ЗАДАЧЕ ПЛАНИРОВКИ РЕКРЕАЦИОННЫХ ЗОН

Приведено обоснование приоритетности достижения эколого-гигиенического благополучия зон отдыха как главной задачи планировки рекреационных зон. Для условий Волгограда определены количественные и пространственные характеристики вредного влияния факторов, учитываемых автором в рекреационном проектировании. Установлены достоверные корреляционные связи здоровья взрослого, детского и подросткового населения административных районов Волгограда и уровней воздействия факторов рекреации.

Ключевые слова: рекреационные зоны; планировка территории; зоны отдыха.

The explanation of priority to achieve an ecosanitary wellbeing of recreational areas is given in the paper — as a major problem for planning recreational zones. The guantitative and spational characteristics of harmful effects of factors considered by the author in recreational planning have been determined for the conditions of Volgograd. The reliable correlations were specified between the health of adults, children and teens living in the administrative districts of Volgograd and the recreational exposure levels.

Key words: recreational zones; recreational areas; planning recreational zones.

Планировка комфортной рекреационной среды затрагивает решение множества эколого-гигиенических проблем, связанных с обеспечением территории природными ресурсами, созданием благоприятного микроклимата, сохранением факторов окружающей среды при рекреационном освоении территории, защитой зон отдыха от техногенного воздействия городов и промышленных центров и др. [1]. Каждый из этих факторов может оказывать существенное вредное влияние на здоровье человека, ухудшая в период отдыха его физиологическое и психологическое состояние, вступая в противоречие с основным предназначением в градостроительном проектировании рекреаций — созданием территориальной системы оздоровления населения, призванной компенсировать негативно сказывающиеся на самочувствии человека процессы производственной и бытовой среды. Игнорирование приоритетности достижения эколого-гигиенического благополучия зоны отдыха наряду с созданием ее архитектурно-художественного облика, рациональной планировочной структуры и поиском экономичного проекта многократно снижает качество рекреации и ликвидирует их основную функцию — оздоровление населения.

Для решения озвученной проблемы необходим комплексный подход к оценке качества рекреаций и эколого-гигиеническому обоснованию проектов их планировки. Ведь реализация одних градостроительных мер без глубокого анализа их эффективности или последствий во многих случаях приводит к ухудшению ситуации, а результаты натурных исследований сами по себе не могут являться основой для конкретных работ по улучшению качества зон отдыха [2].

С целью обоснования приоритетности достижения эколого-гигиенического благополучия зон отдыха как главной задачи планировки

рекреационных зон всех территориальных уровней идентифицированы существенные факторы рекреации для условий Волгоградской области, которые рассмотрены во взаимосвязи с заболеваемостью взрослого, детского и подросткового населения административных районов Волгограда (за период 2005—2007 гг.). Влияние оценивалось по степени корреляционной зависимости r между уровнем воздействия фактора рекреации и показателем заболеваемости (на 100 тыс. населения соответствующего возрастного контингента). Аналогия между эколого-гигиеническим состоянием рекреаций и селитебных территорий в данном случае, по мнению автора, корректна, так как, во-первых, предложенные к учету факторы рекреации являются существенными параметрами условий проживания населения; во-вторых, большинство рекреаций Волгограда территориально расположены в пределах селитебных территорий, а следовательно, испытывают равное с ними воздействие.

В анализе исследовалась связь здоровья с долей озелененных территорий Волгограда насаждениями общего пользования и садово-паркового строительства; долей территорий, подверженных шумовому загрязнению от автотранспорта; долей территорий, загрязненных окисью углерода от автотранспорта; долей территорий с загрязнением атмосферы выбросами промышленных предприятий (ОНД-86); концентрацией тяжелых металлов в почве (Zn, Cu, Pb, Cd). Границами зон повышенных шумов, загрязнения окисью углерода от автотранспорта, химического загрязнения атмосферы выбросами предприятий являлись изолинии с нормативными значениями факторов воздействия (60 дБа, 1 ПДК для соответствующих химических примесей). Границы определены расчетным методом и подтверждены натурными замерами.

Зелеными насаждениями общего пользования и садово-паркового строительства в наибольшей степени обеспечен Центральный район Волгограда (72 % исследуемой территории). Остальные районы имеют в своей планировочной структуре до 30 % озелененных территорий. По шумовому воздействию лидируют Центральный (9 % исследуемой территории) и Красноармейский (7 %) районы. Загрязнение выбросами автотранспорта в большей степени распространилось в Центральном (23 % исследуемой территории) и Ворошиловском (9 %) районах Волгограда. Концентрации тяжелых металлов в почве исследуемых районов не превышают ПДК (ОДК), однако для некоторых территорий установлены зависимости концентрации от расстояния от источника выбросов (r = -0.99, p = 0.05).

