

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Строительство.
Электротехника и химические технологии»**

Научный рецензируемый журнал

№ 1 (9), 2021

Тверь 2021

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. № 1 (9). 91 с.

Включает научные статьи, подготовленные на основе результатов исследований и экспериментальных разработок в области строительства, электротехники и химических наук, выполненных учеными и специалистами-практиками ведущих вузов и научно-исследовательских учреждений нашей страны и зарубежья. Представлены работы, соответствующие профилю издания по следующим научным отраслям: 05.23.00 Строительство и архитектура; 05.09.00 Электротехника; 05.17.00 Химическая технология.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: Эл № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

ISSN 2686-794X (онлайн)

**Вестник Тверского
государственного технического
университета. Серия
«Строительство. Электротехника
и химические технологии»**

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический
университет»

Адрес редакции

170026, г. Тверь,

наб. Афанасия Никитина, д. 22

Тел. редакции +7 (4822) 78-89-00

E-mail: common@tstu.tver.ru

Цена свободная

Дата выхода в свет 15.11.2021

Формат 60x84 1/8

Тираж 500 экз.

ISSN 2658-7459

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доц.

Заместители главного редактора:

Белов В.В. – д.т.н., проф.;

Луцик В.И. – д.х.н., проф.;

Макаров А.Н. – д.т.н., проф.

Ответственный секретарь

Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доц.

Редакционная коллегия:

Качанов А.Н. – д.т.н., проф.;

Коротких Д.Н. – д.т.н., проф.;

Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., проф.;

Лепешкин А.Р. – д.т.н.;

Матар П.Ю. – к.т.н., проф.;

Недосеко И.В. – д.т.н., проф.;

Никольский В.М. – д.х.н., проф.;

Строкова В.В. – проф. РАН, д.т.н.,
проф.;

Трещев А.А. – д.т.н., проф.;

Фишер Х.-Б. – д.-инженер;

Ясинская Н.Н. – к.т.н., доц.

**Vestnik of Tver State Technical
University. Series «Building.
Electrical engineering and chemical
technology»**

Founder and Publisher

Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education, Tver
State Technical University

Address

22, embankment of Afanasiy Nikitin,
170026, Tver, Russia

Tel. +7 (4822) 78-89-00

E-mail: common@tstu.tver.ru

Open price

Release Date

Format 60x84 1/8

Printing run 500 copies

ISSN 2658-7459

Editor-in-Chief

Gul'tyaev V.I. – d.t.s., Assoc. Prof.

Vice Editor-in-Chief

Belov V.V. – d.t.s., Prof.;

Lucik V.I. – d.c.s., Prof.;

Makarov A.N. – d.t.s., Prof.

Executive Secretary

Novichenkova T.B. – k.t.s., Assoc. Prof.

Editorial team

Kachanov A.N. – d.t.s., Prof.;

Korotkih D.N. – d.t.s., Prof.;

Kosivcov Y.Y. – d.t.s., Prof.;

Lepeshkin A.R. – d.t.s.;

Matar P.Y. – k.t.s., HDR, Prof.;

Nedoseko I.V. – d.t.s., Prof.;

Nikol'skij V.M. – d.c.s., Prof.;

Stroкова V.V. – prof. RAS., d.t.s.,
Prof.;

Treshchev A.A. – d.t.s., Prof.;

Fisher H.-B. – d.-engineer;

Yasinskaya N.N. – k.t.s., Assoc. Prof.

СОДЕРЖАНИЕ**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

Белов В.В., Куляев П.В., Артемьев А.А. Влияние гранулометрического состава на эффективность ультразвуковой обработки мелкозернистых бетонов.....	6
Матар П.Ю., Зехиль Ж.-Ф.Ж., Асаад Ж.Ж., Баркая Т.Р. Использование полипропиленовых волокон в бетоне, изготовленном с утилизированными заполнителями.....	14
Крылова В.В., Степанова Л.А. Обзор инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации и Китайской Народной Республики.....	24
Федоров В.В., Федоров М.В. Архитектурно-ландшафтная среда в экранной урбанистике.....	32
Черемных С.В. Решение задачи устойчивости при сложном нагружении для траекторий в виде окружностей и дуг окружностей в программе для ЭВМ.....	41

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Окунева В.В., Корнеев К.Б., Ковалева Ю.В. Моделирование цифровой автоматики подстанций для защиты межподстанционных линий.....	50
Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции.....	58
Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о центрах s -симметрии и c -симметрии плоской пластины.....	63

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Виноградова М.Г., Козлова Р.Р., Савельева Т.А. Энтальпия образования двухатомных спиртов. Численные расчеты и основные закономерности.....	71
Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Методы оценки загрязнения донных отложений тяжелыми металлами.....	79
Саврасов И.А. Образцы для испытаний на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ: химический анализ, средства измерения и материалы.....	86

CONTENTS**CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

<i>Belov V.V., Kulyaev P.V., Artemyev A.A.</i> Impact of granulometric composition on ultrasonic processing efficiency of fine-grained concrete.....	6
<i>Matar P.Y., Zéhil G.-P.G., Assaad J.J., Barkaya T.R.</i> Use of polypropylene fibers in concrete fabricated with recycled aggregates.....	14
<i>Krylova V.V., Stepanova L.A.</i> Overview of the spatial data infrastructure of the Russian Federation and the People's Republic of China.....	24
<i>Fedorov V.V., Fedorov M.V.</i> Architectural and landscape environment in urban planning screen.....	32
<i>Cheremnykh S.V.</i> Solving the problem of stability under complex loading for trajectories in the form of circles and arcs of circles in a computer program.....	41

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Okuneva V.V., Korneev K.B., Kovaleva Yu.V.</i> Simulation of digital automation of substations for protection of inter-substation lines.....	50
<i>Popov I.P.</i> Electromechanical flywheel with an artificial (capacitive) moment of inertia.....	58
<i>Shum A.I.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A.</i> A note on the centers of <i>s</i> -symmetry and <i>c</i> -symmetry of a flat plate.....	63

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Vinogradova M.G., Kozlova R.R., Savelyeva T.A.</i> The enthalpy of formation of diatomic alcohols. Numerical calculations and basic regularities.....	71
<i>Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispirian S.R.</i> Methods for estimating pollution of bottom sediments with heavy metals.....	79
<i>Savrasov I.A.</i> Test samples for computer-aided test system: chemical analysis, measurement tools and materials.....	86

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.539.216

**ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ***В.В. Белов, П.В. Куляев, А.А. Артемьев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Куляев П.В.,
Артемьев А.А., 2021

Аннотация. Ультразвуковая дефектоскопия широко используется в строительной отрасли для проведения неразрушающего контроля физико-механических характеристик бетона в конструкциях. В то же время ультразвуковая обработка бетонной смеси и свежееуложенного бетона может быть использована и для изменения структуры и свойств последнего. Актуальность темы напрямую связана с решением вопросов, касающихся экономии в строительстве, поскольку благодаря ультразвуковой обработке можно снизить затраты на дорогостоящие цементы в составе бетона.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, армирование на микроуровне, оптимальная гранулометрия, наиболее плотная упаковка частиц, программное моделирование упаковок.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-6-14

В строительной отрасли широкое применение получили ультразвуковые методы, используемые для проведения дефектоскопии и неразрушающего контроля физико-механических характеристик бетона в конструкциях. Ультразвуковая обработка бетонной смеси и свежееуложенного бетона может также применяться в целях модификации структуры и свойств [1, 2]. В акустическом ультразвуковом поле под влиянием волнового давления возникают очаги коагуляционного уплотнения цементного теста, и при слиянии его в сплошной слой вода вытесняется вместе со взвешенными в ней высокодисперсными фракциями цемента, образующимися в результате кавитационного разрушения крупных частиц. Кавитация активизирует силы внутреннего сцепления между частицами цемента и микрочастицами известняка, что способствует компактному пространственному взаиморасположению частиц твердой фазы и увеличению количества контактов между частицами – повышению координационного числа [2]. При этом следует ожидать и обратного эффекта – повышения эффективности самой ультразвуковой обработки, так как очевидно, что чем больше контактов между частицами и чем рациональнее их взаимное

распределение внутри исходной структуры, зависящее в том числе от гранулометрического состава минеральной части бетона, тем выше степень кавитационного схлопывания пузырьков внутри смеси и меньше дефектность структуры бетонной смеси и самого бетона. Кроме того, эффективность ультразвуковой обработки будет определяться и ее параметрами (режимом и временем).

На первом этапе работы производили оптимизацию зернового состава минеральной части мелкозернистого бетона (пескобетона), на котором проверяли влияние ультразвуковой обработки.

Чтобы заполнитель полностью выполнял отведенную ему роль твердого скелета мелкозернистого композита, необходимо распределить его частицы таким образом, чтобы более мелкие фракции располагались в промежутках между крупными частицами, не раздвигая их. Это возможно только при наличии в заполнителе в оптимальном количестве как минимум трех песчаных фракций, средние размеры которых должны соотноситься в определенной пропорции [3]. Данные по исходному грансоставу крупных песков, а также средней крупности показывают, что наиболее эффективным с точки зрения технологии и затрат на просеивание является разделение песка на фракции (с размерами частиц, мм: 0–0,5; 0,5–1,25; 1,25–3,2) и их смешение в оптимальном соотношении.

В данной работе определяли область соотношений указанных фракций песка, обеспечивающих наиболее плотную упаковку частиц заполнителя, как путем теоретических выкладок, так и экспериментальным способом, при этом критерием плотной упаковки служило максимальное значение насыпной плотности заполнителя. В расчетном способе использована физическая модель рассматриваемой смеси трех фракций и сделана попытка расчетным путем прийти к оптимальному гранулометрическому составу минеральной части.

Рассмотрение физических моделей упаковки сыпучих материалов удобно начинать с систем, составленных из геометрических тел шарообразной формы, поэтому ниже приведен расчет сухой сыпучей тернарной (т.е. состоящей из трех фракций) смеси, где частицы фракций приняты за шары. В процессе формирования сыпучих заполненных систем на основе нескольких фракций с различными диаметрами сфер фракция с максимальными размерами тел выбирается как скелетная, которой в первоочередном порядке условно заполняется единица объема сыпучей заполненной системы. Расчет составов сферозаполненных сыпучих систем произведен с учетом явлений раздвижки сфер сферами и заполнения межсферических пустот сферами меньших размеров. Объем монолитного материала в единице объема сферофракции равен 0,6, а объем пустот – 0,4.

Средние диаметры сфер для указанных выше трех фракций кварцевого песка, мм: $d_1 = 2,725$; $d_2 = 0,875$; $d_3 = 0,25$. Для приготовления 1 м³ состава тернарной сыпучей смеси расход указанных сферофракций определяется нижеследующим способом.

Устанавливают объемные коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ раздвижки сфер большого диаметра сферами меньших размеров и находят их произведение:

$$\alpha_1 = \left(1 + \frac{d_2}{d_1}\right)^3; \quad \alpha_2 = \left(1 + \frac{d_3}{d_1}\right)^3; \quad \alpha_3 = \left(1 + \frac{d_3}{d_2}\right)^3;$$

$$X_1 = \alpha_1\alpha_2; \quad X_2 = \alpha_2\alpha_3.$$

Расход каждой фракции в м³ определяется в последовательности:

$$V_1 = 1 \text{ м}^3 \cdot X_1^{-1}; V_2 = (X_1 - 0,6) \cdot (X_1 \cdot X_2)^{-1};$$

$$V_3 = (X_1 - 0,6) \cdot (X_2 - 0,6) \cdot (X_1 \cdot X_2)^{-1},$$

где V_1, V_2, V_3 – расход указанных фракций; X_1, X_2 – произведения коэффициентов раздвижки сфер большего диаметра сферами меньших размеров.

Объем монолитных сфер определяется по формуле

$$V_{\text{мон}} = V_{\text{нас}} - V_{\text{нас}} \cdot V_{\text{пус}},$$

где $V_{\text{нас}}$ – расход сферофракций, м³; $V_{\text{пус}}$ – объем пустот.

Окончательно насыпной объем сыпучей смеси трех фракций в м³ рассчитывается как

$$V_{\text{нас}} = V_{\text{мон1}} + V_{\text{мон2}} + V_{\text{мон3}} + V_3 \cdot V_{\text{пус}}.$$

На основе приведенного расчета получаем:

$$\alpha_1 = \left(1 + \frac{0,875}{2,725}\right)^3 = 2,306; \alpha_2 = \left(1 + \frac{0,25}{2,725}\right)^3 = 1,302; \alpha_3 = \left(1 + \frac{0,25}{0,875}\right)^3 = 2,126;$$

$$X_1 = 2,306 \cdot 1,302 = 3,002; X_2 = 1,302 \cdot 2,126 = 2,768; V_1 = 1 \cdot 3,002^{-1} = 0,333 \text{ м}^3;$$

$$V_2 = (3,002 - 0,6) \cdot (3,002 \cdot 2,768)^{-1} = 0,289 \text{ м}^3;$$

$$V_3 = (3,002 - 0,6) \cdot (2,768 - 0,6) \cdot (3,002 \cdot 2,768)^{-1} = 0,627 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{мон1}} = 0,333 - 0,333 \cdot 0,4 = 0,200 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{мон2}} = 0,289 - 0,289 \cdot 0,4 = 0,173 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{мон3}} = 0,627 - 0,627 \cdot 0,4 = 0,376 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{нас}} = 0,200 + 0,173 + 0,376 + 0,627 \cdot 0,4 = 1 \text{ м}^3.$$

Таким образом, рассчитан оптимальный гранулометрический состав, обеспечивающий максимальную упаковку зерен заполнителя: 26,7 % фракции 0–0,5 мм; 23,1 % фракции 0,5–1,25 мм; 50,2 % фракции 1,25–3,2 мм.

Для экспериментального подбора оптимального соотношения песчаных фракций в заполнителе мелкозернистого бетона был проведен нелинейный планированный эксперимент с одновременным варьированием содержания этих фракций в конкретных пределах (отношение фракции 0,5–1,25 мм к фракции 0–0,5 мм $X_1 = 0,67$ –4; отношение фракции 1,25–3,2 мм к фракции 0–0,5 мм $X_2 = 1,67$ –7) и измерением насыпной плотности полученных смесей в сухом состоянии. План эксперимента и полученные результаты приведены в таблице, а полученные по математическим моделям зависимости насыпной плотности заполнителя от его фракционного состава в виде линий равного уровня представлены на рис. 1.

Матрица планированного эксперимента и результаты определения насыпной плотности смесей в сухом состоянии

№	X_1	X_2	Насыпная плотность смеси фракций, кг/м ³
1	0,67	1,67	1 640
2	4,00	1,67	1 590
3	0,67	7,00	1 535
4	4,00	7,00	1 600
5	0,67	4,34	1 585
6	4,00	4,34	1 560
7	2,33	1,67	1 620
8	2,33	7,00	1 590
9	2,33	4,34	1 560

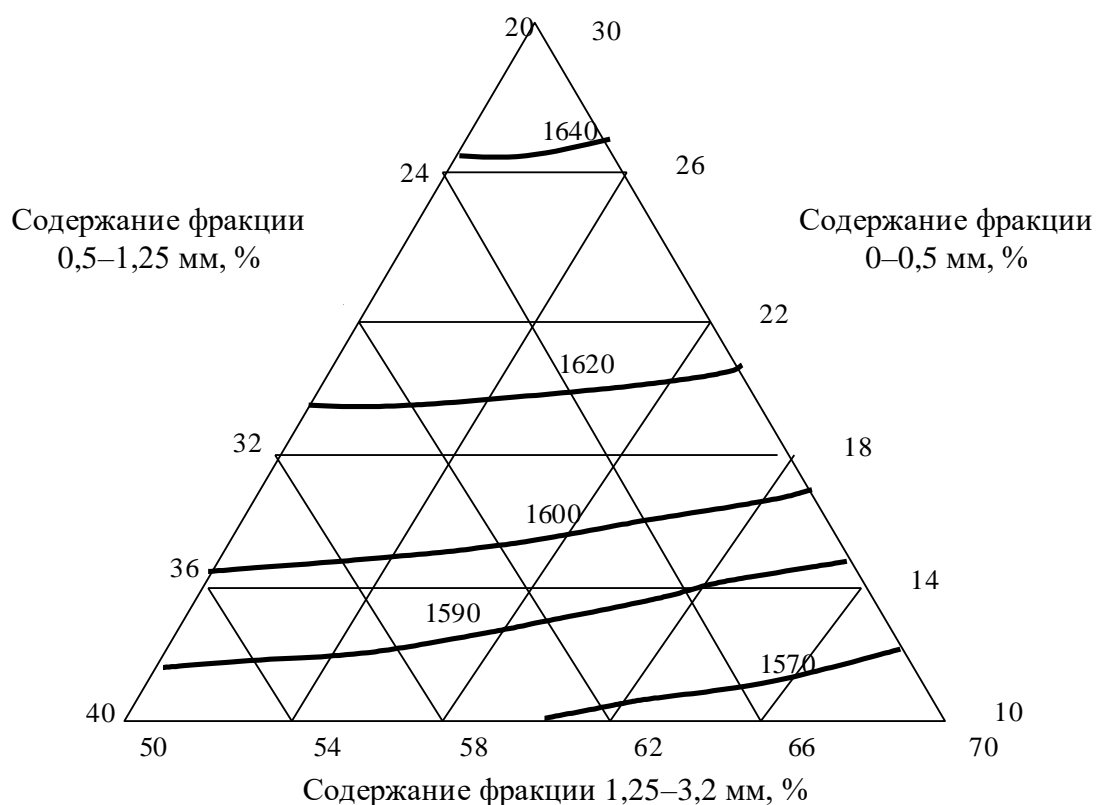


Рис. 1. Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности заполнителя (кг/м³) в зависимости от его гранулометрического состава

Полученные данные позволяют наметить состав смеси оптимальной гранулометрии, соответствующий наибольшей насыпной плотности: 30 % фракции 0–0,5 мм; 20 % фракции 0,5–1,25 мм; 50 % фракции 1,25–3,2 мм. Приведенные выше теоретические расчеты согласуются с экспериментальными значениями, что свидетельствует о корректности используемой модели.

Более глубокую оптимизацию гранулометрического состава минеральной части мелкозернистого бетона можно получить за счет введения в оптимальном количестве различных тонкомолотых добавок – наполнителей [4]. Влияние наполнителей на свойства бетонов рассматривалось в предыдущих публикациях [5, 6], где было показано, что применение в качестве наполнителя цементных систем молотого известняка в сочетании с суперпластификатором позволяет целенаправленно регулировать свойства мелкозернистых бетонов. На основе этих предпосылок в данной работе поставлена задача проверить влияние ультразвуковой обработки оптимизированных по грансоставу мелкозернистых композиций, в состав тонкодисперсной части которых вводился карбонатный микронаполнитель в различном количестве (взамен соответствующей части цемента), на структуру твердеющих систем.