Результаты корреляционного анализа для существующей экологогигиенической ситуации селитебных территорий Волгограда выявили взаимосвязь:

между площадью озелененных территорий и болезнями крови и кроветворных органов у детей ( $r=-0,4,\,p=0,05$ ); болезнями сердечно-сосудистой системы (ССС) у детей ( $r=-0,6,\,p=0,05$ ); болезнями, характеризующимися повышенным артериальным давлением у детей ( $r=-0,7,\,p=0,05$ ) (статистически достоверное значение r=-0,4);

площадью территорий, загрязненных окисью углерода (в концентрациях 1 ПДК и более) и заболеваниями эндокринной системы у детей (r=0.6, p=0.05) и подростков (r=0.6, p=0.05); заболеваемостью астмой у подростков

(r = 0.7, p = 0.05); болезнями органов пищеварения детского (r = 0.8, p = 0.05) и подросткового (r = 0.8, p = 0.05) населения (статистически достоверное значение r = 0.4);

площадью территорий с шумовым дискомфортом (с уровнем звука 60 дБа и более) и болезнями, характеризующимися повышенным артериальным давлением у взрослых (r=0.6, p=0.05); болезнями нервной системы у детей (r=0.6, p=0.05); болезнями органов пищеварения у детей (r=0.6, p=0.05) и подростков (r=0.5, p=0.05); болезнями эндокринной системы у подростков (r=0.4, p=0.05) (статистически достоверное значение r=0.4);

концентрацией тяжелых металлов с различными заболеваниями: Zn — корреляция меньше статистически достоверной величины  $(r=0,7,\,p=0,05)$ ; Cu — с болезнями кожи и подкожной клетчатки у детей  $(r=0,7,\,p=0,05)$ ; Pb — с болезнями кожи и подкожной клетчатки у подростков  $(r=0,7,\,p=0,05)$ , болезнями эндокринной системы у взрослых  $(r=0,8,\,p=0,05)$  (статистически достоверное значение r=0,7); Cd — с болезнями эндокринной системы у детей  $(r=0,8,\,p=0,05)$  (статистически достоверное значение r=0,7);

площадью территорий с загрязнением атмосферы выбросами промышленности и заболеваемостью взрослого населения: общей заболеваемостью  $(r=0,7,\ p=0,05);$  болезнями органов дыхания  $(r=0,8,\ p=0,05);$  болезнями сердечно-сосудистой системы (ССС)  $(r=0,6,\ p=0,05);$  болезнями эндокринной системы  $(r=0,6,\ p=0,05);$  заболеваемостью бронхитом хроническим  $(r=0,8,\ p=0,05)$  (статистически достоверное значение r=0,4).

Дополнительно проанализированы численность и заболеваемость населения крупных промышленных городов (Волгоград, Волжский) и остальных населенных пунктов. В результате установлено непропорциональное соотношение численности населения (51,1 %) и заболеваемости (62,2 %) исследуемых городов, что в целом характеризует урбанизированные территории как менее благополучные с эколого-гигиенической точки зрения для организации рекреационной деятельности.

Таким образом, проведенные исследования и выявленные зависимости статистически достоверно подтверждают влияние на здоровье человека факторов, учитываемых автором в рекреационном проектировании на территории Волгоградской области, а следовательно, обосновывают необходимость проведения предварительных защитных и оздоровительных мероприятий при разработке проектов планировки рекреационных зон, испытывающих вредное воздействие.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Маслов, Н.В. Градостроительная экология. М.: Высшая школа, 2002. 284 с.
- 2. Суздалева, А.А. Инженерно-экологическое обустройство и пути повышения рекреационного потенциала малых городских водных объектов : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 03.00.16. М., 2005. 24 с.

© Князев Д.К., Иванова Н.В., 2009

УДК 502.175:711.43

#### Ю.П. Иванова, Л.С. Полковникова

#### ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СОВРЕМЕННОГО МЕГАПОЛИСА

Рассматриваются вопросы экологической безопасности исторических центров современных мегаполисов. Дана оценка вредных выбросов автотранспорта и влияние газозащитных зеленых зон на экологию мегаполиса. Предложена методика подбора растительности при реконструкции скверов Волгограда, экологической оптимизации дорожно-транспортной сети.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вредные выбросы автотранспорта; оптимизация дорожнотранспортной сети; зеленые зоны города.