Использовались следующие параметры ультразвуковой обработки:

Полосы частот	0,62–1,8–2,5–5 МГц
Мощность	80–250 Вт
Время обработки	30 мин

Ультразвуковая обработка осуществлялась в процессе приготовления смеси (при частоте 0,62 МГц – уровень средней фракции) и твердения кубов-образцов 100x100x100 мм из мелкозернистого бетона, изготовленного на основе данной цементно-песчаной смеси (при частоте 1,8 МГц – уровень микрофракций) (рис. 2).



Рис. 2. Сканирование гомогенности внутренней структуры композита с помощью трансдюсера генератора УДМ в процессе твердения бетона

На рис. 3 приведены результаты ультразвукового сканирования трех образцов мелкозернистого бетона с содержанием в тонкодисперсной части 0,30 и 50 % известнякового молотого порошка с удельной поверхностью, равной $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ (взамен соответствующей части цемента), и суперпластификатора СП-1 в дозировке 0,5 и 0,75 % от массы тонкодисперсной части (цемент и известняковый порошок) по сухому веществу для выяснения однородности глубинной структуры полученного материала.

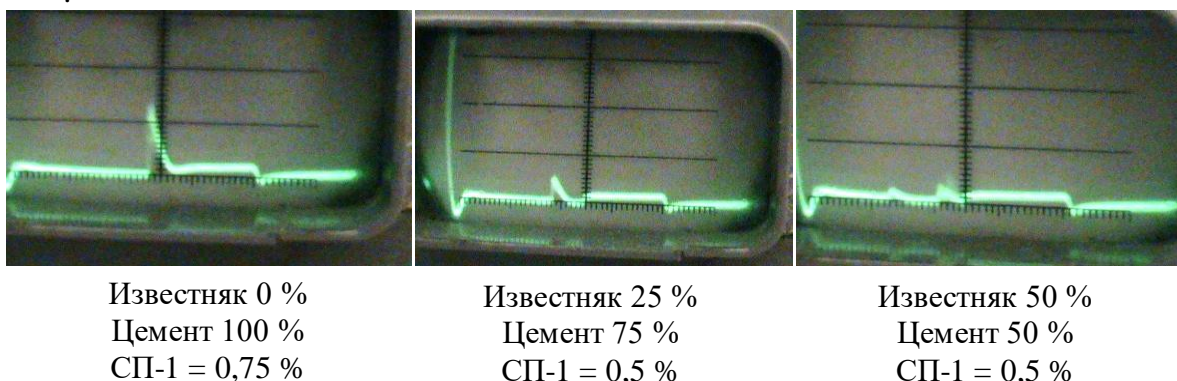


Рис. 3. Осциллограммы образцов бетона при средних значениях мощности и чувствительности сигнала и максимальном диапазоне прозвучивания 100 мм на частоте 1,8 МГц

Видно, что образцы с содержанием известнякового тонкодисперсного порошка в количестве 50 % в суммарном содержании цемента и наполнителя и суперпластификатора в количестве 0,5 % от массы тонкодисперсной части (цемент и известняковый тонкодисперсный порошок), подвергшиеся ультразвуковому воздействию, имеют более гомогенную структуру (строб выбран в пределах 8 % полосы мерной шкалы). Это свидетельствует о влиянии ультразвуковой обработки на более равномерное распределение частиц по массе композита. Имеет место кавитационный эффект разглобулирования смеси на микроуровне при оптимальной частоте для ультрадисперсных частиц наполнителя порядка 1,8 МГц. При этом следует ожидать улучшения эксплуатационных свойств такого бетона, в том числе трещиностойкости и долговечности, без существенной потери прочности (даже в случае обедненной по расходу цемента сырьевой смеси).

Анализ результатов, полученных на данном этапе исследований, показывает, что использование ультразвукового генератора-модификатора УДМ позволяет целенаправленно влиять на структуру мелкозернистого бетона и повышать его эксплуатационные свойства.

Механизм формирования гомогенной структуры цементного камня, содержащего добавку на основе микродисперсного карбонатного порошка и суперпластификатора, при ультразвуковом модифицировании связан преимущественно с процессом схлопывания газовых пузырьков при кавитации, что ведет к разглобулированию смеси на микро- и мезоуровне.

Синергетический эффект ультразвуковой обработки и оптимизации гранулометрического состава минеральной части мелкозернистого бетона может способствовать улучшению эксплуатационных свойств мелкозернистого бетона за счет активизации в смеси активных центров микрокавитации и наиболее равномерного распределения частиц в объеме смеси, что делает ее более однородной, гомогенной, связной и плотной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. С. 47–51.
2. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 248 с.
3. Величко Е.Г., Белякова Ж.С. Физико-химические и методологические основы получения многокомпонентных систем оптимизированного состава // *Строительные материалы*. 1996. № 3. С. 27–30.
4. Калашников В.И., Демьянова В.С., Дубошина Н.М. Сухие строительные смеси на основе карбонатоцементного смешанного вяжущего // *Изв. вузов. Строительство*. 2000. № 6. С. 52–58.
5. Белов В.В., Образцов И.В., Смирнов М.А. Проектирование зерновых составов минеральных вяжущих систем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 7–15.
6. Belov V., Kuliaev P. Limestone Filler As One of the Cheapest And Best Additive to Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering 21, Construction – The Formation of Living Environment*. 2018. pp. 032054.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

КУЛЯЕВ Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

АРТЕМЬЕВ Алексей Анатольевич – доктор экономических наук, доцент, проректор по научной и инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: aaartemev@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Куляев П.В., Артемьев А.А. Влияние гранулометрического состава на эффективность ультразвуковой обработки мелкозернистых бетонов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 6–14.

**IMPACT OF GRANULOMETRIC COMPOSITION
ON ULTRASONIC PROCESSING EFFICIENCY
OF FINE-GRAINED CONCRETE****V.V. Belov, P.V. Kulyaev, A.A. Artemyev***Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. Ultrasonic methods are widely used in the construction industry as methods of defectoscopy and non-destructive testing of physical and mechanical characteristics of concrete in structures. At the same time, ultrasonic treatment of concrete mix and freshly laid concrete can be used for the purpose of modifying its structure and properties as well. The relevance of the topic is directly related to the consideration of issues related to savings in construction, since it allows you to reduce the cost of introducing expensive cements into the concrete.

Keywords: ultrasonic processing, micro-level reinforcement, optimal particle size measurement, highest particle packing, software package modeling.

REFERENCES

1. Akhverdov I.N. *Osnovy Fiziki Betona [Fundamentals of Concrete Physics]*. Moscow: Stroyizdat, 1981. 460 p.
2. Baldev R., Rajendran V., Palanichami P. *Primenenie Ul'trazvuka [Application of Ultra-sound]*. Moscow: Technosphere, 2006. 248 p.
3. Velichko E.G., Belyakova J.S. Physicochemical and Methodological Foundations of Obtaining Multi-component Systems of Optimized Composition. *Construction Materials*. 1996. No. 3, pp. 27–30. (In Russian).
4. Kalashnikov V.I., Demyanova V.S., Duboshina N.M. Dry Building Mixtures Based on Carbonate Cement Mixed Binder. *Izv. Higher Education Institutions. Construction*. 2000. No. 6, pp. 52–58. (In Russian).
5. Belov V.V., Obraztsov I.V., Smirnov M.A. Design of Grain Compositions of Mineral Binder Systems. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering And Chemical Technology»*. 2020. No. 2 (6), pp. 7–15. (In Russian).
6. Belov V., Kulyaev P. Limestone Filler As One of the Cheapest And Best Additive to Concrete. In the Collection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21, Construction – The Formation of Living Environment*. 2018, pp. 032054.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

KULIAEV Pavel Victorovitch – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

ARTEMYEV Alexey Anatolyevich – Ph.D., Associate Professor of the Department of Geodesy and Cadastre, Vice Rector on Scientific and Research, Tver State Technical University, Tver. E-mail: aartemev@rambler.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Kulyaev P.V., Artemyev A.A. Impact of Granulometric Composition on Ultrasonic Processing Efficiency of Fine-grained Concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology». 2021. No. 1 (9), pp. 6–14.

УДК 69.003.13

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ВОЛОКОН В БЕТОНЕ, ИЗГОТОВЛЕННОМ С УТИЛИЗИРОВАННЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

П.Ю. Матар¹, Ж.-Ф.Ж. Зехиль², Ж.Ж. Асаад³, Т.Р. Баркая⁴

¹ Ливанский университет (г. Бейрут, Ливан)

² Университет Нотр Дам – Луайзе (г. Зук Мосбех, Ливан)

³ Баламандский университет (г. Аль Кура, Ливан)

⁴ Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Матар П.Ю., Зехиль Ж.-Ф.Ж.,
Асаад Ж.Ж., Баркая Т.Р., 2021

Аннотация. В статье представлен обзор двух исследовательских работ по изучению влияния полипропиленовых волокон на свойства бетона с утилизированными заполнителями (БУЗ) и, в частности, самоуплотняющегося бетона (СУБ), включающего утилизированные заполнители. Были изучены следующие свойства БУЗ: предел прочности при сжатии, предел прочности на растяжение при раскалывании, предел прочности на растяжение при изгибе, модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность, абсорбция и пустоты. Что касается СУБ, включающего утилизированные заполнители, то были исследованы его удобоукладываемость, предел прочности при сжатии и предел прочности при растяжении.

Ключевые слова: утилизированные заполнители, рециклированный бетон, самоуплотняющийся бетон, полипропиленовые волокна, физико-механические свойства, реологические свойства.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-14-24

ВВЕДЕНИЕ

Возможность использования полипропиленовых волокон (ППВ) в бетоне изучена в значительной степени. Гораздо меньшее количество научных исследований посвящено исследованию влияния ППВ на свойства бетона, включающего заполнители из рециклированного (вторичного) бетона (ЗРБ).

Установлено, что включение ЗРБ в состав смеси значительно влияет на прочность на сжатие, если процентное содержание ЗРБ составляет более 50 % от общего объема заполнителя, в то время как при содержании ЗРБ менее 30 % его влияние на прочность становится незначительным [1]. При увеличении процентного содержания ЗРБ происходит также падение прочности на растяжение при раскалывании и изгибе. Во

многих исследованиях отмечается значительное снижение модуля упругости бетона с повышенным содержанием ЗРБ. Однако влияние ЗРБ на коэффициент Пуассона еще недостаточно изучено.

Добавление волокон в бетон обычно производят для улучшения определенных его свойств. Действительно, по сравнению с бетоном, не содержащим волокна, фибробетон характеризуется улучшенным сопротивлением растрескиванию, прочностью на растяжение, прочностью на изгиб, прочностью на сдвиг, пластичностью и ударной вязкостью. Наличие волокон также приводит к более однородному, изотропному и пластичному поведению бетона. В частности, ППВ широко используются в конструкционном бетоне для повышения его целостности, улучшения его прочностных свойств и увеличения долговечности. Наиболее важным преимуществом фибробетона является его способность выдерживать большие деформации после возникновения первой трещины. Как правило, целостность волокон сохраняется после возникновения трещины, а те волокна, которые перекрывают трещину, будут препятствовать ее дальнейшему раскрытию. Главный недостаток повышенного содержания в бетоне волокон – снижение удобоукладываемости вследствие их комкования и последующего увеличения внутреннего трения. Однако эта проблема может быть до некоторой степени решена добавлением соответствующих добавок, обеспечивающих равномерное распределение волокон в бетонной смеси. Хотя ППВ не оказывают существенного влияния на прочность на сжатие, они значительно улучшают прочность на растяжение при раскалывании и изгибе, если содержание ППВ не превышает определенного порогового значения, выше которого эти показатели начинают снижаться. Влияние ППВ на модуль упругости и коэффициент Пуассона бетона еще недостаточно исследовано. При этом уже проведенные работы показывают, что введение ППВ уменьшает как модуль упругости, так и коэффициент Пуассона бетона.

В данной статье представлены результаты исследований, посвященных изучению влияния ППВ на физико-механические свойства бетона с утилизированными заполнителями, а также на удобоукладываемость, реологические и основные прочностные свойства самоуплотняющегося бетона, включающего утилизированные заполнители.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ВОЛОКОН НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА С УТИЛИЗИРОВАННЫМИ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ [2]

Изучалось влияние ППВ на удобоукладываемость и плотность свежего бетона, а также на прочность на сжатие, на растяжение при раскалывании и при изгибе, модуль упругости, величину коэффициента Пуассона, абсорбцию и пористость затвердевшего бетона. С этой целью исследовались три серии бетонных смесей, содержащих ЗРБ в количестве 0, 25 и 50 % от общего количества заполнителей. В каждую серию вводились ППВ в количестве 0; 0,15 и 0,3 % от объема бетона. Все смеси имели водоцементное отношение (В/Ц), равное 0,54, и осадку конуса, равную 120 ± 20 мм.

МАТЕРИАЛЫ

В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент РА-L 42,5, соответствующий ливанскому стандарту NL 53. Он также эквивалентен цементу СЕМ II/A-L 42,5, соответствующему европейскому стандарту EN 197-1. Удельная поверхность

по Блейну, средний размер частиц и удельный вес цемента составляли $3\,700\text{ см}^2/\text{г}$, $16,6\text{ мкм}$ и $3,05$ соответственно.

В качестве природных заполнителей применялось местное сырье – дробленый известняк и песок, полученные в окрестности Бекаа (Ливан). Утилизированные заполнители (УЗ) были получены путем дробления бетонных цилиндрических образцов, собранных в трех лабораториях. Утилизированные заполнители замещали $0, 25$ и 50% от природных заполнителей (ПЗ). Размеры частиц заполнителей составляли от $4,75$ до 19 мм для крупных заполнителей и менее $4,75\text{ мм}$ для мелких заполнителей и природного песка.

Вода, использовавшаяся для смешивания и поливки бетона в процессе твердения, была чистой, свежей и без примесей.

Для достижения заданной осадки конуса во всех смесях применялась высокоэффективная водоредуцирующая добавка (ВЭВРД) на основе синтетических полимеров. Она обладает сильной диспергирующей способностью по отношению к мелким частицам бетона и способна, таким образом, обеспечить требуемую удобоукладываемость бетона при сохранении пониженного В/Ц.

Несмотря на низкий модуль упругости, ППВ широко используются благодаря ряду полезных свойств, таких как ограниченная водопоглощающая способность, высокая пластичность, высокая жесткость, высокий предел прочности на растяжение, коррозионная стойкость, исключительная долговечность и доступная цена. Такие волокна обычно применяются в строительных растворах и бетонах для улучшения их пластичности и противодействия растрескиванию цементной матрицы. Микрофиламентные ППВ с высокими характеристиками обычно используются в обычном бетоне для предотвращения появления небольших трещин, которые могут возникнуть в результате пластической усадки, преждевременного высыхания и ранних тепловых изменений объема затвердевших вяжущих материалов. Длина и диаметр волокон составляли соответственно 12 мм и 30 мкм . Это обеспечивает их относительно высокое соотношение, равное 400 (т.е. $12/0,03$), что позволяет волокнам лучше влиять на микротрещины в микроструктуре бетона. Удельный вес ППВ и модуль упругости составляли $0,91$ и $3,5\text{ ГПа}$ соответственно. Было принято относительно низкое содержание волокон, чтобы уменьшить трение между ними и заполнителями и ограничить возможные потери прочности на сжатие. Сниженное содержание ППВ также уменьшает комкование волокон и приводит к их более равномерному распределению в объеме бетона. Это необходимо для того, чтобы сдерживать образование и рост микротрещин в цементной матрице. Более высокое содержание ППВ приводит к значительному снижению удобоукладываемости: бетон становится жестким, повышается трудоемкость его укладки и уплотнения.

ПРОВЕДЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Удобоукладываемость бетона определялась с помощью испытания на осадку конуса и регулировалась с помощью ВЭВРД. Прочность на сжатие (рис. 1а), прочность на растяжение при раскалывании (рис. 1б), статический модуль упругости и коэффициент Пуассона были измерены путем испытания бетонных цилиндров стандартных размеров, т.е. диаметром 150 мм и высотой 300 мм , в возрасте 7 и 28 дней. Прочность на изгиб (модуль разрыва) определялась в возрасте бетона 28 дней путем испытания на изгиб по трехточечной схеме нагружения неармированных бетонных балок, имеющих поперечное

сечение 150×150 мм и длину пролета 500 мм (рис. 1в). Плотность, абсорбция и пустоты измерялись в возрасте бетона 28 дней с помощью бетонных кернов массой более 800 г, извлекаемых из стандартных бетонных цилиндров.

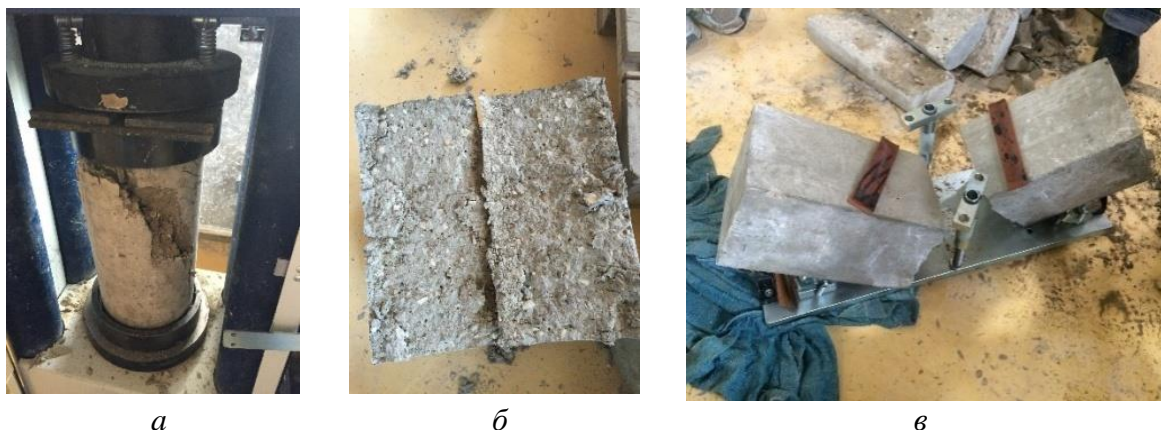


Рис. 1. Бетонные образцы, подвергнутые испытанию:
а – на сжатие (50 % ЗРБ, 0,3 % ППВ); *б* – растяжение при раскалывании
(50 % ЗРБ, 0,3 % ППВ); *в* – изгиб (0 % ЗРБ, 0 % ППВ)

ВЫВОДЫ

На основании результатов, полученных в ходе данного исследования, были сделаны следующие выводы:

1. Смеси, содержащие большее количество ППВ, показали повышенную потребность в высокоэффективной водоредуцирующей добавке для достижения заданной осадки конуса. Это связано с необходимостью компенсировать повышенное трение между волокнами и крупным заполнителем, а также уменьшить комкование волокон.

2. Включение ЗРБ в смесь вызвало значительное снижение прочности на растяжение при раскалывании и изгибе. Это объясняется существенным влиянием более слабой (новой) контактной зоны на предел прочности БУЗ.

3. Наблюдаемое падение прочности на сжатие при добавлении в смесь ЗРБ было менее значительным. Это можно объяснить преобладающим (в данном случае) эффектом прочности ПЗ.

4. Добавление ЗРБ снизило модуль упругости, значение коэффициента Пуассона и плотность, одновременно увеличив абсорбцию и пустотность затвердевшего бетона. Уменьшение модуля упругости может быть связано с наличием трещин в ЗРБ, относительно низким модулем упругости и более высокой пористостью старого цементного теста. Снижение плотности объясняется меньшим удельным весом ЗРБ по сравнению с ПЗ. Увеличение абсорбции и проникаемых пустот может быть обусловлено более высокой пористостью и способностью ЗРБ поглощать воду.

5. Была проведена корреляция между проникаемыми пустотами и модулем упругости. Эта корреляция также выявила роль ЗРБ и ППВ. Повышение доли ЗРБ значительно увеличивает пустоты и снижает модуль упругости. Увеличение содержания ППВ также увеличивает пустоты и снижает модуль упругости, но в меньшей степени.

6. Как в бетоне на натуральном заполнителе, так и в БУЗ не наблюдалось значительного влияния содержания ППВ на прочность на сжатие.

7. Падение прочности на растяжение при раскалывании и изгибе из-за включения ЗРБ в значительной степени компенсировалось добавлением ППВ. Повышение обоих пределов прочности (до 25 %) является результатом способности волокон перекрывать трещины в цементной матрице, окружающей частицы заполнителя.

8. Добавление ППВ несколько снизило модуль упругости всех бетонных смесей. Наиболее значительное наблюдаемое падение модуля Юнга БУЗ составило 4,3 и 4,9 %, что соответствовало содержанию ППВ 0,15 и 0,3 %. При этом содержание ЗРБ оказывало наибольшее воздействие, приводящее к падению модуля Юнга, в то время как содержание ППВ влияло в меньшей степени.

9. Не наблюдалось существенного влияния от добавления ППВ на коэффициент Пуассона. Тем не менее небольшое снижение коэффициента Пуассона отмечалось во всех смесях. Наиболее значительное наблюдаемое падение коэффициента Пуассона для БУЗ составило 4,2 и 6 % при содержании ППВ 0,15 и 0,3 % соответственно.

10. Добавление ППВ не повлияло на плотность затвердевшего бетона. Это можно объяснить небольшим количеством ППВ, принятым в этой работе.

11. Абсорбция несколько снизилась с увеличением содержания ППВ, что может объясняться очень низкой водопоглощающей способностью ППВ. Наблюдаемое в этом случае ограниченное падение абсорбции может быть связано с содержанием волокон в БУЗ, не превышающим 0,3 %.

12. Пустотность немного увеличилась с повышением содержания ППВ. Наиболее значительное образование пустот в БУЗ составило 1,4 и 4,8 %, что соответствует содержанию ППВ 0,15 и 0,3 %.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ВОЛОКОН НА УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ И ОСНОВНЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА, СОДЕРЖАЩЕГО УТИЛИЗИРОВАННЫЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ [3]

Влияние заполнителей из рециклированного бетона на удобоукладываемость самоуплотняющегося бетона требует особого внимания при бетонировании элементов конструкций из рециклированного бетона. Фактически ЗРБ, полученный путем дробления бетонных обломков, собранных с мест сноса сооружений, состоит из природного крупного заполнителя (ПКЗ) и приклеенного раствора, которые придают скелету бетона, образованному заполнителем, специфические характеристики, такие как пониженная плотность, более высокая водопоглощающая способность, большая угловатость и более грубая текстура поверхности. Эти особенности изменяют внутреннее сопротивление истеканию бетонной смеси с прямым влиянием на деформируемость и обеспечивают легкость укладки СУБ в сложные формы с большим количеством арматуры.

Хотя удобоукладываемость может быть улучшена с помощью ВЭВРД, заданная осадка конуса может достигаться добавлением ЗРБ. Благодаря их более высокому водопоглощению снижается количество свободной, химически не связанной воды затворения [4].

Полипропиленовое волокно может включаться в состав смеси конструкционных бетонов для повышения прочности на изгиб, реакции после растрескивания и сопротивления энергетическим и ударным нагрузкам. Тем не менее такие включения препятствуют деформируемости цементной матрицы из-за комкования волокон и взаимодействия с крупным заполнителем.

При попытке оценить одновременное влияние ЗРБ и ППВ на удобоукладываемость и реологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей (СУБС) было установлено, что удобоукладываемость бетона ухудшилась из-за совместного воздействия ЗРБ и ППВ.

Данное исследование было направлено на количественную оценку комбинированного воздействия ЗРБ и ППВ на удобоукладываемость и реологические свойства СУБ. Были изготовлены различные серии СУБ, содержащие от 25 до 100 % ЗРБ и от 0,25 до 1,75 % ППВ; соотношение между водой и вяжущим (В/ВЖ) варьировалось от 0,38 до 0,5, в то время как ВЭВРД регулировалась таким образом, чтобы обеспечить заданный расплыв конуса, равный 700 ± 25 мм. Характеристики подвижности, связности, проходимости, сопротивления сегрегации, а также прочность на сжатие и растяжение при раскалывании, которые изменились в результате добавления ЗРБ и ППВ, были зафиксированы и сопоставлены с предельными значениями, указанными в Европейских рекомендациях по самоуплотняющемуся бетону [5].

МАТЕРИАЛЫ

Использовавшееся вяжущее вещество состояло из 70 % портландцемента типа I (по ASTM – стандарту американского общества специалистов по испытаниям и материалам), 25 % доменного шлака марки 100 и 5 % микрокремнезема. Удельная поверхность по Блейну, средний размер частиц и удельный вес вяжущего вещества составляли $3\,750\text{ см}^2/\text{г}$, 21,2 мкм и 3,03 соответственно. В качестве мелкодисперсного заполнителя использовался кремнистый песок; его удельный вес, водопоглощающая способность и дисперсность составляли 2,65, 1,01 и 2,54 соответственно.

Природные крупные заполнители состояли из дробленого известняка. Утилизированные заполнители были получены путем дробления бетонных отходов. Все заполнители имели номинальный максимальный размер 12,5 мм.

В этом исследовании использовались микрофиламентные ППВ. Волокна имели номинальную длину 12 мм и диаметр 80 мкм, что определяет соотношение размеров, равное 150. Удельный вес ППВ, удлинение при разрыве, модуль упругости и предел прочности на разрыв составляли 0,93, 7 %, 6,6 ГПа и 520 МПа соответственно.

Была также использована ВЭВРД типа F на базе нафталинсульфоната. Чтобы предотвратить сегрегацию и засорение, добавляли модификатор вязкости, являющийся жидким производным гидроксипропилцеллюлозы и широко используемый в производстве СУБ для регулирования связности и стабильности.

СОСТАВ СМЕСЕЙ

В данном исследовании рассматривались две контрольные СУБС с ПЗ, обладающие средней и высокой прочностью на сжатие. Смесь средней прочности была приготовлена с использованием комплексного вяжущего с расходом $375\text{ кг}/\text{м}^3$ и имела В/ВЖ = 0,5, в то время как высокопрочная смесь имела содержание вяжущего материала $450\text{ кг}/\text{м}^3$ и В/ВЖ = 0,38. Дозировка ВЭВРД была скорректирована так, чтобы обеспечить расплыв конуса, равный 700 ± 25 мм. Стабильность смесей обеспечивалась путем регулирования концентрации модификатора вязкости для достижения индекса визуальной стабильности порядка 1.

Полипропиленовые волокна были включены в различные испытанные серии СУБС (контрольные и модифицированные путем добавления ЗРБ) с постепенным приращением, равным 0,25 % от массы вяжущего.

ПРОВЕДЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Удобоукладываемость СУБС оценивалась путем определения расплыва конуса (рис. 2), времени T_{500} для достижения расплыва конуса, равного 500 мм, времени вытекания из V-образной воронки (T_v) (рис. 3), проходимости и сопротивления сегрегации. Прочность определялась путем испытания СУБС в L-образном ящике с двумя гладкими стержнями диаметром 12 мм (рис. 4). Сопротивление сегрегации определялось путем заливки свежей СУБС в сито с квадратными отверстиями размером 5 мм, а затем взвешиванием материала, прошедшего через сито после двухминутного перерыва (рис. 5). Для оценки реологических свойств СУБ, а именно предела текучести (τ_0) и пластической вязкости (η), использовалась четырехлопастная лопатка с прорезями, соединенная с ротационным реометром (рис. 6).

Время схватывания определялось на образцах строительного раствора, полученных мокрым просеиванием свежего СУБ на сите диаметром 4,75 мм, а прочность на сжатие и на растяжение при раскалывании – на бетонных цилиндрах диаметром 100 мм и высотой 200 мм в возрасте бетона 28 дней.



Рис. 2. Определение расплыва конуса



Рис. 3. Определение T_v с помощью V-образной воронки



Рис. 4. Определение проходимости с помощью L-образного ящика



Рис. 5. Определение сопротивления сегрегации с помощью сита



Рис. 6. Определение предела текучести и пластической вязкости с помощью лопатки, соединенной с ротационным реометром

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование было направлено на оценку одновременного воздействия добавок ЗРБ и ППВ на удобоукладываемость СУБ с В/ВЖ, варьируемым от 0,38 до 0,5. Результаты испытаний показали, что включение ППВ привело к более высокой потребности в высокоэффективной водоредуцирующей добавке для обеспечения заданной осадки конуса, особенно когда смеси приготавливались с повышенным содержанием ЗРБ. Это было связано с необходимостью улучшения диспергируемости цементной матрицы, чтобы обеспечить образование комков волокон и увеличить внутреннее трение из-за ЗРБ. Максимально возможное содержание ППВ для бетонной смеси на натуральном заполнителе с В/ВЖ = 0,5 составило 1,75 %, в то время как для смеси с В/ВЖ = 0,38 и содержащей 100 % ЗРБ снизилось до 0,5 %.

Добавление ППВ привело к увеличению T_{500} и T_v (что отражает снижение скорости истекания), а также уменьшению проходимости бетонной смеси, особенно при пониженном В/ВЖ и/или увеличенном содержании ЗРБ. Тем не менее смеси, содержащие повышенное количество ППВ и ЗРБ, имели повышенное сопротивление сегрегации. Это может быть приписано синергетическому эффекту непрерывной сети межчастичных связей в фибробетоне наряду с большей относительной водопоглощающей способностью ЗРБ, что снижает вредное воздействие свободной воды затворения в свежем бетоне.

Четырехлопастная лопатка с прорезями, вращающаяся в бесконечной среде, использовалась для определения кривых потока СУБ. Параметры τ_0 и η увеличились для смесей с большим содержанием ППВ и ЗРБ, при этом повышение η было примерно вдвое большим по сравнению с τ_0 . Это свидетельствует о том, что такие включения главным образом влияют на пластическую вязкость смеси, определяемую при движении, в то время как текучесть, которая отражает необходимую энергию для инициирования истечения, остается менее подверженной их влиянию. Предлагаются серии диаграмм для прогнозирования откликов T_v и проходимости при изменении реологических свойств бетонной смеси.

Эффект от добавления ППВ не повлиял на прочность на сжатие смесей, изготовленных с заданными В/ВЖ и типом заполнителя. Тем не менее прочность на растяжение при раскалывании для самоуплотняющегося фибробетона заметно увеличилась благодаря перекрывающему действию волокон, которое ограничивает распространение трещин в непосредственной близости от частиц заполнителя. Практически это означает, что падение прочности на растяжение из-за включений ЗРБ может быть компенсировано добавлением ППВ.

В целом полученные результаты хорошо согласуются с другими подобными исследованиями. Так, в работе [1] проводились испытания серий образцов с включением ЗРБ 0, 25 и 50 % с целью определения влияния ЗРБ на механические характеристики, в том числе на прочность при сжатии и растяжении, модуль упругости и др. При этом для изготовления бетонных образцов использовались аналогичные компоненты, однако получены они были из совершенно других источников. Тем не менее закономерности влияния ЗРБ на характеристики БУЗ при сжатии (прочность и модуль деформаций) оказались практически идентичными. Наблюдается несколько большее расхождение показателей снижения прочности при растяжении на изгиб, и это объясняется тем, что в работе [1] применялся рециклированный бетон практически той же исходной прочности,

что и основная матрица БУЗ. Все это свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббас З.А., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В. Экспериментальное исследование механических свойств рециклированных бетонов. *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы международных академических чтений*. Курск. 2017. № 1. С. 1–9.
2. Matar P., Zéhil G.-P. Effects of Polypropylene Fibers on the Physical And Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*. 2019. No. 34 (6), pp. 1327–1344.
3. Matar P., Assaad J.J. Concurrent Effects of Recycled Aggregates and Polypropylene Fibers on Workability and Key Strength Properties of Self-consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. No. 199, pp. 492–500.
4. Matar P., Assaad J.J. Effect of Vertical Reinforcing Bars on Formwork Pressure of SCC Containing Recycled Aggregates. *Journal of Building Engineering*. 2017. No. 13, pp. 159–168.
5. EPG, The European Guidelines For Self-compacting Concrete Specification Production and Use. 2005. URL: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf> (дата обращения: 12.02.2021).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАТАР Пьер Юсеф – PhD, HDR, профессор кафедры гражданского строительства, инженерный факультет, Ливанский университет, Beirut, Ливан. E-mail: pmatar@ul.edu.lb

ЗЕХИЛЬ Жерард-Филипп Жерард – PhD, доцент кафедры гражданского и экологического строительства, Университет Нотр-Дам – Луайзе, Зук Мосбех, Ливан. E-mail: gpzehil@ndu.edu.lb

АСААД Жозеф Жан – PhD, доцент кафедры гражданского и экологического строительства, инженерный факультет, Баламандский университет, Аль Кура, Ливан. E-mail: Joseph.Assaad@balamand.edu.lb

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Матар П.Ю., Зехиль Ж.-Ф.Ж., Асаад Ж.Ж., Баркая Т.Р. Использование полипропиленовых волокон в бетоне, изготовленном с утилизированными заполнителями // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 14–24.

**USE OF POLYPROPYLENE FIBERS IN CONCRETE FABRICATED
WITH RECYCLED AGGREGATES****P.Y. Matar¹, G.-Ph.G. Zéhil², J.J. Assaad³, T.R. Barkaya⁴**¹*Lebanese University (Beirut, Lebanon)*²*Notre Dame University – Louaize (Zouk Mosbeh, Lebanon)*³*University of Balamand (Al Koura, Lebanon)*⁴*Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. This article presents an overview of two research works investigating the effect of polypropylene fibers on the properties of recycled aggregate concrete (RAC) and, particularly, self-consolidating concrete (SCC) incorporating recycled aggregates. The following properties of RAC were evaluated: compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio, density, absorption, and voids. As for the SCC including recycled aggregates, the workability, compressive strength, and tensile strength were examined.

Keywords: recycled aggregates, recycled concrete, self-consolidating concrete, polypropylene fibers, physical and mechanical properties, rheological properties.

REFERENCES

1. Abbas Z.A., Barkaya T. R., Gavrilenko A.V. Experimental Study of the Mechanical Properties of Recycled Concrete. In the Collection: Security of the Construction Fund of Russia. *Problems and Solutions. Materials of International Academic Readings*. Kursk. 2017. No. 1, pp. 1–9. (In Russian).
2. Matar P., Zéhil G.-P. Effects of Polypropylene Fibers on the Physical and Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*. 2019. No. 34 (6), pp. 1327–1344.
3. Matar P., Assaad J.J. Concurrent Effects of Recycled Aggregates and Polypropylene Fibers on Workability and Key Strength Properties of Self-consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. No. 199, pp. 492–500.
4. Matar P., Assaad J.J. Effect of Vertical Reinforcing Bars on Formwork Pressure of SCC Containing Recycled Aggregates. *Journal of Building Engineering*. 2017. No. 13, pp. 159–168.
5. EPG, The European Guidelines for Self-compacting Concrete Specification Production and Use. 2005. URL: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf> (date of access: 12.02.2021).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MATAR Pierre Youssef – PhD, HDR, Professor; Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Lebanese University, Beirut, Lebanon. E-mail: pmatar@ul.edu.lb

ZEHIL Gérard-Philippe Gérard – PhD, Associate Professor; Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Notre Dame University – Louaize, Zouk Mosbeh, Lebanon. E-mail: gpzehil@ndu.edu.lb

ASSAAD Joseph Jean – PhD, Associate Professor; Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Balamand, Al Koura, Lebanon. E-mail: Joseph.Assaad@balamand.edu.lb

BARAKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Matar P.Y., Zehil G.-P.G., Assaad J.J., Barkaya T.R. Use of Polypropylene Fibers in Concrete Fabricated With Recycled Aggregates // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology». 2021. No. 1 (9), pp. 14–24.

УДК 004.031.42

**ОБЗОР ИНФРАСТРУКТУРЫ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
И КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ****В.В. Крылова, Л.А. Степанова***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Крылова В.В., Степанова Л.А., 2021

Аннотация. Представлен анализ отечественного и зарубежного опыта в области проектирования инфраструктур пространственных данных (ИПД). Рассмотрены этапы развития, структура и элементы ИПД Российской Федерации и Китайской Народной Республики.

Ключевые слова: инфраструктура пространственных данных, ИПД, Китай, ГИС, GPS.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-24-32

В настоящее время как в России, так и в Китае органы государственной власти и местного самоуправления, хозяйствующие субъекты создают и используют большие объемы пространственных и тематических данных, которые, как правило, локализованы и не скоординированы между собой, что исключает их комплексное использование.

Актуальность выбранной тематики определяется отсутствием единой системы идентификации пространственных объектов как универсального элемента связи различных баз данных, а также комплексной системной информации, что является одной из существенных причин несогласованности решений по развитию территорий, принимаемых различными органами управления этих двух стран.

Объемы накапливаемых, обрабатываемых и используемых пространственных и тематических данных федеральных органов власти, органов государственной власти и местного самоуправления, хозяйствующих субъектов, а также развитие современных информационных технологий и интернета изменили технологии массового сбора, хранения, обработки, использования пространственных данных, а также методы представления геоинформации, методы поиска, обеспечения доступа к ней, методы ее обработки, анализа и визуализации. Это обусловило создание ИПД.

Инфраструктура пространственных данных в Российской Федерации. Первое определение ИПД Российской Федерации как информационно-телекоммуникационной

системы было дано в Распоряжении Правительства РФ от 21.08.2006 № 1157-р в концепции формирования российской ИПД. Данное определение гласит, что ИПД РФ «обеспечивает доступ пользователей к национальным (государственным) распределенным ресурсам пространственных данных, а также распространение и обмен в сети Интернет в целях повышения эффективности их производства и использования» [1].