The author considers the issues of ecological safety of modern megapolises' historical centres. The evaluation of vehicle harmful emissions and the influence of gas-shielded green areas on megapolis ecology are given. The author suggests a method for the selection of vegetation in the process of green squares reconstruction in Volgograd, as well as for ecological optimization of road transport network.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s:$  vehicle harmful emissions; optimization of road transport network; urban green areas.

Проблемы зеленой экологии исторических центров современных мегаполисов весьма актуальны и многогранны, автомобилизация поглотила города, сделала их практически непригодными для комфортного проживания. Промышленная экология, перегруженная дорожно-транспортная сеть и газозащитные зеленые зоны мегаполиса Волгограда, давно требующие капитального ремонта и реконструкции древесно-кустарниковой растительности, обеспечили городу-герою твердое место в десятке городов России с критической экологической ситуацией.

Бульвар из пяти прекрасных скверов в исторической части проспекта В.И. Ленина давно не является зоной комфортного отдыха горожан и гостей Волгограда, задыхающихся от выхлопных газов (до 15 вредных компонентов) и акустического шума. Монументальная жилая застройка в центре города — это искусственное ущелье вокруг главной магистрали с ее автомобильными пробками, и жильцы практически не пользуются балконами, не открывают окон в жарком климате мегаполиса Юга России.

Легкие города — зеленые насаждения: деревья, кустарники, травяной покров — важнейшая составляющая ландшафта, выполняющая санитарногигиенические и многогранные психофизиологические функции. Только зеленый лист ассимилирует углекислоту и продуцирует кислород — зелень основа жизни на Земле. Растительность мегаполисов осаждает пыль, газообразные химические вещества и аэрозоли, значительно снижает негативное действие радионуклидов, успокаивает (стабилизирует) центральную нервную систему человека. Установлено, что индивидуум вне окружающей природной среды сразу чувствует себя одиноким, незащищенным от палящих лучей солнца, солнечной радиации, от перегревного климата, типичного для Волгограда, расположенного в зоне полупустынь [1, 2]. Зелень является неотъем-

лемой частью экологической емкости любой селитебной территории, проживание в полностью антропогенной среде смертельно для человечества [2].

Доказано, что влияние окружающей человека антропогенной, техногенной среды резко ослабевает с увеличением массы зеленых насаждений [2, 3]. Нет ни одного проекта застройки или реконструкции без рассчитанного коэффициента озеленения, который нормируется достаточно строго. Сегодня удивление вызывает бурное строительство в центре Волгограда общественных зданий, жилых домов прямо во дворах сложившейся застройки при практически полном уничтожении зеленых насаждений. Какая уж тут зеленая экология?!

Цель и задачи науки, экологической безопасности в современном мегаполисе — значительно снизить негативное влияние антропогенной, техногенной среды на горожан. Современные технологии строительства и реконструкции зеленых насаждений предполагают наличие и сохранение в эксплуатации неизменного объема фотосинтезирующей поверхности листвы
деревьев и кустарников, трав и цветов, заполняющих экологическую емкость
исследуемой территории. Известно, что городские зеленые насаждения, защищая природную среду и население, сами постоянно болеют и гибнут [4].
Ускоренное биологическое старение (усыхание) зеленых насаждений следует
учитывать в программах озеленения города. К сожалению, в уникальном городе-герое Волгограде отсутствует комплексная программа строительства и
реконструкции зеленых насаждений.

Удельный вес озелененных территорий различного назначения в черте города не может быть менее 40 % (коэффициент озеленения — 0,4), а в жилом микрорайоне — менее 23 %, что далеко не всегда соблюдается в Волгограде. Омолаживающая обрезка деревьев может осуществляться согласно принятым нормам 1-2 раза за жизнь растения, так как ежегодная обрезка ведет к иссущению и гибели особи (по А.Н. Семенютиной и В.В. Кравцову). В парках, скверах площадь озеленения должна быть не менее 70 %, а на бульваре проспекта В.И. Ленина она составляет 40...50 %. Проблема существует, и ее надо незамедлительно решать, т.к. дерево растет 10 лет, прежде чем начнет эффективно работать на экологическую безопасность [5]. Установлено, что в условиях Волгограда интенсивная обрезка больших деревьев сильно ослабляет их защитные свойства, неизбежно ведет к развитию вредителей, грибковых и бактериальных заболеваний. Таким образом, массовая обрезка деревьев в Волгограде значительно уменьшает экологическую емкость градостроительной территории, делает город непривлекательным даже в летнее время.