Что же является основной целью ИПД РФ? А.В. Кошкарёв в своей директиве рассуждает о том, что «главной целью ИПД является обеспечение свободного доступа органов государственной власти и местного самоуправления, а также граждан и частных организаций к пространственным данным путем повышения эффективности производства и использования национальных ресурсов пространственных данных для урегулирования управленческих задач и развития рынка геоинформационной продукции и услуг» [2].

Кроме того, в Распоряжениях Правительства РФ от 17.12.2010 № 2378-р «О концепции развития отрасли геодезии и картографии», от 07.06.2011 № 1177-р «Об утверждении прилагаемого плана мероприятий по реализации Концепции отрасли геодезии и картографии», от 15.04.2011 № 654-р «О базовых государственных информационных ресурсах» утвержден ряд положений создания ИПД.

Создание, обработку и доступ к данным, аккумулируемым в информационных системах и фондах пространственных данных органов государственной власти и местного самоуправления, обеспечивает трехуровневая иерархическая структура ИПД РФ, которая базируется на «информационных и геоинформационных технологиях и общих стандартах пространственных данных и метаданных» [4, 5] с использованием сети географических информационных узлов и каталогов метаданных (рис. 1).

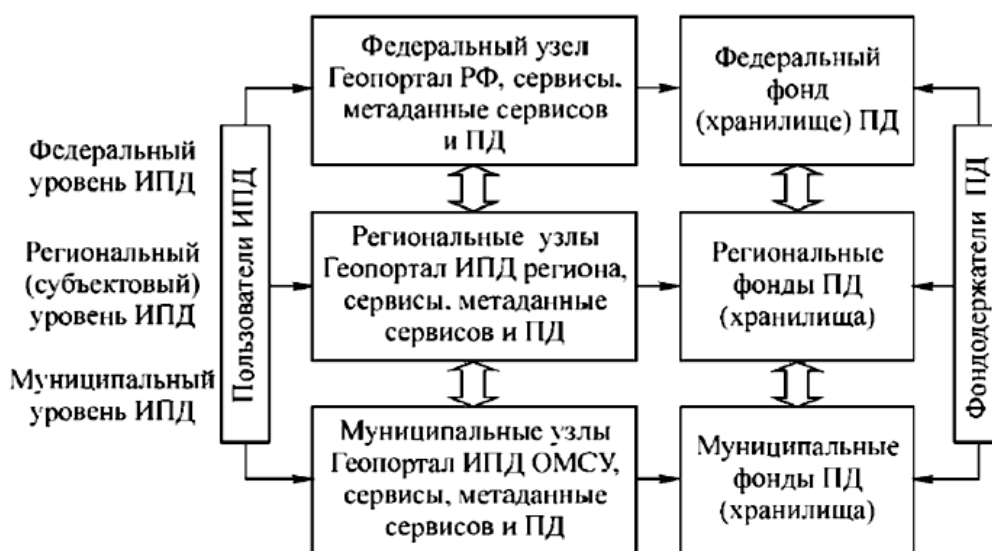


Рис. 1. Схема функционирования ИПД РФ [6]

Введением новых технологий и созданием нормативно-правовой базы в сфере оборота пространственных данных занимается Росреестр (Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии).

Компонентами ИПД являются такие элементы, как базовые пространственные данные, организационно-правовое, нормативное и технологическое обеспечение, а также

пространственные метаданные (рис. 2). Однако стоит отметить, что на данный момент ИПД РФ на различных уровнях власти находится на начальном этапе реализации проекта.

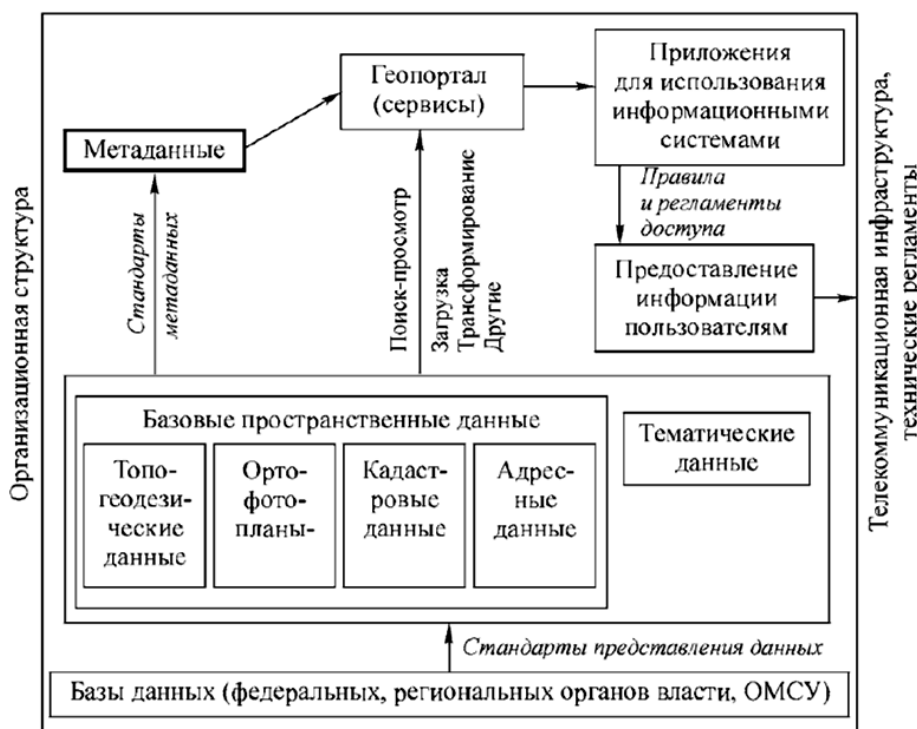


Рис. 2. Компоненты ИПД РФ [6]

Тверская область стала одним из нескольких пилотных субъектов РФ, на территории которого планировалось создание региональной ИПД в соответствии с Приказом Росреестра от 27.08.2010 № П/46227 «Об организации работ по разработке и реализации мероприятий по созданию региональной модели инфраструктуры пространственных данных».

На территории Тверской области существует несколько компаний, осуществляющих продвижение региональной ИПД. Одной из них является АО КБ «Панорама», внесшее весомый вклад в развитие ИПД Тверской области.

Структура ИПД представляет собой несколько связанных между собой элементов, таких как подсистемы сбора и накопления, ведения банков и публикации пространственных данных.

Так, за выполнение технологических операций по контролю качества информации о местности, ее подготовку к хранению и формированию баз пространственных данных и метаданных отвечает подсистема сбора и накопления пространственных данных.

Определяющими факторами при построении банка пространственных данных являются охват территории и степень детализации данных, однако с точки зрения ИПД сама структура банка пространственных данных не имеет значения.

В системе ИПД важнейшим элементом является функция поиска данных и их предоставление пользователю в соответствии с согласованными протоколами. Можно выделить следующие варианты публикации данных, которые реализуются программными

средствами: передача пользователю контактной информации о поставщике данных; публикация готовых наборов пространственных данных на геопорталах в открытом доступе и предоставление пространственных данных на основе геосервиса в автоматизированном режиме.

Картографические сервисы и сервисы, предоставляющие доступ к данным, отвечают за обеспечение функций предоставления данных по запросам пользователей. При этом картографические сервисы, такие как WMS (Web Map Service) и WMTS (Web Map Tile Service), обеспечивают передачу готового изображения по каналам связи. На картографических сервисах основана работа практически всех картографических сайтов в интернете, таких как Google Maps и Yandex.Maps.

Инфраструктура пространственных данных на территории Китая. Развитие и применение национальной инфраструктуры пространственных данных в Китае (НИПД), как и в России, является одним из главных приоритетов Центрального правительства с конца 1980-х гг. За последние десять лет в развитие НИПД в Китае (точнее, в материковом Китае) были инвестированы значительные ресурсы [7]. Одной из движущих сил является быстрый рост социального спроса на геопропространственные данные. Поскольку общество становится все более зависимым от информации, различные пользователи нуждаются в многомасштабных цифровых пространственных данных для поддержки своих потребностей в планировании, мониторинге, управлении и принятии решений. Такие данные особенно важны для решения ключевых проблем, которые касаются страны или всего мира, таких как земельные ресурсы, окружающая среда, стихийные бедствия и угрозы человеческой жизни [8, 9].

Вторая движущая сила – это быстрое развитие и популяризация высоких технологий, таких как дистанционное зондирование, глобальная система позиционирования, геоинформационная система (ГИС) и цифровая передача данных. Эти технологии обеспечили новые производительные силы для сбора, обработки, анализа, управления и распространения геопропространственной информации, а также способствовали созданию национальной геодезической и картографической технической системы в Китае для быстрого преобразования существующей системы из традиционной в современную и цифровую [10, 11].

Третья движущая сила заключается в том, что правительство КНР уделяет большое внимание развитию информационных технологий и применению информационных ресурсов.

В 1999 г. был создан Государственный комитет по координации геопропространственной информации. Эта межведомственная организация состоит из представителей более чем десяти государственных ведомств (министерств), которые занимаются деятельностью, связанной с ГИС. Цель комитета заключается в содействии созданию национальных рамок сотрудничества в области геопропространственной информации и разработке стратегий и политики на национальном уровне. Будучи ключевым звеном Государственного комитета по координации геопропространственной информации, Государственное бюро геодезии и картографии является ключевым правительственным учреждением, участвующим в планировании и внедрении китайской ИПД. Бюро активно участвует в Национальном стратегическом планировании и развитии межведомственного сотрудничества. Будучи действующим членом ISO/TK211, Китай активно участвует в деятельности своей рабочей группы, а некоторые китайские эксперты принимают участие в разработке международных геоматических стандартов. Национальная техническая

комиссия по стандартизации географической информации была основана в 1997 г. Ее цель заключается в содействии стандартизации географической информации на национальном уровне. Она организует разработку и пересмотр национальных стандартов географической информации; координирует, изучает и утверждает стандарты геоинформатики; поощряет деятельность, связанную со стандартами геоинформатики; публикует геоматические стандарты.

Геоматический центр считается официальным хранителем геопространственных данных в структуре ИПД Китая. Национальный геоматический центр Китая был создан в конце 1995 г. путем реорганизации двух бывших национальных геодезических и картографических центров. Он отвечает за разработку базы данных, а также разработку, поддержание, обновление и распространение фундаментальной географической информации на национальном уровне. Одной из основных инициатив Национального геоматического центра Китая является создание ключевых национальных баз данных и архивного центра, а также соответствующих систем управления (рис. 3).

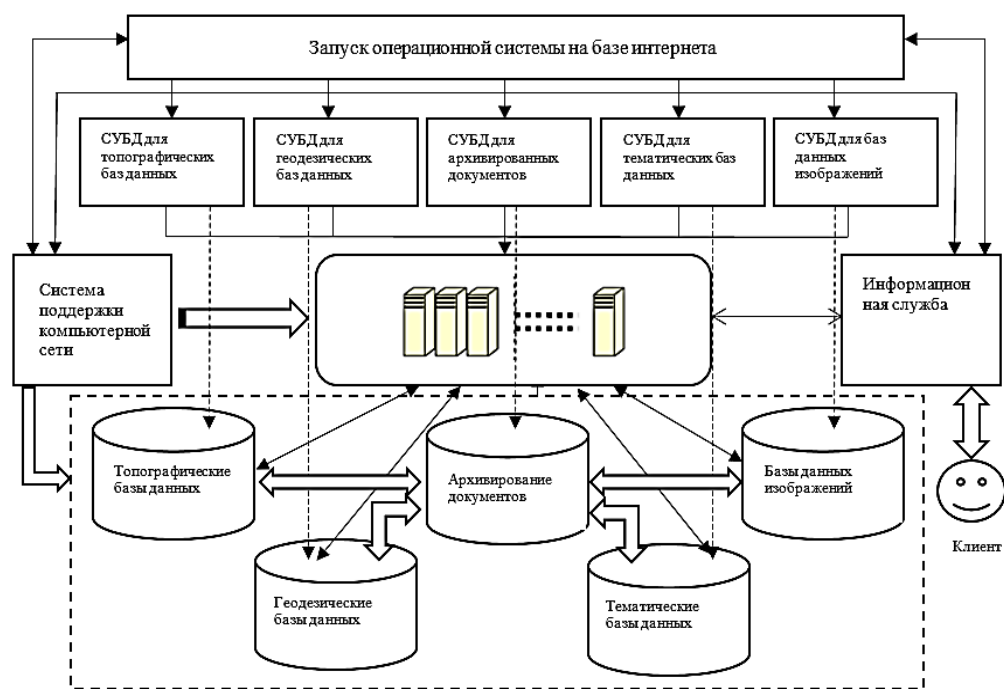


Рис. 3. Ключевые базы данных и системы управления ИПД Китая [14]

Для содействия развитию специалистов по ГИС в Китае в 1994 г. была создана ассоциация на национальном уровне – Китайская ассоциация ГИС, основные цели которой заключаются в содействии обмену информацией между пользователями, производителями и учеными, содействии оперативному использованию ГИС и распространению новых технологий и опыта [12]. В настоящее время Китайская ассоциация ГИС насчитывает около 3 000 индивидуальных и около 300 корпоративных членов. Она издает профессиональный журнал GIS World (на китайском языке), организует двухгодичные конференции по ГИС и многие другие симпозиумы и семинары.

Для более эффективного получения, обработки, анализа, управления и распространения геопро пространственных данных Государственное бюро геодезии и картографии разработало цифровые геодезические и картографические системы путем интеграции ГИС с технологиями дистанционного зондирования, GPS и цифровой передачи данных. На рис. 4 показана структура сетей геопро пространственной информации веб-сайтов фундаментальных ГИС Китая.

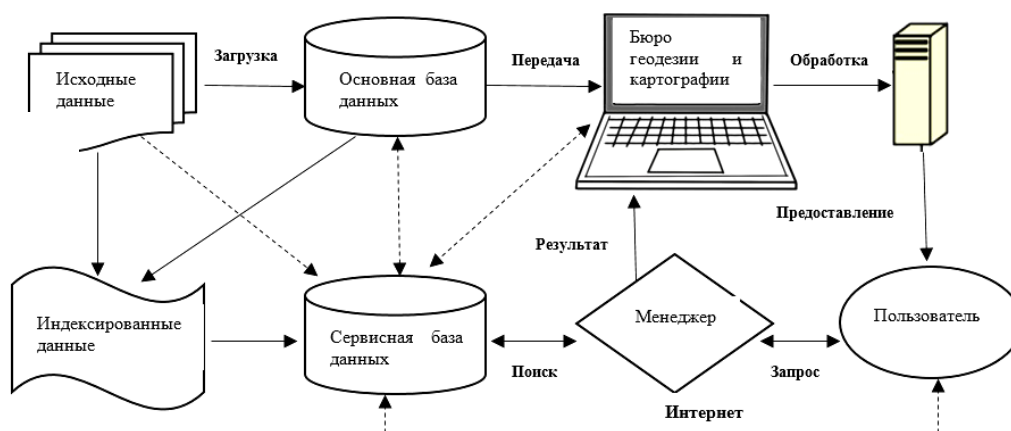


Рис. 4. Структура сети на основе геопро пространственной информации [14]

В настоящее время существует ряд коммерциализированных отечественных программных продуктов ГИС. Программы MapGIS, GeoStar, CityStar, Map Engine и SuperMap являются одними из популярных частей коммерческого программного обеспечения платформы ГИС. Программы AF Internet GIS, CD WebGIS, GeoBeans и GeoSurf – это популярные части программного обеспечения для веб-сайтов GIS. По статистическим данным 2015 г. отечественное программное обеспечение ГИС захватило около 40 % внутреннего рынка [13].

Взаимодействие двух стран в области ИПД. Можно сказать, что развитие ИПД в Китае и России показало внушительные результаты. Однако многие вопросы, связанные с разработкой и применением вертикально и горизонтально интегрированных геопро пространственных баз данных и коммуникационных сетей, все еще остаются нерешенными, и отсутствуют необходимые институциональные механизмы для эффективного потока геопро пространственной информации и обмена ею. Следует отметить, что в 2017 г. Министерством экономического развития Российской Федерации и Министерством земельных и природных ресурсов Китайской Народной Республики подписан меморандум о взаимопонимании и сотрудничестве. Подписание состоялось в ходе визита министра земельных и природных ресурсов КНР Цзян Дамин в Россию для обмена опытом и обсуждения вопросов двустороннего сотрудничества. С российской стороны документ подписал заместитель министра экономического развития РФ Алексей Груздев. Меморандум закрепляет намерения сторон обмениваться опытом и информацией в области государственной регистрации прав, кадастрового учета недвижимости, а также ИПД. Для этого российские и китайские специалисты намерены обмениваться учебно-ознакомительными визитами, проводить совместные семинары и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция создания и развития инфраструктуры пространственных данных РФ: распоряжение Правительства РФ № 1157-р от 21.08.2006 // *Межотраслевой журнал навигационных технологий Глонасс*. URL: <http://vestnik-ghonass.ru/ugolok-chitatel'ya/dokument.php?ID=1349> (дата обращения: 12.02.2021).
2. Кошкарев А.В. Директива INSPIRE и национальные инициативы по ее реализации // *Пространственные данные*. 2009. № 2. С. 6–11.
3. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: Федер. закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ. URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 12.02.2021).
4. Агафонов В.Н. Требования и спецификации в разработке программ. М.: Мир, 1984. 346 с.
5. Кошкарев А.В. Инфраструктуры пространственных данных РФ и стандарты для Европейской инфраструктуры пространственных данных // *Пространственные данные*. 2008. № 3. С. 6–13.
6. Бычков И.В. Инфраструктура информационных ресурсов и технологии создания информационно-аналитических систем территориального управления. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2016. 240 с.
7. Jin X. Construction of the National Spatial Data Infrastructure under China's Digital Earth Development Strategy. *Towards Digital Earth: Proceeding of the International Symposium on Digital Earth*. Science Press, 1999, pp. 1–3.
8. Xu G.H. Development of GIS Industry in China. *GIS World*. 1998. No. 1, pp. 1–5.
9. Development of Geographic Information Systems (GIS) in China: An Overview / J. Chen [et al.]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2002. No. 68 (4), pp. 325–332.
10. Li D. Some Problems in Developing Geomatics Industry in China: Data, Software and Products. *GIS World*. 1997. No. 4, pp. 4–6.
11. Colema D.J., McLaughlin J., Nichols S. Building a Spatial Data Infrastructure. *Proceedings of 64th FIG Permanent Committee Meeting. GIS World. Singapore*. 1997, pp. 91–103.
12. Official Website of the Chinese GIS Association. URL: <http://www.cagis.org.cn/> (date of access: 12.02.2021).
13. Zhou Q., Li B. A Tentative View on GIS Software Development in China. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2001. No. 68 (4), pp. 333–340.
14. Chen J., Chen X. Development of the National Spatial Data Infrastructure in China: Progress and Applications. *Journal of Geospatial Engineering*. 2003. No. 2, pp. 1–10.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРЫЛОВА Валерия Викторовна – магистрант кафедры геодезии и кадастра, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: valerochka.krylov96@mail.ru

СТЕПАНОВА Людмила Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и кадастра, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: lusitver@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Крылова В.В., Степанова Л.А. Обзор инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации и Китайской Народной Республики // Вестник Тверского государ-

ственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 24–32.