Бульвар из пяти скверов от Предмостной до площади В.И. Ленина в исторической части Волгограда, сформировавшийся после Великой Отечественной войны, — это сложное сочетание транспортных, пешеходных и экологических проблем. Зеленая экология здесь — доминирующий фактор, и ее оптимизация — проблема весьма актуальная и требующая комплексного решения по современным принципам организации экополисов.

Сложившаяся в центре мегаполиса планировка скверов среди высокоэтажной жилой застройки, организация транспортных и пешеходных потоков давно не соответствуют современным требованиям градостроительства, экологической и технической безопасности.

Центр Волгограда сегодня — это «котел-ущелье», заполненный выхлопными газами автотранспорта на фоне общей загазованности атмосферного воздуха мощным индустриальным комплексом. Негативная критическая нагрузка на городскую природную среду ежегодно увеличивается, причем вклад автотранспорта уже превысил 70 %, или более 270 тыс. т, в год вредных и опасных веществ 200 наименований! Причин этого печального положения много: постоянно растущее количество автотранспортных средств (ежегодный прирост только легковых автомобилей — 1000 ед.); их неудовлетворительное техническое состояние; низкокачественное топливо; низкое качество дорожного полотна и многое другое. Напряженность (интенсивность) транспортных потоков вдоль бульвара в центре города (Предмостная площадь — площадь В.И. Ленина) — 2500 авт./ч. Пешеходные потоки на бульваре сегодня — это социопсихологическая проблема российской ментальности: только один пример: весной 2008 г. газоны скверов покрылись сочной зеленой травой, но тут же появились тропинки благодаря любителям ходить напрямую через скверы.

Проблематика зеленой экологии современного мегаполиса весьма многогранна: начиная от планировочной организации скверов, бульваров через сложную науку дендрологию к сложившимся связям с транспортными и пешеходными потоками. Центр города-героя Волгограда, этой военной твердыни на Волге, должен иметь такое зеленое убранство, чтобы подчеркнуть пафосность застройки с обилием памятников великой битве, а также малых форм и других атрибутов типичного южного города. Однако зеленые насаждения центрального бульвара города во многом случайные, высаженные в 50—60-х гг. прошлого века по принципу «из того, что было», сегодня весьма слабо работают на эстетический облик главной зоны отдыха волгоградцев, не обеспечивают их надежной защиты от шума и огромного количества выхлопных газов автотранспорта. В городе, расположенном в зоне полупустынь, содержание, выхаживание всякой зелени тоже проблема. Для Волгограда это устройство на травяном покрове скверов неглубоких (60...70 см) плескательниц, получающих воду (питьевую) от слива питьевых фонтанчиков. Вода плескательниц постоянно очищается, дренируя в ливневую канализацию вдоль проезжей части бульвара, или накапливается в закрытой заглубленной емкости для капельного полива и орошения цветов, деревьев и кустарников.

Есть простое эффективное решение замены практически непрозрачного высокого чугунного ограждения бульвара экологической новацией. Следует изготовить железобетонные ящики для цветов, поглощающих выхлопные газы, на дне которых проложить перфорированные трубы для капельного полива. Наружная стенка каждого цветочного ящика может иметь объемную символику Сталинградской битвы и пропаганду мирных свершений уникального города. Внутренние стенки ящиков, обращенные в скверы, должны иметь шумогасящие экраны, покрытия.

Защиту жилых домов на проспекте В.И. Ленина осуществляет зеленая зона бульвара. Здесь идет вялотекущая реконструкция старых деревьев, подсаживаемых почему-то третьим рядом — через 10 лет получится что-то вроде перелеска вместо регулярных посадок. Кроме того, учащенная посадка деревьев, а не кустарника создаст и условия для правонарушений, снизит шу-

мозащиту отдыхающих в скверах горожан, селитебной зоны от выхлопных газов, т.к. взрослое дерево начинает «работать» на газопоглощение лишь при высоте в 10 м с развитой кроной. Решающее значение имеет и дендрологический состав газозащитных зеленых зон мегаполисов. Так, ель, пихта, клен обыкновенный имеют коэффициент поглощения вредных газов до 1,2; сосна, можжевельник, липа декоративная — до 2,5; тополь раскидистый, канадский (мужская особь) — до 4-5; дуб местной селекции, лиственница — до 6,5. Так может быть, бульвар исторической части Волгограда должен стать через 20 лет дубовой рощей с нежными березками и голубыми елями?! Город-герой Волгоград, безусловно, должен стать экологическим оазисом, зеленым красавцем в зоне полупустынь!