OVERVIEW OF THE SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION AND THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

V.V. Krylova, L.A. Stepanova
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The analysis of domestic and foreign experience in the field of spatial data infrastructure design is presented. The article discusses the stages of development, structure and elements of the spatial data infrastructure of the Russian Federation and the people's Republic of China.

Keywords: spatial data infrastructure, SDI, China, GIS, GPS.

REFERENCES

1. Concept of Creation and Development of Spatial Data Infrastructure of the Russian Federation: Order of the Government of the Russian Federation No. 1157-R of 21.08.2006. URL: <http://vestnik-ghonass.ru/ugolok-chitatelya/dokument.php?ID=1349> (date of access: 12.02.2021).
2. Koshkarev A.V. The INSPIRE Directive and national initiatives for its implementation. *Spatial Data*. 2009. No. 2, pp. 6–11.
3. On information, information technologies and information protection: Federal Law No. 149-FZ of 27.07.2006. URL: <http://www.consultant.ru/> (date of access: 12.02.2021).
4. Agafonov V.N. Requirements and Specifications for Program Development. Moscow: Mir, 1984. 346 p.
5. Koshkarev A.V. Spatial Data Infrastructures of the Russian Federation and Standards for the European Spatial Data Infrastructure. *Spatial Data*. 2008. No. 3, pp. 6–13.
6. Bychkov I.V. Infrastructure of Information Resources and Technologies for Creating Information and Analytical Systems of Territorial Administration. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016. 240 p.
7. Jin X. Construction of the National Spatial Data Infrastructure under China's Digital Earth Development Strategy. *Towards Digital Earth: Proceeding of the International Symposium on Digital Earth*. Science Press, 1999, pp. 1–3.
8. Xu G.H. Development of GIS Industry in China. *GIS World*. 1998. No. 1, pp. 1–5.
9. Development of Geographic Information Systems (GIS) in China: An Overview / J. Chen [et al.]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2002. No. 68 (4), pp. 325–332.
10. Li D. Some Problems in Developing Geomatics Industry in China: Data, Software and Products. *GIS World*. 1997. No. 4, pp. 4–6.
11. Colema D.J., McLaughlin J., Nichols S. Building a Spatial Data Infrastructure. *Proceedings of 64th FIG Permanent Committee Meeting. GIS World. Singapore*. 1997, pp. 91–103.
12. Official Website of the Chinese GIS Association. URL: <http://www.cagis.org.cn/> (date of access: 12.02.2021).
13. Zhou Q., Li B. A Tentative View on GIS Software Development in China. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2001. No. 68 (4), pp. 333–340.

14. Chen J., Chen X. Development of the National Spatial Data Infrastructure in China: Progress and Applications. *Journal of Geospatial Engineering*. 2003. No. 2, pp. 1–10.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KRYLOVA Valeria Viktorovna – Master's Student of the Department of Geodesy and Cadastre, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: valerochka.krylov96@mail.ru

STEPANOVA Lyudmila Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Cadastre, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: lusitver@gmail.com

CITATION FOR AN ARTICLE

Krylova V.V., Stepanova L.A. Overview of the Spatial Data Infrastructure of the Russian Federation and the People's Republic of CHINA // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology»*. 2021. No. 1 (9), pp. 24–32.

УДК 621.876

АРХИТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНАЯ СРЕДА В ЭКРАННОЙ УРБАНИСТИКЕ

В.В. Федоров, М.В. Федоров

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Федоров В.В., Федоров М.В., 2021

Аннотация. Роль образа города в кинематографе обусловлена доминированием мегаполисов и агломераций в современном мире и практически неограниченными возможностями компьютерного моделирования визуальной среды. Архитектурно-ландшафтная среда – атрибут практически любого киноповествования – выполняет множество функций, которые подробно исследованы в настоящей статье. Отмечено, что в силу большого жизненного цикла зданий и сооружений среда, в которой предстоит жить следующим поколениям, фактически уже существует и представляет собой архитектуру проспективного (обозримого будущего). Показано, что компьютерные технологии генеративного дизайна и параметрического проектирования архитектурно-ландшафтной среды позволяют изучать широкое пространство проспективных архитектурно-ландшафтных решений в сфере кинематографа.

Ключевые слова: архитектурная среда проспективного (будущего), кинообраз среды, компьютерные технологии моделирования среды.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-32-40

Интерес к кинообразу города будущего не иссякает, поскольку связан с неуклонно возрастающей ролью мегаполисов и агломераций, объединяющих в себе пространства не только архитектурно-ландшафтные, но и хозяйственно-бытовые, правовые и рыночные,

а также пространства властных отношений и пр. Современный человек находится преимущественно в городской среде, воплощающей идеалы, мечты, эмоции, амбиции и материально-технические возможности предыдущих поколений. Присутствует и природная среда, но она модифицирована, во многом носит антропогенный характер, фрагментирована и воспринимается как территория, приспособленная для определенной жизнедеятельности. Усиливающееся доминирование урбанизированной среды, все более и более интенсивное использование архитектурных пространств, а также новые возможности освоения подземной и надземной среды разжигают интерес людей к образу города будущего.

Архитектурно-ландшафтная среда – атрибут практически любого киноповествования. Будучи повседневной или уникальной, привлекательной или нарочито уродливой, эта среда играет очень важную роль в достижении художественных целей, которые ставят перед собой создатели фильма. Нередко специально спроектированное здание (интерьер/экстерьер) или сооружение становится лейтмотивом фильма (яркий пример – архитектурные творения Дж. Лотнера 1949–1968 гг.: The Schaffer House, «Ресторан Генри», The Chemosphere Residence, The Sheats–Goldstein Residence, Garcia House, The Elrod House и др.). Однако чаще в этой роли, унаследованной кинематографом от беллетристики, выступает масштабный (обозримый) фрагмент городской среды или поселение в целом.

Являясь важным элементом виртуального киномира, *архитектурно-ландшафтная среда перспективного (ближайшего будущего)* выполняет функции:

1) привязывает происходящее к определенной местности (или, напротив, целенаправленно разрушает любую возможность подобного соотнесения);

2) с помощью морфологических особенностей предметно-пространственного наполнения городской среды задает стартовые позиции ценностно-смысловых трактовок происходящего на экране;

3) выстраивает типологию пространств (салюберогенных, т.е. интегрально благоприятных, драматических, принудительных, депрессивных, патологических), в которых разворачивается кинодействие [1, с. 92–95];

4) задает динамическую хронологическую шкалу, на которой размечены положение и протяженность действий (от конкретных дат в документальном кино до полной неопределенности времени в игровых фильмах (например, в жанре фэнтези)).

Ретроспективный взгляд в кинематографе реализуется достаточно просто. Во многих европейских городах власти всеми силами препятствуют сооружению воздушных электролиний (проводов, кабелей), изменению внешнего облика исторических зданий, поэтому в самом простом случае достаточно демонтировать часть торговых вывесок, разместить на улице ретротранспорт и статистов в исторических костюмах, чтобы воссоздать атмосферу прошлого для киносъемок. Более того, IT-технологии позволяют убрать «приметы времени» в каждом отдельном кадре.

Появление на экране перспективной архитектурно-ландшафтной среды (как визуального образа города ближайшего будущего) связано исключительно с возможностями компьютерной графики. При этом возникает проблема определения семантики виртуальной среды в пространстве социального бытия (суждений в модальности долженствования, которые оказываются значимыми и релевантными актуальной пространственной ситуации).

Сформированная в течение тысячелетий база знаний об архитектуре дает возможность построить (в первую очередь исходя из триады Витрувия *«польза – прочность – красота»*) самые различные онтологии, имплицитно присутствующие в любом дискурсе созидания искусственных элементов потенциально возможного материального мира. Ответ на вопрос «что будет существовать?» предполагает максимально полный учет динамических контекстов (технического, социокультурного, экологического, экономического и пр.). Формирование подобных онтологий (метамodelей) означает оперирование в первую очередь языком существующих архитектурных практик. В сопоставлении с ними виртуальная архитектурно-ландшафтная среда должна иметь не только внешнее сходство, но и равнозначность и онтологическое равенство [2, с. 124].

Параллельно возникает проблема взаимообусловленности динамики социального бытия и архитектурной среды [3]. Высокая инерционность архитектурно-ландшафтной среды часто не соответствует быстро меняющимся требованиям к ее функциональному содержанию, которое становится все более расплывчатым, активно контаминирующим с контекстом. На экране часто появляются объекты, назначение которых определяется лишь в самых общих чертах: «агора», центр досуга, торгово-офисный или развлекательный центр, апартаменты, спортивно-рекреационный комплекс и пр.

Функциональный подход к архитектуре проспективного означает понимание:

- 1) функциональной организации здания или сооружения, воплощенного в конструктивных элементах (конструктивной системе и схемах);
- 2) инженерного оборудования;
- 3) взаимоотношений с разнообразными контекстами;
- 4) общих принципов создания, эксплуатации, развития (трансформации, адаптации).

Названные моменты должны находить отражение во внешнем облике проспективной архитектурно-ландшафтной среды, потому что холод и жара, внешние нагрузки и воздействия, особенности организации людских потоков и санитарно-гигиенические факторы неустранимы.

С другой стороны, классический подход к социальным изменениям предполагает рассмотрение другого плана онтологии [2, с. 21]: человеческих индивидов, взаимодействий, систем/структур элементов как целого, подсистем, границ, окружения/соседства и пр. При этом подобная модель нуждается в более широком контексте (по мнению П. Штомпки, это природа, антропогенная среда, массовое сознание и др.), вне которого невозможно существование социума. В частности, архитектурно-ландшафтная среда городских и сельских поселений («контейнер, в котором помещается социальная жизнь») может выступать:

- 1) негативным ограничителем (руинированная, технически и функционально изношенная застройка);
- 2) позитивным фактором развития (наличие ресурсов, высокий уровень благоустройства, развитые инженерные, транспортные и социальные инфраструктуры).

Для лучшего понимания формирования виртуальной архитектурно-ландшафтной среды в его взаимосвязи с системой социальных изменений важен многомерный взгляд на логику развития городской среды. Сегодня непрерывно изменяющееся общество воспринимается как сеть отношений с зонами напряжений, разрывов, конфликтов и самовосстановления. В нем постоянно возникают отклонения от стандартов поведения, предписываемые/допускаемые культурными и институциональными нормами.

На первый взгляд, архитектурная среда внешне отличается неизменностью (исключая ситуации стихийных бедствий, боевых действий или неравенства). Жизненный цикл объектов архитектурно-ландшафтной среды города, как правило, составляет 125–150 лет (5–6 поколений). Современные здания и сооружения, рассчитанные на десятилетия и столетия непрерывного использования, все в большей степени испытывают влияние социальной действительности как агента изменений стратегий:

- а) определения жизненного цикла;
- б) различных подходов к переустройству;
- в) санации опорного фонда.

Все более актуальными становятся вопросы, связанные с практической реализацией семантических подходов для описания онтологических моделей зданий и сооружений, основанных на методах и технологиях управления знаниями, а также способы их использования для согласования функциональных и структурных описаний строительной системы.

В подобной парадигме здание или сооружение «должно находить способы поведения» [4–6], чтобы пользователи/зрители оценили новые возможности, и найти решения для их реализации. При этом конструктивная система / схема зданий и сооружений будущего должна быть максимально «очищена» от привычных взгляду современных конструктивных элементов и инженерных систем, ограничивающих возможности интерпретации. Если говорить общими словами, формирование архитектурной среды проспективного основано на принципах генеративного и параметрического проектирования [7, с. 232–235] и будет характеризоваться:

- 1) исключительной сложностью формы внешних ограждающих конструкций;
- 2) большими пролетами и шагами для создания крупногабаритных «перетекающих интерьерных объемов», разноуровневых плоскостных сооружений, вместительных зрительных залов и т.п.;
- 3) вертикальными несущими конструкциями здания, выполненными в виде сквозных башен технического обслуживания, в которых будут расположены лифты, воздухопроводы, коллекторы для трубопроводов различного назначения;
- 4) нефиксированным положением мобильных перекрытий, благодаря которому можно менять высоту помещений или организовывать атриумы («пустоты») и открытые пространства на любом (включая минусовые) уровне;
- 5) блоками лестниц, лифтов, эскалаторов и траволаторов, а также элементами гелиосистем, светоотражающими конструкциями, аккумуляторами тепловой энергии (для использования в ночное время и пасмурную погоду), положение которых при необходимости можно изменить;
- 6) подъемно-транспортным оборудованием в структуре сооружения (включенным в блок покрытия или расположенным под/над ним), благодаря которому не нужно будет использовать сложную технику для переустройства здания на протяжении его жизненного цикла;
- 7) трансформацией облика здания (в диапазоне от «глухого» параллелепипеда до ступенчатой, многобашенной или сквозной структуры).

По мнению визионеров, функциональный план, характер и ключевые моменты детерминации качества жизненной среды не изменятся [13–15]. В аналитической психологии архетип дома/здания (по К. Юнгу) относится к личному и коллективному бессознательному. В массовой культуре это образное выражение микро- и макрокосмоса

человека, защищенного места, спокойной обители. Именно поэтому символическое изображение зданий, замков, крепостей (т.е. мест единения людей в поисках защиты от непогоды или врага) широко используется в геральдике и означает устойчивость, прочность, надежность, неизменность. Восприятие и понимание архитектурно-ландшафтной среды проспективного означает «разрыв шаблона» (неожиданность, потрясение базовых представлений о городской среде). Результат (а тем более сам процесс) возникновения, трансформации или разрушения такой среды, показанный на экране, – это всегда зрелище, оставляющее очень сильное впечатление [8].

С момента появления градостроительства населенное место (совокупность зданий и сооружений) возникало вокруг некой «оси мира», т.е. средства связи между подземным/потусторонним, наземным/существующим и надземным/небесным (иначе говоря, прошлым, настоящим и будущим). В архетипическом отношении архитектура проспективного является символической копией Космической Горы, Мирового Древа, т.е. означает нечто стабильное, неизменяемое, обеспечивающее субъекту защиту от всех невзгод.

Применение технологий искусственного интеллекта в проектировании архитектурно-ландшафтной среды проспективного означает уменьшение роли человека, сведение ее преимущественно к итоговой оценке оптимизированных решений [7, с. 232]. При этом компьютерные технологии *генеративного дизайна* позволяют исследовать широкое пространство проспективных проектных решений (обычно – десятки тысяч вариантов). Другой подход – *параметрическое (алгоритмическое) проектирование* архитектурной среды. В конечном счете создатели архитектурно-ландшафтной среды в кинематографе выделяют важные (в первую очередь с художественной точки зрения) параметры и, меняя их, получают необходимое количество вариантов-образов. При любом подходе компьютерная топологическая оптимизация архитектурно-ландшафтной среды будущего открывает совершенно новые и неожиданные возможности в сфере кинематографии [9].

Образ архитектурно-ландшафтной среды города – понятие более широкое, чем образ художественный, поскольку может включать в себя черты эстетического плана, а также элементы морфологического (геометрические формы, линии, свет, цвет, фактуру) и образы-символы (образы-ассоциации). При этом проспективное «возникает как результат субъективного отражения действительности в сознании человека и включает творческий момент, берущий начало в избирательности и возможностях человека. Облик – реальная действительность, образ – творчески интерпретированная» [10, с. 5].

Говоря об архитектурно-ландшафтной среде проспективного, мы осознанно оставляем вне зоны нашего внимания концепции утопических городов (Т. Мора, Э. Кабе, Т. Кампанеллы и др.), города-сада будущего (Э. Говарда и его последователей), а также другие проекты, касающиеся преимущественно планировочной и функциональной организации разномасштабных поселений. Действительность опровергает представления о том, что крупные города изжили себя, «что нет большого удовольствия и смысла жить в огромном, грязном и неудобном городе, если можно переехать в небольшой населенный пункт, практически деревню, которая при этом сохраняет все лучшие черты мегаполиса» [11].

Планировочные решения идеальных городов всегда основывались на регулярном характере застройки: радиально-кольцевой (А. Филарете, Франческо ди Джоржо Мартини, Фра Джокондо, Антонио да Сангалло мл.), ортогональной (Мартини, Франческо де Марки)

или сочетающей в себе различные подходы (Б. Перуцци, Пьетро Катанео). Понятно, что выбор планировочной структуры поселения обуславливался не только и не столько характером рельефа, наличием водоемов, розой ветров и другими природными факторами, но еще и мифосимволическим аспектом. Однако описания и даже выполненные на их основе изображения сегодня способны произвести впечатление лишь на узкий круг профессионалов, а не на массового кинозрителя.

Небезынтересно обобщить представления кинофутурологов и разного сорта визионеров по следующим параметрам:

- 1) присутствие высотных зданий и сооружений (вплоть до появления «вертикальных городов»);
- 2) наличие зданий и сооружений, существующих за рамками современных представлений о технических возможностях некоторых объектов (едва ли возможных с точки зрения прочностных свойств материалов, обеспечения устойчивости, преодоления силы тяжести и пр.);
- 3) наличие сверхплотной застройки;
- 4) большие массивы зеленых насаждений;
- 5) присутствие водоемов и водотоков в городской черте.

Если сравнить современные кинообразы городов будущего с футуристическими литературными образами, например, XIX и XX вв., то можно отметить [8, с. 112]:

- 1) расширение масштабов зданий и сооружений, которые впоследствии нередко приобретают монструозный облик (общее настроение усиливается дымкой, полутьмой, нечеткостью изображений, осознанным пренебрежением деталями);
- 2) огромное количество летательных аппаратов, уличного транспорта, многоуровневых эстакад и т.п.;
- 3) множество зеленых насаждений и водоемов (вследствие осознания важности экологического аспекта городской жизни), а также взаимопроникновение зданий и объектов инженерной инфраструктуры.

Архитектурно-ландшафтная среда проспективного в кинематографе не зависит от жанра, будь то фантастика, стремящаяся с точки зрения науки объяснить мир, в котором происходит действие фильма, или фэнтэзи, включающее мифологические и сказочные мотивы, но оперирующее (вместо законов природы) некими системно действующими нормами.

Можно сделать следующие выводы:

1. Характерная особенность архитектурно-ландшафтной среды, появляющейся на экране, – изменчивая многофункциональность при доминировании традиционной (квартальной, параллелепипедной) архитектурной оболочки. Одной из наиболее важных проблем становится адаптация архитектурно-планировочных решений к новым функциональным задачам.

2. Предметно-пространственная среда, в которой будут жить следующие поколения, уже существует и представляет собой *архитектуру проспективного (обозримого будущего)*.

3. Типология приемов формирования экранного облика городской среды будущего предполагает новые возможности:

- 1) изменение функций помещений;
- 2) корректировку объемно-планировочных решений;
- 3) усложнение формы локальных пространств;

4) осуществление конструктивных изменений и замену инженерного оборудования.