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Максюта Н.К.*, *Галушкин В.И.*, *Полковников Ю.Ф.* Экологические проблемы устойчивого развития промышленных мегаполисов Нижневолжского региона // Матер. Шк.-сем. «Промэкология». Ростов-на-Дону: РГСУ; Абрау-Дюрсо, 1998. С. 4.
- 2. Полковников Ю.Ф. Создание экологически безопасной технологии прокладки инженерных сетей в строительстве : дис. ...д-ра техн. наук. Нижний Новгород : ННГСУ, 2000. С. 325.
- 3. Безопасность жизнедеятельности, XXI век : сб. материалов научного симпозиума. Волгоград : Волг $\Gamma$ ACV, 2001. С. 262.
  - 4. Российская архитектурно-строительная энциклопедия. М.: Альфа, 1996. С. 336.
- 5. Комплексная транспортная схема г. Волгограда на период 2007—2025 года : научтехн. отчет / Ю.Ф. Полковников, Ю.П. Иванова. 2007. 152 с.

© Иванова Ю.П., Полковникова Л.С., 2009

Поступила в редакцию 19.03.09

360 TIME BOSH 7 (05). GCP.: GTP BO W APAVIT. 2005. BBIH. 14 (05)

### НАШИ АВТОРЫ

Аверкова Светлана Анатольевна

Азаров Валерий Николаевич

Аржанухина Софья Петровна

Богомолов Александр Николаевич

Булычев Георгий Андрианович

Булычев Феликс Георгиевич Воробьев Владимир Иванович

Габова Виктория Викторовна

Галишникова Вера Владимировна

Гвоздков Александр Николаевич

Гвоздков Михаил Александрович

Голованчиков Александр Борисович

Голяк Сергей Алексеевич

Гопций Екатерина Петровна

Диденко Василий Григорьевич

Долганов Алексей Петрович

Жиделёв Андрей Викторович

Иванова Нина Васильевна

Иванова Юлия Павловна

Игнатьев Александр Владимирович

Касьяненко Наталия Сергеевна

Клигман Евгений Петрович

Князев Дмитрий Константинович Ковалев Николай Сергеевич

Ковылин Андрей Васильевич

Кочетков Андрей Викторович

Лукьянсков Александр Станиславович Мамедов Нурмамед Яшар оглы

Масляев Александр Викторович

Матвеенко Валерий Павлович

Махова Светлана Ивановна

Мельникова Татьяна Валерьевна

Мензелинцева Надежда Васильевна

аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ, т. 8-8442-96-98-87

заслуженный эколог РФ, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности в техносфере ВолгГАСУ, р. т. 8-8442-96-98-07 аспирант, инженер Саратовского государственного технического университета soni 81 @mail ги

д-р техн. наук, проф., академический советник РААСН, академик РАЕ, член РОММГиф, ISSMGE, IGS, зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-99-54, banzaritcvn@mail.ru

канд. техн. наук, доцент кафедры нефтегазовых сооружений ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-99-22

архитектор, инженер ПТО ООО «Анкер-С», т. 8-8442-96-99-22

канд. техн. наук, доц., профессор кафедры экологического строительства и городского хозяйства, начальник УНИР ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-46 аспирант, инженер кафедры строительной механики ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-17

канд. техн. наук, Ph. D., доцент, проф. кафедры строительной механики, зав. кафедрой компьютерного инжиниринга и международных образовательных программ ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-97-46-90

канд. техн. наук, доцент кафедры отопления, вентиляции и экологической безопасности ВолгГАСУ, советник PAACH, angvo@mail.ru

региональный представитель в г. Волгограде ООО «Армстронг», m.gvozdkov@mail.ru

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Волгоградского государственного технического университета, р.т. 8-8442-23-26-03, pebg@vstu.ru

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой теплогазоснабжения, вентиляции, водоснабжения и водоотведения Магнитогорского государственного технического университета, т. 8-3519-29-85-08, pyatachkov@mail.ru

аспирант кафедры энергоснабжения и теплотехники ВолгГАСУ, т. 8-8442-96-98-86

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой отопления, вентиляции и экологической безопасности ВолгГАСУ, 8-8442-97-49-09

аспирант кафедры инженерной геологии и геоэкологии ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-99-14

канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотрудник Управления научных исследований и разработок, доц. кафедры прикладной математики и вычислительной техники ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-99-65

канд. архит., зав. кафедрой, проф. кафедры основ архитектурного проектирования, рисунка, живописи и скульптуры ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-44 аспирант кафедры организации и безопасности дорожного движения ВолгГАСУ, 8-8442-96-99-42

канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой прикладной математики и вычислительной техники ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-99-45

аспирант Ивановского государственного архитектурно-строительного университета, kasiyanenko@gmail.com