4. Нередко архитектурно-ландшафтная среда проспективного имеет непривычный, шокирующий облик. Создатели подобных произведений в погоне за оригинальностью часто сознательно отказываются от общепринятой логики. При этом города проспективного в фильмах разных авторов удивительным образом похожи друг на друга (т.е. уже выработаны определенные шаблоны). Складывается впечатление, что сценаристов и режиссеров пугает будущее, а этот страх материализуется в кинообразе города: «никакая» архитектура, отсутствие солнца, выбросы пара и дыма непонятного происхождения, сырость, шум, толпы на улицах, активное движение и т.д.

5. Другая крайность заключается в том, что архитектурно-ландшафтная среда проспективного настолько «перегружена» привычными современному человеку элементами, что кинообраз не отличается от того, что нас окружает в действительности, просто «подкрашен» экзотическими видами транспорта или одежды киногероев. В любом случае архитектурно-ландшафтная среда проспективного индуцирует общую атмосферу и способствует разведению результатов восприятия по полюсам шкалы самоощущения зрителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров В.В., Коваль И.М. Мифосимволизм архитектуры. М.: Либроком, 2009. 208 с.
2. Штомпка П. Социология социальных изменений. М.: Аспект Пресс, 1996. 416 с.
3. Левиков А.В. Взаимообусловленность динамики социального бытия и архитектурной среды: дис. ... канд. филос. наук. М., 2017. 148 с.
4. Столярова О.Е. Онтология артефактов: жизненный мир как общая мера // *Онтология артефактов: взаимодействие «естественных» и «искусственных» компонентов жизненного мира*. М.: Дело, 2012. С. 7–17.
5. Matthews S. From Agit-Prop to Free Space: The Architecture of Cedric Price. London. 2007. 264 p.
6. Пименова Е.В., Шумейко В.И. Трансформация в архитектуре уникальных общественных зданий // *Инженерный вестник Дона*. 2016. № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3939 (дата обращения: 12.01.2020).
7. Федоров В.В., Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Скудалов П.О. Актуальные проблемы и методология строительной науки. М.: ИНФРА-М, 2020. 262 с.
8. Федоров В.В. Архитектурный текст: очерки по восприятию и пониманию городской среды. М.: ЛЕНАНД, 2016. 160 с.
9. Города будущего: 10 уникальных проектов. URL: <http://www.qwrt.ru/news/1383> (дата обращения: 02.08.2020).
10. Белоусов В.Н., Кулага Л.Н., Лавров В.А., Смоляр И.М., Гозак А.П., Сейтхалилов Л.И., Соколов Л.И., Бекина Н.Б., Зайцев В.Т., Бочаров Ю.П., Голубева Т.П., Трубникова Н.М., Вергунов А.П., Евреинов Ю.Н., Ткачиков И.Н., Чесноков А.И. Основы формирования архитектурно-художественного облика городов. М.: Стройиздат, 1981. 324 с.
11. Город-сад – красивые градостроительные концепции прошлого и будущего. URL: <http://econet.ru/articles/14720> (дата обращения: 10.09.2020).
12. Рагон М. Города будущего. М.: Мир, 1969. 245 с.

13. Города будущего: 100 фантастических иллюстраций. URL: <http://econet.ru/articles/14720> (дата обращения: 10.09.2020).
14. Дежурка: дизайн-журнал номер один. URL: <http://www.dejurka.ru/inspiration> (дата обращения: 10.09.2020).
15. Graphicon Art. URL: <http://www.graphiconart.com> (дата обращения: 10.09.2020).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДОРОВ Виктор Владимирович – доктор культурологии, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vvf322@yandex.ru

ФЕДОРОВ Михаил Викторович – доцент кафедры менеджмента, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vvf322@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Федоров В.В., Федоров М.В. Архитектурно-ландшафтная среда в экранной урбанистике // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 32–40.

ARCHITECTURAL AND LANDSCAPE ENVIRONMENT IN URBAN PLANNING SCREEN

V.V. Fedorov, M.V. Fedorov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that the role of the image of the city in cinema is due to the dominance of megacities and agglomerations in the modern world, as well as and the practically unlimited possibilities of computer modeling of the visual environment. Architectural and landscape environment-an attribute of almost any film narrative-performs the following functions. It is stated that due to the large life cycle of buildings and structures, the environment in which the next generation will live de facto already exists, representing the architecture of the prospective (foreseeable future). It is shown that computer technologies of generative design and parametric design of architectural and landscape environment allow us to explore a wide range of prospective architectural and landscape solutions in the field of cinematography.

Keywords: architectural environment of the prospective (future), film image of the environment, computer technology of environment modeling.

REFERENCES

1. Fedorov V.V., Koval I.M. Mythosymbolism of Architecture. Moscow: Librokom, 2009. 208 p.
2. Shtompka P. Sociology of Social Change. Moscow: Aspect Press, 1996. 416 p.
3. Levikov A.V. Interdependence of the Dynamics of Social Existence and the Architectural Environment: Cand. Diss (Filosof). Moscow, 2017. 148 p. (In Russian).

4. Stolyarova O.E. *Ontology of Artifacts: the Life World as a General Measure. Ontology of Artifacts: Interaction of «Natural» and «Artificial» Components of the Life World.* Moscow: Delo, 2012, pp. 7–17.
5. Matthews S. *From Agit-Prop to Free Space: The Architecture of Cedric Price.* London, 2007. 264 p.
6. Pimenov E.V., Shumeiko V.I. Transformation in the Unique Architecture of Public Buildings. *Engineering Bulletin of the Don.* No. 4 (2016). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3939> (date of access: 12.01.2020).
7. Fedorov V.V., Subbotin S.L., Barkaya T.R., Skudalov P.O. *Actual Problems and Methodology of Construction Science.* Moscow: INFRA-M, 2020. 262 p.
8. Fedorov V.V. *Architectural Text: Essays on Perception and Understanding of the Urban Environment.* Moscow: LENAND, 2016. 160 p.
9. *Cities of the Future: 10 Unique Projects.* URL: <http://www.qwrt.ru/news/1383> (date of access: 02.08.2020).
10. Belousov V.N., Kulaga L.N., Lavrov V.A., Smolyar I.M., Gozak A.P., Seithalilov L.I., Sokolov L.I., Bekina N.B., Zaicev V.T., Bocharov Yu.P., Golubeva T.P., Trubnikova N.M., Vergunov A.P., Evreinov Yu.N., Tkachikov I.N., Chesnokov A.I. *Fundamentals of the Formation of Architectural and Artistic Appearance of Cities.* Moscow: Stroyizdat, 1981. 324 p.
11. *A Garden City – Beautiful Planning Concepts of the Past and the Future.* URL: <http://econet.ru/articles/14720> (date of access: 10.09.2020).
12. Ragon M. *Cities of the Future.* Moscow: Mir, 1969. 245 p.
13. *Cities of the Future: 100 Fantastic Illustrations.* URL: <http://econet.ru/articles/14720> (date of access: 10.09.2020).
14. *Dezhurka: Design Magazine Number One.* URL: <http://www.dejurka.ru/inspiration> (date of access: 10.09.2020).
15. *Graphicon Art.* URL: <http://www.graphiconart.com> (date of access: 10.09.2020).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

FEDOROV Viktor Vladimirovich – Doctor of Cultural Sciences, Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vvf322@yandex.ru

FEDOROV Mikhail Viktorovich – Associate Professor of the Department of Management, Tver State Technical University, 22, embankment Af. Nikitin, Tver, 170026. E-mail: vvf322@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Fedorov V.V., Fedorov M.V. Architectural and Landscape Environment in Urban Planning Screen // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology».* 2021. No. 1 (9), pp. 32–40.

УДК 624.046.3

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ ДЛЯ ТРАЕКТОРИЙ В ВИДЕ ОКРУЖНОСТЕЙ И ДУГ ОКРУЖНОСТЕЙ В ПРОГРАММЕ ДЛЯ ЭВМ

С.В. Черемных

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Черемных С.В., 2021

Аннотация. Рассмотрен вопрос влияния учета сложного характера нагружения в момент бифуркации на критические параметры напряжений и деформаций при реализации процессов сложного докритического деформирования круговой цилиндрической оболочки в координатной плоскости \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3 . Уравнения связи напряжений и деформаций при построении образа процесса нагружения приняты в соответствии с определяющими соотношениями гипотезы компланарности [1–3]. Материальные параметры p и q аппроксимаций определяющих функций пластичности при теоретическом построении образа процесса нагружения приняты по принципу наилучшего приближения к опытным данным. Предложены инновационные методы решения задачи устойчивости при сложном нагружении для траекторий в виде окружностей и дуг окружностей.

Ключевые слова: программа для ЭВМ, устойчивость, бифуркация, оболочка, сложное нагружение, траектория, напряжение, деформация.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-41-49

ВВЕДЕНИЕ

При использовании материальных ресурсов проектировщики допускают, что в конструкциях могут возникнуть пластические деформации. Если учитывать упруго-пластическую стадию деформирования, можно значительно повысить надежность инженерных расчетов (даже при работе в пределах упругости) за счет более точной оценки предельных нагрузок и коэффициентов запаса устойчивости.

Вопросы применения оболочечных конструкций в авиации, космонавтике, строительных сооружениях и машиностроении, а также учета их работы в экстремальных условиях, т.е. при возникновении пластических деформаций, поставили исследования закономерностей упругопластического деформирования конструкционных материалов при сложном нагружении и деформировании в ряд наиболее важных и актуальных задач механики деформируемого твердого тела и строительной механики в целом.

Как известно, в механике деформируемого твердого тела трудным является вопрос построения определяющих соотношений за пределом упругости при сложном процессе нагружения. Если отбросить чисто математические задачи, то в описании потери устойчивости за пределом упругости имеются две сложности. Первая – правильно определить напряженно-деформированное состояние до потери устойчивости; вторая – построить соотношения, определяющие связь между приращениями тензора деформаций и

приращением тензора напряжений [4]. Стоит помнить, что расчет оболочек – это трудоемкая инженерная задача, требующая от расчетчика владения основами математического аппарата и программно-вычислительных комплексов.

В современных программных комплексах существует ряд алгоритмов, решающих задачи устойчивости по различным теориям, наиболее современными из которых являются теории устойчивости А.А. Ильюшина и теории устойчивости при сложном нагружении В.Г. Зубчанинова. При этом не существует программ ЭВМ, в полной мере учитывающих особенности сложного нагружения в момент потери устойчивости оболочек за пределом упругости.

Статья 1261 Гражданского кодекса РФ гласит: «Программой для ЭВМ является представленная в объективной форме совокупность данных и команд, предназначенных для функционирования ЭВМ и других компьютерных устройств в целях получения определенного результата, включая подготовительные материалы, полученные в ходе разработки программы для ЭВМ, и порождаемые ею аудиовизуальные отображения».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение устойчивости тонкостенных упругопластических систем при сложном напряженном состоянии и нагружении приводит к появлению новых теоретических и экспериментальных данных, которые имеют большое значение для разработки эффективных методов инженерного расчета сооружений [5–16].

Исследование устойчивости реальных конструкций затрудняется сложным характером процесса нагружения, поскольку сами определяющие соотношения для сложных процессов нагружения носят приближенный характер.

В данном случае задача включает две части: теоретическое построение образа процесса докритического нагружения и решение задачи бифуркации, в которой в каждой точке реализуемой траектории сложного докритического напряжения вычисляются значения компонент напряженного состояния и значение модуля вектора напряжений.

В математическом представлении уравнения зависимости напряжений и деформаций при построении образа процесса нагружения принимаются в соответствии с определяющими соотношениями гипотезы компланарности, которые в скоростях имеют вид [17, 18]:

$$\dot{S}_{ij} = N\dot{\mathcal{E}}_{ij} + (d\sigma/dS - N \cos \mathcal{Q}_1) \dot{S} \frac{S_{ij}}{\sigma} \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

где \mathcal{Q}_1 – угол сближения; $N, d\sigma/dS$ – определяющие функции процесса деформирования; \dot{S} – скорость изменения длины дуги траектории деформации. Символ с точкой наверху означает дифференцирование по обобщенному параметру времени $\frac{d}{dt} = \frac{d}{dS} \frac{dS}{dt}$.

Определяющие функции пластичности $N, d\sigma/dS$ можно описать аппроксимациями В.Г. Зубчанинова [17–19]:

$$N = 2G_p + [2G - 2G_p] \left(\frac{1 - \cos \mathcal{Q}_1}{2} \right)^p; \quad (2)$$

$$\frac{d\sigma}{dS} = 2G_k - [2G + 2G_k] \left(\frac{1 - \cos \vartheta_1}{2} \right)^q, \quad (3)$$

где G, G_k, G_p – модуль сдвига, касательный и секущий модули сдвига материала соответственно; p, q – материальные параметры аппроксимации, определяемые из экспериментов по плоскому вееру двухзвенных траекторий. Данные аппроксимации были апробированы на плоских многозвенных ломаных и криволинейных траекториях в работах [17–21].

Уравнение (1) в развернутом виде имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{11} &= N\dot{\varepsilon}_{11} + (d\sigma/dS - N \cos \vartheta_1) \frac{\dot{S}}{\sigma} S_{11}; \\ \dot{S}_{12} &= N\dot{\varepsilon}_{12} + (d\sigma/dS - N \cos \vartheta_1) \frac{\dot{S}}{\sigma} S_{12}; \\ \dot{S}_{22} &= N\dot{\varepsilon}_{22} + (d\sigma/dS - N \cos \vartheta_1) \frac{\dot{S}}{\sigma} S_{22}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{(\dot{\varepsilon}_{11}^2 + \dot{\varepsilon}_{22}^2 + \dot{\varepsilon}_{11}\dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{12}^2)}; \\ \sigma &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + 3\sigma_{12}^2}. \end{aligned}$$

Если в уравнениях (4) от компонент тензора-девиатора напряжений перейти к компонентам тензора напряжений, то получим [17, 18]:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{11} &= N(2\dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22}) + (d\sigma/dS - N \cos \vartheta_1) \dot{S} \sigma_{11} / \sigma; \\ \dot{\sigma}_{22} &= N(2\dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{11}) + (d\sigma/dS - N \cos \vartheta_1) \dot{S} \sigma_{22} / \sigma; \\ \dot{\sigma}_{12} &= N\dot{\varepsilon}_{12} + (d\sigma/dS - N \cos \vartheta_1) \dot{S} \sigma_{12} / \sigma. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения угла сближения ϑ_1 имеем

$$\dot{\vartheta} = - \left(\frac{\sigma \sin \vartheta_1}{N} - \chi_1 \right), \quad (6)$$

где χ_1 – кривизна траектории.

Уравнения (5) и (6) имеют вид уравнений задачи Коши, которую можно решить методом Рунге – Кутты. Зависимость $\sigma = \Phi(\vartheta) = \Phi(S)$ полагаем универсальной для простого нагружения.

Таким образом, в каждой точке траектории деформаций определяем компоненты напряженного состояния и решаем бифуркационную задачу.

Производить вычисления по данным уравнениям можно очень долго, поэтому метод Рунге – Кутты наиболее часто используется в различных математических пакетах (Maple, Mathcad, Maxima) для упрощения расчета. Именно поэтому задачу бифуркации оболочки с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости при сложном докритическом нагружении для траектории в виде окружностей и дуг окружностей было предложено решить на языке программирования Visual Basic for Applications (VBA).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Программа выполняет расчет на устойчивость цилиндрических оболочек, изготовленных из материалов со сложными механическими свойствами, поэтому ее можно использовать в области строительных сооружений, а также в машиностроении. Решается задача комплексного обоснования применяемой теории устойчивости цилиндрических оболочек с учетом сложного нагружения. Расчет в программе ведется по различным теориям устойчивости с учетом разгрузки материала. Вычисляются также параметры устойчивости при сжатии, кручении и комбинированном нагружении материала.

Расчеты выполнены М.Ю. Александровым для экспериментально реализованных процессов на оболочках из стали 45 [1, 2]. На рис. 1 показана двухзвенная траектория, которая реализуется во время растяжения до заданного процесса при $R = 1,5\%$ на первом звене и последующего выхода на траекторию радиуса R на втором [1, 2].

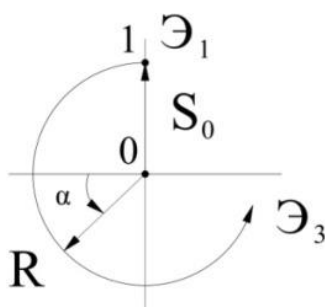


Рис. 1. Траектория деформирования

При выполнении расчета на ЭВМ в качестве исходных данных вводятся описания массивов, значения кривизн траекторий, количество точек, описание коэффициентов диаграммы деформирования, описание нулевой точки (точки излома), окончание описания нулевой точки и вывод результатов по точке излома.

Затем, при переходе на первый участок, задаются итерационный процесс, погрешности, исходные данные для бифуркации. Выполняется расчет начальных условий при нулевом приближении, решается алгебраическое уравнение при чисто пластической бифуркации, определяются промежуточные параметры нулевого приближения, рассчитываются интегралы и решается квадратное уравнение на первом приближении, а также определяются промежуточные параметры первого приближения.

Для второго участка определяется постоянная деформация кручения, задаются исходные данные для бифуркации. После этого выполняется расчет начальных условий в нулевом приближении, решается алгебраическое уравнение при чисто пластической бифуркации, определяются промежуточные параметры нулевого приближения, ведется расчет интегралов и решается квадратное уравнение на первом приближении, а кроме того, как и на первом участке, определяются промежуточные параметры первого приближения.

На рис. 2 представлены диаграммы критических напряжений, которые построены на основе данных, полученных в программе ЭВМ.

Цифрами на графике нумеруются различные кривые, созданные при последовательном переборе параметров p и q уравнений (2), (3).

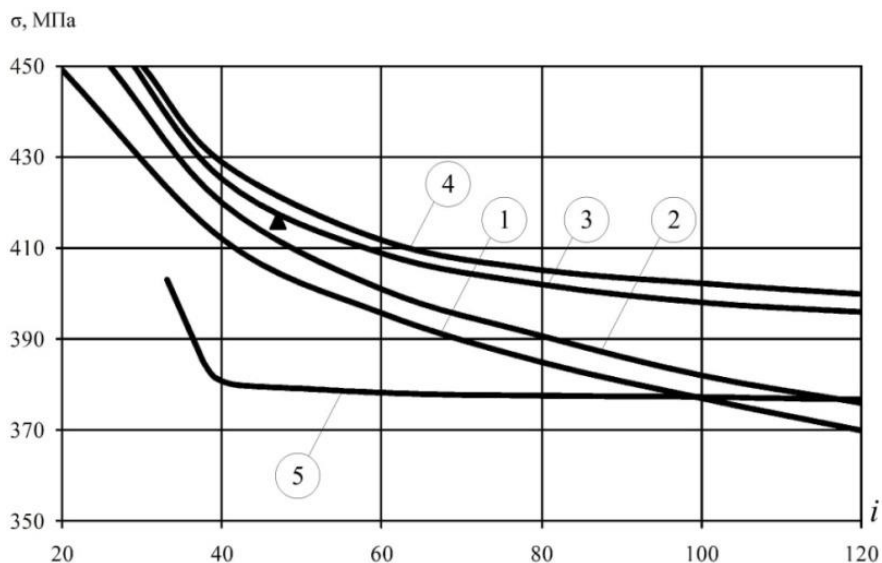


Рис. 2. Графики наименьшей гибкости оболочки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Квалификация механика определяется главным образом умением отбросить все второстепенное и сделать исследование максимально простым, поскольку математическая сложность постановки не является самоцелью. Именно для этого была разработана данная программа, которая позволяет существенно сократить трудозатраты исследователя, исключить непредвиденные ошибки и повысить уровень автоматизированной обработки экспериментального материала.

Решение задачи имеет большое значение в науке и практике, в том числе может пригодиться специалистам, занимающимся разработкой моделей пластичности, ресурса и надежности конструкций для машиностроительной, авиационной и нефтегазовой отраслей промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охлопков Н.Л., Соколов С.А., Черемных С.В. О решении задачи бифуркации оболочки при сложном нагружении // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Тверь: ТвГТУ, 2014. № 1 (25). С. 35–40.
2. Охлопков Н.Л., Соколов С.А., Черемных С.В. Решение задачи бифуркации цилиндрической оболочки с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости при сложном докритическом нагружении // *Известия МГТУ «МАМИ». Серия 3. Естественные науки*. 2013. № 1 (15). Т. 3. С. 96–100.
3. Охлопков Н.Л., Черемных С.В. Устойчивость тонкостенных упругопластических конструкций при реализации процессов сложного комбинированного деформирования // *Известия МГТУ «МАМИ». Серия 3. Естественные науки*. 2013. № 2 (24). Т. 4. С. 109–114.
4. Васин Р.А. Об экспериментальной аттестации базовых гипотез и моделей теории пластичности // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4. Ч. 4. С. 1415–1417.

5. Hart E.L., Hudramovich V.S. Application of the Projection-iterative Scheme of the Method of Local Variations to Solving Stability Problems for Thin-walled Shell Structures Under Localized Actions. *Strength of Materials*. 2018. Vol. 50. No. 6, pp. 852–858.
6. Jasion P., Magnucki K. Theoretical Investigation of the Strength and Stability of Special Pseudo-spherical Shells Under External Pressure. *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 93, pp. 88–93.
7. Kolosov G.I. Prediction of Instability of Equilibrium States of Compressed Composite Cylindrical Shells Under Power Perturbations. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Vol. 44. No. 5, pp. 428–433.
8. Kovalchuk P.S., Pelykh V.A., Kruk L.A. Stability of Composite Cylindrical Shells with Added Mass Interacting with the Internal Fluid Flow. *International Applied Mechanics*. 2014. Vol. 50, pp. 566–574.
9. Lukankin S.A., Paimushin V.N., Kholmogorov S.A. Non-classical Forms of Loss Stability of Cylindrical Shells Joined by a Stiffening Ring for Certain Forms of Loading. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2014. Vol. 78. No. 4, pp. 395–408.
10. Mazharimousavi S.H., Halilsoy M., Amen S.N.H. Stability of Spherically Symmetric Timelike Thin-shells in General Relativity with a Variable Equation-of-state. *International Journal of Modern Physics d*. 2017. Vol. 26. No. 14, 1750158.
11. Ning W.B., Wang D.Z., Zhang J.G. Dynamics and Stability of a Cylindrical Shell Subjected to Annular Flow Including Temperature Effects. *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur-Archiv)*. 2016. Vol. 86. No. 4, pp. 643–656.
12. Podvornyi A.V., Trach V.M., Semenyuk N.P. Stability of Inhomogeneous Cylindrical Shells under Distributed External Pressure in a Three-dimensional Statement. *International Applied Mechanics*. 2017. Vol. 53. No. 6, pp. 623–638.
13. H. Shen, J. Wen, D. Yu, B. Yuan, X. Wen. Stability of Fluid-conveying Periodic Shells on an Elastic Foundation with External Loads. *Journal of Fluids and Structures*. 2014. Vol. 46, pp. 134–148.
14. Sofiyev A.Y. On the Solution of the Dynamic Stability of Heterogeneous Orthotropic Viscoelastic Cylindrical Shells. *Composite Structures*. 2018. Vol. 206, pp. 124–130.
15. Tomczyk B., Szczerba P.A. A New Asymptotic-tolerance Model of Dynamic and Stability Problems for Longitudinally Graded Cylindrical Shells. *Composite Structures*. 2018. Vol. 202, pp. 453–481.
16. Van Dung D., Nga N.T., Vuong P.M. Nonlinear Stability Analysis of Stiffened Functionally Graded Material Sandwich Cylindrical Shells with General Sigmoid Law and Power Law in Thermal Environment Using Third-order Shear Deformation Theory. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2019. Vol. 21. No. 3, pp. 938–972.
17. Охлопков Н.Л., Соколов С.А., Черемных С.В. О границах раздела зон упругой разгрузки и пластической догрузки материала в решении задачи устойчивости круговой цилиндрической оболочки при простых докритических процессах // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. Орел: Госуниверситет УНПК, 2012. № 6-2 (296). С. 8–13.
18. Охлопков Н.Л., Черемных С.В. О предельных поверхностях критических напряжений и деформаций материала в решении задачи устойчивости круговой цилиндрической оболочки при простых процессах // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. Орел: Госуниверситет УНПК. 2012. № 5 (295). С. 30–36.

19. Cheremnykh S., Zubchaninov V., Gulyaev V. Deformation of Cylindrical Shells of Steel 45 Under Complex Loading. *XXII Int. Scientific Conf. «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019)*. Vol. 97, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704025.
20. Cheremnykh S., Kuzhin M. Solution of the Problem of Stability of 40X Steel Shell: Modelling and Methods of Structural Analysis. *Journal of Physics: Conf. Series. – IOP Publishing, 2020.* – Vol. 1425. 012191. DOI: 10/1088/17425/1/012191.
21. Cheremnykh S.V., Skudalov, P.O. SN-EVM Unit for Experimental Studies of Stability in Circular Cylindrical Shells Under Combined Loading: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Interstroyemeh – 2019. *IOP Conference Series, 2020.* Vol. 786. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012011.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЧЕРЕМНЫХ Степан Валерьевич – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: cheremnykh_s.v@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Черемных С.В. Решение задачи устойчивости при сложном нагружении для траекторий в виде окружностей и дуг окружностей в программе для ЭВМ // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 41–49.

SOLVING THE PROBLEM OF STABILITY UNDER COMPLEX LOADING FOR TRAJECTORIES IN THE FORM OF CIRCLES AND ARCS OF CIRCLES IN A COMPUTER PROGRAM

S.V. Cheremnykh

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Discusses the impact of the complexity of loading at the bifurcation at the critical parameters of stress and strain in the implementation of complex processes pre-critical deformation of a circular cylindrical shell in the coordinate plane $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$. The equations of the relationship between stresses and strains in the construction of the image of the loading process are accepted in accordance with the defining relations of the coplanarity hypothesis [1–3]. The material parameters p and q of the approximations of the determining plasticity functions in the theoretical construction of the image of the loading process are taken according to the principle of the best approximation to the experimental data. Proposed innovative methods to solve stability problems under complex loading trajectories of circles and circular arcs in the direction of structural mechanics and solid mechanics implemented in the developed computer program.

Keywords: computer program, stability, bifurcation, shell, complex loading, trajectory, tension, deformation.

REFERENCES

1. Ohlopkov N.L., Sokolov S.A., Cheremnykh S.V. On Solving the Problem of Shell Bifurcation Under Complex Loading. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. Tver: TvGTU, 2014. No. 1 (25), pp. 35–40. (In Russian).
2. Ohlopkov N.L., Sokolov S.A., Cheremnykh S.V. Solution of the Problem of Bifurcation of a Cylindrical Shell Taking Into Account the Complex Nature of Deformation at the Moment of Loss of Stability Under Complex Subcritical Loading. *Izvestiya MGTU «MAMI». Seriya 3. Estestvennienauki*. 2013. No. 1 (15). No. 3, pp. 96–100. (In Russian).
3. Ohlopkov N.L., Cheremnykh S.V. Stability of Thin-walled Elastic-plastic Structures in the Implementation of Complex Combined Deformation Processes. *Izvestiya MGTU «MAMI». Seriya 3. Estestvennie nauki*. 2013. No. 2 (24). No. 4, pp. 109–114. (In Russian).
4. Vasin R.A. Experimental certification of basic hypotheses and models of plasticity theory. *Vestnik Nijegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. No. 4, pp. 1415–1417. (In Russian).
5. Hart E.L., Hudramovich V.S. Application of the Projection-iterative Scheme of the Method of Local Variations to Solving Stability Problems for Thin-walled Shell Structures Under Localized Actions. *Strength of Materials*. 2018. Vol. 50. No. 6, pp. 852–858.
6. Jasion P., Magnucki K. Theoretical Investigation of the Strength and Stability of Special Pseudo-spherical Shells Under External Pressure. *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 93, pp. 88–93.
7. Kolosov G.I. Prediction of Instability of Equilibrium States of Compressed Composite Cylindrical Shells Under Power Perturbations. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Vol. 44. No. 5, pp. 428–433.
8. Kovalchuk P.S., Pelykh V.A., Kruk L.A. Stability of Composite Cylindrical Shells with Added Mass Interacting with the Internal Fluid Flow. *International Applied Mechanics*. 2014. Vol. 50, pp. 566–574.
9. Lukankin S.A., Paimushin V.N., Kholmogorov S.A. Non-classical Forms of Loss Stability of Cylindrical Shells Joined by a Stiffening Ring for Certain Forms of Loading. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2014. Vol. 78. No. 4, pp. 395–408.
10. Mazharimousavi S.H., Halilsoy M., Amen S.N.H. Stability of Spherically Symmetric Timelike Thin-shells in General Relativity with a Variable Equation-of-state. *International Journal of Modern Physics*. 2017. Vol. 26. No. 14, 1750158.
11. Ning W.B., Wang D.Z., Zhang J.G. Dynamics and Stability of a Cylindrical Shell Subjected to Annular Flow Including Temperature Effects. *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur-Archiv)*. 2016. Vol. 86. No. 4, pp. 643–656.
12. Podvornyi A.V., Trach V.M., Semenyuk N.P. Stability of Inhomogeneous Cylindrical Shells Under Distributed External Pressure in a Three-dimensional Statement. *International Applied Mechanics*. 2017. Vol. 53. No. 6, pp. 623–638.
13. Stability of Fluid-conveying Periodic Shells on an Elastic Foundation with External Loads / H. Shen [et al.]. *Journal of Fluids and Structures*. 2014. Vol. 46, pp. 134–148.
14. Sofiyev A.Y. On the Solution of the Dynamic Stability of Heterogeneous Orthotropic Visco-elastic Cylindrical Shells. *Composite Structures*. 2018. Vol. 206, pp. 124–130.

15. Tomczyk B., Szczerba P.A. A New Asymptotic-tolerance Model of Dynamic and Stability Problems for Longitudinally Graded Cylindrical Shells. *Composite Structures*. 2018. Vol. 202, pp. 453–481.
16. Van Dung D., Nga N.T., Vuong P.M. Nonlinear Stability Analysis of Stiffened Functionally Graded Material Sandwich Cylindrical Shells with General Sigmoid Law and Power Law in Thermal Environment Using Third-order Shear Deformation Theory. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2019. Vol. 21. No. 3, pp. 938–972.
17. Ohlopkov N.L., Sokolov S.A., Cheremnykh S.V. On the Boundaries Between Zones of Elastic Unloading and Plastic Loading of a Material in Solving the Problem of Stability of a Circular Cylindrical Shell in Simple Subcritical Processes. *Fundamentalnie i Prikladnie problemi Tehniki i Tehnologii*. Orel: Gosuniversitet UNPK, 2012. No. 6-2 (296), pp. 8–13. (In Russian).
18. Ohlopkov N.L., Cheremnykh S.V. On the Limiting Surfaces of Critical Stresses and Deformations of a Material in Solving the Problem of Stability of a Circular Cylindrical Shell in Simple Processes. *Fundamentalnie i Prikladnie Problemi Tehniki i Tehnologii*. Orel: Gosuniversitet UNPK, 2012. No. 5 (295), pp. 30–36. (In Russian).
19. Cheremnykh S., Zubchaninov V., Gulyaev V. Deformation of Cylindrical Shells of Steel 45 under Complex Loading. *XXII Int. Scientific Conf. «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019)*. Vol. 97, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704025.
20. Cheremnykh S., Kuzhin M. Solution of the Problem of Stability of 40X Steel Shell: Modelling and Methods of Structural Analysis. *Journal of Physics: Conf. Series. IOP Publishing*, 2020. Vol. 1425. 012191. DOI: 10.1088/17425/1/012191.
21. Cheremnykh S.V., Skudalov P.O. SN-EVM Unit for Experimental Studies of Stability in Circular Cylindrical Shells Under Combined Loading: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Interstroyemeh – 2019. *IOP Conference Series*. 2020. Vol. 786. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012011.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

CHEREMNYKH Stepan Valerievich – Senior Lecturer of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia.
E-mail: stepan_1986@bk.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Cheremnykh S.V. Solving the Problem of Stability Under Complex Loading for Trajectories in the Form of Circles and Arcs of Circles in a Computer Program // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology»*. 2021. No 1 (9), pp. 41–49.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311.4-52

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИКИ ПОДСТАНЦИЙ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕЖПОДСТАНЦИОННЫХ ЛИНИЙ***В.В. Окунева, К.Б. Корнеев, Ю.В. Ковалева**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*© Окунева В.В., Корнеев К.Б.,
Ковалева Ю.В., 2021

Аннотация. В статье рассмотрены энергосистемы, которые в настоящее время представляют собой сложные энергосети, включающие большое число подстанций и разветвленную сеть линий электропередачи. Эти линии являются ключевыми компонентами сетей и должны быть защищены для обеспечения целостности и надежности всей системы. Управление и защита оборудования на подстанции прошли долгий путь развития (ручное – аппаратное – автоматизированное – диспетчерское управление и сбор данных – цифровая автоматизация). Текущий стандарт автоматизации подстанций, принятый во всем мире, – это стандарт 61850 Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Ключевые слова: цифровая подстанция, защита линии, стандарт МЭК (IEC) 61850, цифровая автоматизация.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-50-58

На современных подстанциях используется микроконтроллерная основа интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), которая выполняет функции, ранее выполнявшиеся механическими реле. Хотя это и значительно повысило надежность систем защиты и управления, однако по-прежнему имеется несколько проблем, связанных с коммуникацией между приборными трансформаторами (ПТ), ИЭУ и автоматическими выключателями (АВ).

Во-первых, каждое ИЭУ должно быть физически соединено с каждым ПТ и АВ кабелями для приема и передачи сигналов. Во-вторых, протоколы, используемые для такой коммуникации, являются проприетарными, т.е. закрытыми, и разрабатываются конкретным производителем или группой компаний. В связи с этим полезность такой системы сильно зависит от производителей оригинального оборудования (Original Equipment Manufacturer (ОЕМ)), а обновление и/или замена неисправных блоков становятся затруднительными из-за проблем совместимости.

В настоящее время увеличивается количество реализованных проектов цифровых подстанций, поэтому можно определить все преимущества данной технологии.

Подстанция Bradley, расположенная в штате Теннесси, США, стала пилотным проектом. Здесь проверили совместимость устройств, которые могут работать в рамках стандарта МЭК 61850. Все эти устройства были выпущены разными производителями. При этом кроме поставленной задачи, решались задачи повышения совместимости оборудования, а также повышения квалификации персонала энергокомпаний. Одновременно определялись проблемы, возникающие при внедрении стандарта.

Из основных производителей, выпускающих релейные модули, была выбрана компания Siemens, которая предложила программную среду для автоматизации подстанций (SICAM PAS). Вторая программа, DIGSI, предложенная Siemens, в настоящий момент является признанным в мире инструментом для конфигурирования различных устройств по МЭК-61850.

Благодаря многолетнему опыту и наличию большого количества реализованных проектов подстанций, соответствующих стандарту МЭК-61850, компания Siemens встала во главе команды Bradley Project, и это помогло сделать данный проект успешным. Подстанция теперь имеет самую экономичную конструкцию защиты и управления передачей в США.

За счет модернизации были достигнуты поставленные цели: при использовании стандарта МЭК-61850 заметно снизилось количество проводов, компонентов и соединений в системах управления и диспетчеризации подстанции; была продемонстрирована возможность кооперации между поставщиками; уменьшилось количество дорогостоящих сигнальных кабелей и проводов, соединяющих органы управления в диспетчерской и выключатели, расположенные в распределительных устройствах.

На стадии предпусковой наладки подстанции реле SIPROTEC позволили выявить в критически важной инфраструктуре связи проблемы, связанные с оборудованием сторонних производителей и возникавшие при построении системы связи компонентов..

На подстанции Alcala de Henares (Испания) в пробном режиме реализовано внедрение общей шины передачи цифровых данных. Вся информация, собираемая с выключателей и разъединителей, а также датаграммы управления передаются в цифровом виде сообщениями стандарта GOOSE.

На цифровой подстанции Osbaldwick (Великобритания) с точки зрения возникающих задержек при передаче сравнили друг с другом различные методы сбора информации с использованием аналоговых и цифровых первичных измерительных модулей.

По количеству построенных цифровых подстанций к настоящему времени лидирует Китай. При этом следует отметить, что технологии и подходы, которые применяет ПАО «Россети» при строительстве подстанций, сильно отличаются от китайских, и это не позволяет России перенять опыт КНР.

В 2011 г. крупнейшими российскими компаниями (таким как ООО НПП «ЭКРА», ООО «ЭнергопромАвтоматизация» и др.) было подписано генеральное соглашение об организации стратегического сотрудничества с целью объединения научно-технических, инженерных и коммерческих сил для создания цифровых подстанций на территории РФ. В рамках этого соглашения были определены подходы, разработана система автоматизированного проектирования цифровой подстанции, задокументирована требуемая структура внутренней сети для различных вариантов построения подстанции.

Компания «ЭКРА» разработала ряд приборов: устройства сопряжения (УСО), преобразователи тока и напряжения, терминалы релейной защиты, системы синхронизации времени с поддержкой ГЛОНАСС и других протоколов синхронизации.

Программная часть современного комплекса компании «ЭКРА» позволяет реализовать систему управления с оборудованием любых производителей, что упростит задачи системной интеграции. На испытательном полигоне проверили совместимость и соответствие стандарту МЭК-61850 устройств российских и зарубежных фирм, таких как сама «ЭКРА», а также АBB, SATEC, «РАДИУС Автоматика» и др.