канд. техн. наук, доц., ст. научный сотрудник Института механики сплошных сред Уральского отделения РАН, kligman@icmm.ru, 8-342-237-84-10 аспирант кафедры градостроительства ВолгГАСУ, 8-8442-96-98-10

канд техн. наук, доц., профессор кафедры планировки и кадастра населенных мест Воронежского государственного аграрного университета им. К.Д. Глинки, 394087, Воронеж, Мичурина, 1, р.т. 8-4732-53-71-93

аспирант кафедры энергоснабжения и теплотехники ВолгГАСУ, т. 8-8442-96-98-86

д-р техн. наук, проф., академик Российской академии транспорта, профессор кафедры мостов Саратовского государственного технического университета, нач. отдела ФГУП «РосдорНИИ», г. Москва, м.т. 8-906-306-95-53, soni.81 @mail.ru

канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере ВолгГАСУ, р. т. 8-8442-96-98-07

канд. техн.наук, доц. кафедры систем газоснабжения и обеспечения микроклимата Азербайджанского архитектурно-строительного университета, nurmamed.mamedov@mites.az, p.т. (+99412)439-20-55

канд техн. наук, Научно-исследовательская сейсмологическая лаборатория ВолгГАСУ, 400074, Волгоград, Академическая, 1, р.т. 8-8442-97-49-64 академик РАН, д-р техн. наук, директор Института механики сплошных сред Уральского отделения РАН, mvp@icmm.ru, 8-342-237-84-61

канд. геол.-минерал. наук, доц. кафедры инженерной геологии и геоэкологии ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-99-14

инженер II категории отдела проектирования и мониторинга строительства скважин ООО «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть, аспирант кафедры отопления, вентиляции и экологической безопасности ВолгГАСУ, 8-8442-97-49-09 д-р техн. наук, проф., декан факультета теплоэнергоснабжения, зав. кафедрой инженерной графики, стандартизации и метрологии ВолгГАСУ, р. т. 8-8442-96-99-78

Морозов Дмитрий Сергеевич

Мусаелян Саркис Мовсесович
Нестратов Михаил Юрьевич
Новиков Владимир Сергеевич
Новиков Михаил Георгиевич
Олянский Юрий Иванович
Офрихтер Вадим Григорьевич

Петросян Арамаис Бахшиевич

Плеханова Лина Ильинична

Полковников Юрий Федорович

Полковникова Людмила Сергеевна

Пятачков Виктор Владимирович

Румянцева Варвара Евгеньевна

Самарская Юлия Геннадиевна Сиволобова Наталья Олеговна

Синяков Владимир Николаевич Смельцов Владимир Львович Соколов Олег Леонидович Соловьев Александр Владимирович Стадник Роман Александрович

Стефаненко Игорь Владимирович Тюкова (Тур) Ирина Николаевна Федосов Сергей Викторович Фокин Владимир Михайлович Фомин Дмитрий Павлович

Хрунов Владимир Андреевич

Цыганкова Ксения Васильевна

Чванов Андрей Владимирович Шиян Станислав Иванович

Шубин Алексей Михайлович

Шекочихина Евгения Викторовна

Юшкова Наталия Геннадиевна

Янушкина Юлия Владимировна

соискатель, ст. преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Дальневосточного государственного технического университета (ДВПИ им. В.В. Куйбышева), р.т. 8-4232-45-17-90, fdp2@yandex.ru

д-р техн. наук, профессор кафедры гидротехнических и земельных сооружений ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-87

канд. техн. наук, доц. кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-87

инженер, аспирант кафедры организации и безопасности движения ВолгГАСУ, моб. тел. 8-906-403-59-39

зам. руководителя Управления Росприроднадзора по Волгоградской области, р.т. 8-8442-97-08-96, 8-8442-93-16-87 (fax)

доктор техн. наук, проф. кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-87

канд. техн. наук, Пермский государственный технический университет, om@perm.raid.ru

соискатель кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ, т. 8-8442-96-98-87

инженер, учебный мастер кафедры энергоснабжения и теплотехники ВолгГАСУ, р. т. 8-8442-96-98-86

академик Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы, чл.-кор. Жилищно-коммунальной и Экологической академий России, почетный работник высшей школы, вице-президент Межрегиональной ассоциации специалистов по охране труда, промышленной безопасности и экологии, председатель науч.-техн. совета «Охрана труда и безопасность жизнедеятельности» г. Волгограда, д-р техн. наук, профессор кафедры организации и безопасности движения ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-75

ученый секретарь научно-технического совета «Охрана труда и БЖД» г. Волгограда, член АСОТ, доцент кафедры организации и безопасности движения ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-99-42

аспирант кафедры теплогазоснабжения, вентиляции, водоснабжения и водоотведения Магнитогорского государственного технического университета. pvatachkov@mail.ru

канд. техн. наук, доц., доцент кафедры химии и охраны окружающей среды Ивановского государственного архитектурно-строительного университета, inf@ioasu.ru

инженер «Волгоградгражданстрой», ysamarskaya@yandex.ru

доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Волгоградского государственного технического университета, р.т. 8-8442-23-26-03, pebg@vstu.ru

д-р геол.-минерал. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной геологии и геоэкологии ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-99-14

соискатель, инженер кафедры химии и охраны окружающей среды Ивановского государственного архитектурно-строительного университета, inf@igasu.ru

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой сопротивления материалов Вологодского государственного технического университета, 160000, Вологда, Ленина, 15 аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ, т. 8-8442-96-98-87

инженер, аспирант кафедры строительства дорог и организации движения Саратовского государственного технического университета, т. 8-927-103-68-98. sstu office@sstu.ru

канд. техн. наук, первый заместитель главы администрации Волгоградской области, р.т. 8-8442-30-76-00

аспирант ВолгГАСУ, ст. преподаватель кафедры ДПИ Волгоградского государственного института искусств и культуры, A\_gizmo@mail.ru

д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РААСН, ректор Ивановского государственного архитектурно-строительного университета, inf@igasu.ru

д-р техн. наук, проф., зав кафедрой энергоснабжения и теплотехники ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-86 ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Дальневосточного

государственного технического университета (ДВПИ им. В.В. Куйбышева), р.т. 8-4232-45-17-90, fdp2@yandex.ru

канд. техн. наук, инженер кафедры химии и охраны окружающей среды Ивановского государственного архитектурно-строительного университета, inf@igasu.ru аспирант, ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Дальневосточного государственного технического университета (ДВПИ им. В.В. Куйбышева), р.т. 8-4232-45-17-90, fdp2@yandex.ru

инженер ФГУП «РосдорНИИ», г. Москва, rosdornii2006@mail.ru

канд. техн. наук, соискатель кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ, т. 8-8442-96-98-87

канд. экон. наук, доц. кафедры экономики и управления проектами в строительстве BoлгГАСУ, al-shubin@yandex.ru

аспирант, ассистент кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-87

канд. архит., доц., доцент кафедры архитектуры жилых и общественных зданий ВолгГАСУ, р.т. 8-8442-96-98-59

чл. Союза архитекторов России, ст. преподаватель кафедры архитектуры жилых и общественных зданий ВолгГАСУ, ianooshkina.yu@gmail.ru, т. 8-8442-96-98-59

**Примечание.** С авторами статей — аспирантами, докторантами и сотрудниками ВолгГАСУ — можно также связаться по **e-mail:** <u>postmaster@vgasu.ru</u> (в теме письма указать наименование кафедры, фамилию и инициалы адресата).

#### ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета» со второго полугодия 2007 г. временно выходит в одной серии «Строительство и архитектура», по 4 выпуска ежегодно\*.

Журнал включен 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 и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографические сведения о публикациях в журнале и пристатейные списки литературы представлены в <u>Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)</u> на сайте Научной электронной библиотеки www.elibrary.ru.

Требования к оформлению статей и сопроводительных материалов. 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 <u>русском и английском языках:</u> фамилия и инициалы автора, заглавие, аннотация (до 500 знаков), ключевые слова.

На отдельном листе помещаются сведения об авторах (фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звание, должность, место работы; наименование и код научной специальности (по Номенклатуре), по которой автор проводит диссертационное исследование; почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты для связи с редакцией и <u>публикации в журнале</u>); 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, ключевые слова, 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 (Cyr) № 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 редактор формул Microsoft MathType 5; 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 ТІГ или ВМР, графики и диаграммы, построенные в Microsoft Excel, дополнительно помещаются на электронный носитель отдельными файлами. Имя файла должно соответствовать наименованию или номеру рисунка в тексте статьи. Кроме того, иллострации обязательно присылаются распечатанными на отдельных листах формата А4 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 Ari и WinZin. 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 (Cyr) № 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 (Суг) № 9 (9 пунктов).

Авторы статей несут всю полноту ответственности за содержание статей и за сам факт их публикации. Редакция журнала не несет никакой ответственности перед авторами и/или третьими лицами и организациями за возможный ущерб, нанесенный публикацией статьи. Редакция исходит из того, что, в соот-

<sup>\*</sup> Выпуск серий «Технические науки» и «Естественные науки» временно приостановлен; выпуск серии «Гуманитарные науки» прекращен в связи с основанием в ВолгГАСУ нового журнала «Социология города» (информация по тел. 8-8442-96-99-25, ал. ред. Б.А. Навроцкий.

ветствии с законодательством в части авторского права, автор, направляя статью в редакцию, полностью соглашается с условиями редакции и, следовательно, только сам лично несет ответственность за использование в тексте статьи материалов третьих лиц и соблюдение их авторских прав. Все права автора и вся полнота его ответственности сохраняются и после публикации статьи в журнале.

Порядок рецензирования. Статьи обсуждаются редколлегией, рецензии, поступившие в сопроводительных материалах, учитываются. В спорных случаях статьи могут быть направлены редакцией на дополнительную внутреннюю или внешнюю экспертизу (рецензирование) и опубликованы только при положительном заключении. Копия заключения предоставляется автору.

Статьи, не отвечающие изложенным требованиям, редколлегией не принимаются. Материалы, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются.

Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста. Корректура статей авторам не предоставляется. Согласование редакционных и авторских изменений текста статьи (переписка, тел. переговоры) производится за счет автора.

Гонорар за опубликование статьи не выплачивается, плата за публикацию статей с авторов не взимается.

КОМПЛЕКТОВАНИЕ ОЧЕРЕДНОГО НОМЕРА ЗАВЕРШАЕТСЯ ЗА 3 МЕСЯЦА ДО ПЛАНИРУЕМОГО ВЫХОДА В СВЕТ.

Примерный график выпуска серии «Строительство и архитектура» — март (прием статей до 1 декабря); июнь (прием статей до 1 марта); сентябрь (прием статей до 1 июня); декабрь (прием статей до 1 сентября).

ISSN 1815-4360. Серия «Строительство и архитектура»

Примерные тематические рубрики: 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. Гидравлика и инженерная гидрология. Технология и организация строительства. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельностью. Экологические проблемы градостроительства. Информационные технологии в строительстве и архитектуре. Научно-методический раздел. Организация высшего образования в области строительства и архитектуры. Методика преподавания дисциплин строительного и архитектурного направлений в вузе. Хроника.

Подробная информация о журнале представлена на сайте ВолгГАСУ **www.vgasu.ru**, в разделе **Подразде- ления** / **Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета** (сразу после подписания выпуска в печать публикуются титул и содержание; через месяц со дня выхода в свет публикуется полный текст выпуска).

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.

За консультацией 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: gorachevaoe@mail.ru.

#### Вниманию читателей и авторов!

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета» временно выходит в одной серии

«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА» (4 выпуска в год). Подписной индекс по каталогу «Пресса России» 85343, на Интернет-сайте агентства «Книга-Сервис» — E85343

(по электронному каталогу можно подписаться и на текущие номера). По вопросу приобретения ранее вышедших номеров журнала обращаться по тел. 8-(844-2)-96-98-46 к отв. секретарю редсовета В.И. Воробьеву

Продолжается прием статей в очередные выпуски

серий «Политематическая» и «Строительная информатика» электронного сетевого научно-технического журнала «ИНТЕРНЕТ-ВЕСТНИК ВолгГАСУ».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство Эл № ФС77-26286 от 17.11.06, ФГУП НТЦ «Информрегистр», свидетельство № 226 от 20.10.08 № гос. рег. 0420900065 (на 2009 г.), Международным центром ISSN, ISSN 1994-0351, включен в базу РИНЦ (www.elibrary.ru). Подробная информация на сайте журнала www.vestnik.vgasu.ru

«Интернет-вестник ВолгГАСУ» не является электронной версией печатного журнала. Оба журнала содержат оригинальные публикации.

#### Научное издание

#### ВЕСТНИК ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

Серия: Строительство и архитектура 2009. Вып. 14 (33)

Редактор О.Е. Горячева
Корректор М.Л. Песчаная
Перевод на английский язык Н.В. Бирюкова
Компьютерная правка и верстка О.Е. Горячева, О.В. Горячева
Компьютерный дизайн обложки О.Ю. Мелешин, И.А. Бондаренко
Информационно-библиографическое обслуживание выпуска Е.В. Хромова

Подписано в печать 21.05.09. Формат  $70 \times 108/16$ . Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Уч.-изд. л. 17,9. Усл. печ. л. 19,6. Тираж 500 экз. Заказ №

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» Редакционно-издательский отдел 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Отпечатано в ООО «Царицынская полиграфическая компания» 400117, г. Волгоград, б-р 30-летия Победы, 11а