Различные опытные проекты, посвященные частичному внедрению элементов цифровой подстанции, в 2013–2018 гг. были реализованы на подстанциях «Чистополь» (Татарстан), «Магистральная» (Тюменская область), «Венец» (Самарская область), «Медведевская» (ПАО «МОЭСК»), Нижегородской гидроэлектростанции.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) сформировала целую серию стандартов IEC 61850 для решения вопросов цифровой интеграции, безопасности и надежности.

С внедрением стандарта IEC 61850 «родилась» цифровая подстанция. Компания АBB установила первую такую подстанцию еще в 2009 г. в Австралии. С тех пор фирма создала более 50 цифровых подстанций по всему миру (от Индии до Бразилии).

Цифровые подстанции многочисленны, и можно сэкономить до 80 % медных кабелей, если заменить их волоконной оптикой между силовым оборудованием распределительной станции и релейным помещением. В соответствии с IEC 61850 горизонтальную проводку между защитными и контролируемыми устройствами тоже следует устранить. Количество соединений между первичным устройством и резервными технологическими интерфейсными модулями уменьшится, а медные кабели можно применять только для питания и коротких соединений первичных устройств с распределительными участками на станции.

Если подстанция среднего размера имеет около 7 фидеров, можно сэкономить более 30 т материала, что приведет как к снижению затрат, связанных с транспортировкой, так и к сокращению углеродного следа подстанции. Поскольку в настоящее время больше не нужны обычные вводы-выводы, а устройства требуют гораздо меньше места, в каждую панель можно интегрировать больше устройств. Таким образом, требования к пространству в комнате защиты и управления сократятся вдвое. Интеграция дополнительных функций в устройствах позволяет еще больше уменьшить используемое пространство.

И последнее, пожалуй, самое важное преимущество цифровой подстанции – это высокий уровень безопасности персонала. Так как технологическая шина имеет гальваническую развязку между панелями защиты и распределительным устройством, отпадает необходимость во взаимодействии операторов со вторичными цепями тока и напряжения. Таким образом, риск поражения электрическим током значительно снижается. Цепи тока и напряжения в панелях защиты и управления устраняют, а обычные сигналы постоянного тока 110/220 В заменяют волоконной оптикой.

Многие компании, такие как АBB и Siemens, имеют полный портфель цифровых подстанций: от полевых до технологических, отсековых, станционных, сетевых и операционных уровней.

В стандарте IEC 61850 впервые введено понятие «технологическая шина» (англ. process bus), а также исключена необходимость в дорогостоящей и избыточной медной проводке между отдельными элементами. Кроме того, стандартизированы не только

коммуникационные протоколы, но и форматы данных и системы их обработки, которые каждый поставщик должен был встраивать в ИЭУ для обеспечения интероперабельности и совместимости. Подстанции, которые придерживаются этого стандарта, называются цифровыми. Подробное описание стандарта приведено в источнике [1]. На цифровых подстанциях, как правило, множество точечных медных кабелей заменяется на одну волоконно-оптическую технологическую шину. Сравнение обычной и цифровой подстанций приведено на рис. 1 [2].

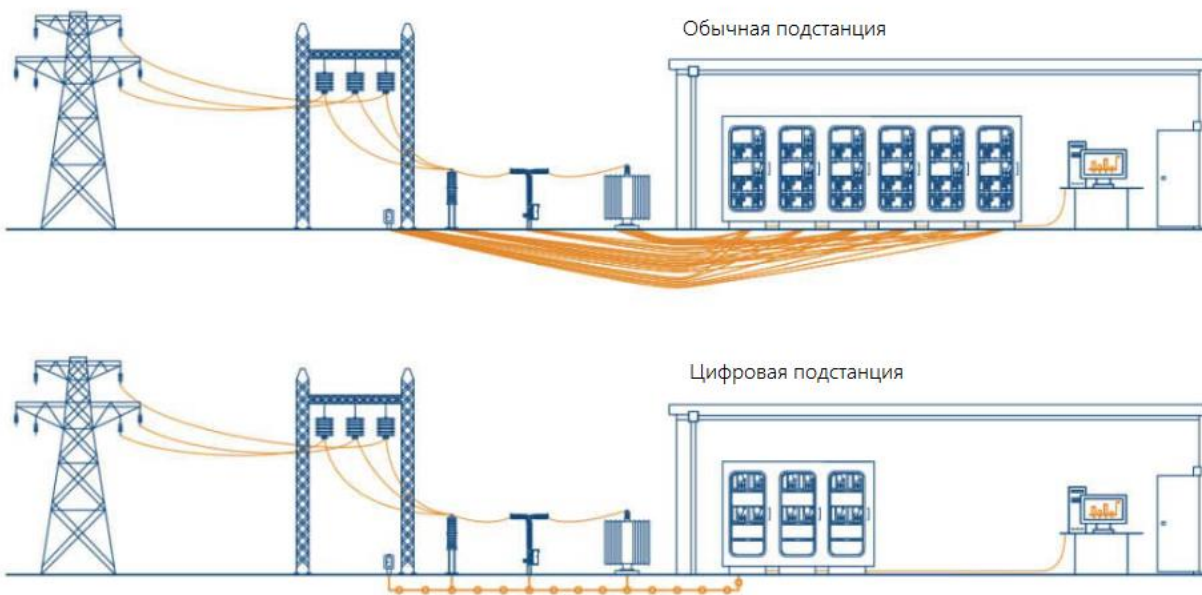


Рис. 1. Компонентное решение и линии передачи информации на подстанциях различного типа

Когда говорят о защите линий электропередачи, приводят два варианта: дистанционную и дифференциальную схемы защиты. Хотя и то и другое имеет свои плюсы и минусы, в настоящее время дифференциальную защиту не слишком часто используют из-за задержек связи и проблем синхронизации. Шире применяют схему дистанционной защиты.

Авторы предлагают провести моделирование и сравнить передачу данных по классической (релейной) и цифровой схемам в специализированной программе (Riverbed Modeler Academic Edition), а также изучить улучшения, которые впоследствии могут быть официально задокументированы, если активно применять стандарт IEC 61850 в отношении элементов схемы, находящихся за пределами подстанции.

Riverbed Modeler в версии Academic Edition – это мощный инструмент моделирования коммуникационных сетей, который имеет некоторые ограничения, свойственные образовательным версиям программных продуктов. Основное внимание в нем уделяется компьютерным коммуникациям, но он позволяет также моделировать пользовательские коммуникационные приложения и протоколы, такие как GOOSE Messages и др.

Цель нашего исследования заключается в том, чтобы сначала смоделировать коммуникационные сети, необходимые для различных схем защиты линий, затем пользовательские приложения, которые будут работать в сети, а после этого выполнить расчетное моделирование и зафиксировать временную задержку доставки критических по времени сообщений (GOOSE и т.п.) по проводным сетям передачи данных (рис. 2).



Рис. 2. Рабочий процесс моделирования

Результаты моделирования показали преимущества дифференциальной защиты линии, особенно при учете стандартов IEC 61850. Применение цифровой связи для линейной дифференциальной защиты повышает надежность системы в целом.

Дистанционная защита в ее нынешнем виде в общем довольно надежна, однако есть проблема с селективностью срабатывания. Особенно это заметно, когда неисправности возникают на удаленных участках зоны. Обеспечение селективности – важная задача, требующая решения.

Использование цифровой связи для дистанционной защиты сократит время восстановления системы после отключения или отказа. Однако применение обычных сетей интернет-провайдеров для обмена сообщениями между подстанциями, которые не являются смежными, невозможно и нецелесообразно для критических по времени данных. Это связано как с задержками, которые могут возникнуть при передаче любых цифровых сигналов (время между отправкой запроса и получением ответа (RTT, от англ.

Round Trip Time) может превышать допустимое для обеспечения надежной защиты от аварийных явлений), так и с вероятностью полной потери данных при передаче.

Таким образом, чтобы полноценно использовать стандарт IEC 61850, нужно не только реализовать на высоком уровне программные или технические аспекты подстанции, но и обеспечить надежную, отказоустойчивую и быструю коммуникацию между всеми компонентами электрических сетей. Данные решения закладываются в современные стандарты связи в рамках реализации концепции «Интернет вещей» (Internet of Things, IoT).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гупта Р.П. Автоматизация подстанций с использованием стандарта IEC61850, 15-я национальная конференция по энергетическим системам (NPSC), Бомбей, декабрь 2008 г.
2. Кунсман С.А. Переход на цифровые технологии: взгляд на современную подстанцию. URL: <https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/going-digital-look-modern-substation> (дата обращения: 30.10.2020).
3. Лю И., Гао Х., Гао В., Ли Н. Сян М. Расчетная схема дифференциальной защиты по току линии на основе IEC61850, конференция IEEE по энергетике и автоматизации, 2011 г. Ухань, 2011. С. 520–523.
4. Фалахати Б., Дараби З., Вакилиан М. Внедрение схем дистанционной защиты линии на подстанциях с поддержкой IEC61850, конференция и выставка IEEE PES T&D, 2014 г. Чикаго; Иллинойс, 2014. С. 1–5.
5. Корнеев К.Б., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Открытость и защищенность протоколов передачи критической информации на объектах энергетики // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 2 (2). С. 50–57.
6. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Y. Optimization of Virtual Power Plant Electrical Network. *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference ISGT*. 2019. P. 8791638.
7. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Kechkin A.Y. Optimization of Virtual Power Plant with a Distributed Generation. *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 01057.
8. Bakken D., Bose A., Hauser C., Whitehead D., Zweigle G. Smart Generation and Transmission with Coherent, Real-time Data (Special Issue on Smart Grids). *Proc. IEEE*. Vol. 99. No. 6, pp. 928–951.
9. Кечкин А.Ю., Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Вопросы создания виртуальных электростанций в масштабе Micro-Grid // *Вестник НГИЭИ*. 2015. № 4 (47). С. 50–55.
10. Уколова Е.В. Виртуальные электростанции – контроль распределенной генерации // *Молодежный вестник ИРГТУ*. 2016. С. 25.
11. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Виртуальные электростанции – идеи и решения // *Автоматизация в промышленности*. 2019. № 11. С. 9–13.
12. Денисюк С.П., Базюк Т.Н. Анализ влияния источников распределенной генерации на электросети и особенности построения виртуальных электростанций // *Электрификация транспорта*. 2012. С. 23–28.
13. Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 5 (124). С. 131–142.

14. Андрианова Л.П. Тенденции развития электроэнергетики на базе распределенной генерации электроэнергии // *Достижения науки и инновации – аграрному производству: материалы национальной научной конференции*. 2017. С. 68–74.
15. Hrochová M. Virtual Power Plant Concept – Idea vs Reality // *Экономика и предпринимательство*. 2016. № 1-1 (66). P. 57–61.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: Energy-tver@mail.ru

КОВАЛЕВА Юлия Владимировна – магистрант кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: kowalyowa.yu@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Окунева В.В., Корнеев К.Б., Ковалева Ю.В. Моделирование цифровой автоматики подстанций для защиты межподстанционных линий // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 50–58.

SIMULATION OF DIGITAL AUTOMATION OF SUBSTATIONS FOR PROTECTION OF INTER-SUBSTATION LINES

V.V. Okuneva, K.B. Korneev, Yu.V. Kovaleva
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Power systems are currently complex power grids, including a large number of substations and an extensive network of power transmission lines. These lines are key components of networks and must be secured to ensure the integrity and reliability of the system. The control and protection of equipment at the substation has evolved from manual to hardware-automated, to dispatcher control and data acquisition with intelligent electronic devices enabled, and finally now to digital automation. The current substation automation standard adopted worldwide is International Electrotechnical Commission (IEC) Standard 61850.

Keywords: digital substation, line protection, IEC 61850 standard, digital automation.

REFERENCES

1. R.P. Gupta, Substation Automation using IEC61850 Standard, 15 National Conference on Energy Systems (NPSC), Bombay, December 2008.

2. S.A. Kunsman. Transition to Digital Technologies: Looking at a Modern Substation. URL: <https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/going-digital-look-modern-substation/> (date of access: 30.10.2020).
3. Liu Y., Gao H., Gao V., Li N., Syan M. IEC61850-based Calculated Line Current Protection Scheme, IEEE Energy and Automation Conference 2011. Wuhan, 2011, pp. 520–523.
4. Falahati B., Darabi Z., Vakilian M. Implementation of Remote Line Protection Schemes in Sub-Stations Supporting IEC61850, IEEE PES T & D 2014 Conference and Exhibition. Chicago; Illinois, 2014, p. 1–5.
5. Korneev K.B., Okuneva V.V., Pavlova Y.M. Openness and Security of Critical Information Transfer Protocols at Energy Facilities. *Bulletin of Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical Engineering and Chemical Technology*. 2019. No. 2 (2), pp. 50–57.
6. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Y. Optimization of Virtual Power Plant Electrical Network. *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference ISGT*. 2019. P. 8791638.
7. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Kechkin A.Y. Optimization of Virtual Power Plant with a Distributed Generation. *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 01057.
8. Bakken D., Bose A., Hauser C., Whitehead D., Zweigle G. Smart Generation and Transmission with Coherent, Real-time Data (Special Issue on Smart Grids). *Proc. IEEE*. Vol. 99. No. 6, pp. 928–951.
9. Kechkin A.Y., Sosnina E.N., Shalukho A.V. Issues of Creating Virtual Power Plants on the Micro-Grid Scale. *Bulletin of NGIEI*. 2015. No. 4 (47), pp. 50–55.
10. Ukolova E.V. Virtual Power Plants – Control of Distributed Generation. *Youth Bulletin of IRSTU*. 2016, p. 25.
11. Aristova N.I., Chadeev V.M. Virtual Power Plants – Ideas and Solutions. *Automation in Industry*. 2019. No. 11, pp. 9–13.
12. Denisyuk S.P., Bazyuk T.N. Analysis of the Influence of Distributed Generation Sources on Electrical Networks and the Features of Building Virtual Power Plants. *Electrification of Transport*. 2012, pp. 23–28.
13. Suslov K.V. Development of Power Supply Systems for Isolated Territories of Russia Using Renewable Energy Sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2017. Vol. 21. No. 5 (124), pp. 131–142.
14. Andrianova L.P. Trends in Electricity Development Based on Distributed Electricity Generation. *Achievements of Science and Innovation – Agrarian Production Materials of the National Scientific Conference*. 2017, pp. 68–74.
15. Hrochová M. Virtual Power Plant Concept – Idea vs Reality. *Economics and Entrepreneurship*. 2016. No. 1-1 (66), pp. 57–61.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

OKUNEVA Viktoria Valerjevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru
KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

KOVALEVA Yuliya Vladimirovna – Graduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kowalyowa.yu@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Okuneva V.V., Korneev K.B., Kovaleva Yu.V. Simulation of Digital Automation of Substations for Protection of Inter-substation Lines // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology». 2021. No. 1 (9), pp. 50–58.

УДК 629.7.052

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ МАХОВИК С ИСКУССТВЕННЫМ (ЕМКОСТНЫМ) МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ

И.П. Попов

Курганский государственный университет (г. Курган)

© Попов И.П., 2021

Аннотация. Цель исследования заключается в разработке емкостного маховика с возможностью автоматического регулирования момента инерции. Устройство, имеющее емкостный момент инерции, может очень мало весить и использоваться вместо массивных маховиков. Конструктивно его следует выполнить в виде электрической машины постоянного тока независимого возбуждения или вентильной электрической машины, в якорную цепь которой включен конденсатор. Механическое устройство при взаимодействии с электромагнитным маховиком, обладающим емкостным моментом инерции, «не отличает» его от маховика с «натуральным» моментом инерции, при этом идеализированный вариант первого не имеет гравитационной массы. Емкостный момент инерции функционально зависит от электромагнитных величин – емкости и магнитной индукции, что создает возможность автоматического регулирования момента инерции.

Ключевые слова: масса, момент инерции, электрическая машина, конденсатор.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-58-63

ВВЕДЕНИЕ

В классической механике инертная масса m , являющаяся механической величиной, по существу определяется основной аксиомой динамики – вторым законом Ньютона [1]. При этом «натуральная» масса объекта пропорциональна количеству вещества, заключенного в нем.

Под искусственной массой следует понимать величину, которая не отличается от «натуральной» массы, т.е. величину, удовлетворяющую второму закону Ньютона. Инертность искусственной массы обуславливается не количеством вещества, а некоторыми другими физическими обстоятельствами [2, 3].

Основываясь на вышеприведенных данных, рассмотрим в рамках настоящей статьи возможность разработки емкостного маховика с автоматическим регулированием момента инерции.

Предпосылкой решения этой задачи является одна из двух систем аналогий между электромагнитными и механическими величинами, в соответствии с которыми масса связана дуальным соотношением с емкостью:

$$m \Rightarrow C.$$

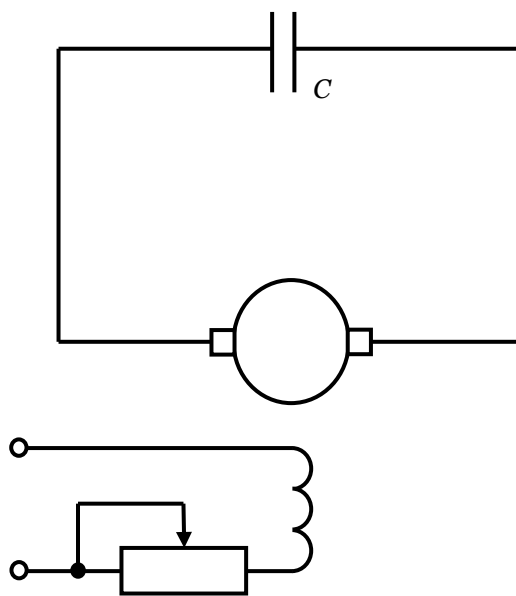
Однако дуальная связь не является функциональной, поскольку охватываемые ею величины относятся к изолированным друг от друга системам. Таким образом, возможность использования конденсатора для создания емкостного момента инерции может быть реализована в смешанной, т.е. электромеханической, системе [4–6]. Подобное устройство, обладающее емкостным моментом инерции, может очень мало весить. Его стоит использовать вместо массивных маховиков.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применялись общенаучные и математические методы, а также электротехнические расчеты.

КОНСТРУКЦИЯ

Устройство можно выполнить в виде электрической машины постоянного тока независимого возбуждения или вентильной электрической машины, в якорную цепь которой включен конденсатор емкостью C (рисунок).



Принципиальная электрическая схема устройства

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для математических расчетов нам потребуются следующие параметры: количество витков якорной обмотки – w ; длина их активной части – l ; индукция магнитного поля – B ; диаметр ротора электрической машины – D . Масса, трение, активное сопротивление и индуктивность обмотки не учитываются.

При вращении якоря в обмотке возникает ЭДС электромагнитной индукции:

$$e_i = -B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt}.$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$BlwD \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt.$$

Правая часть – напряжение на конденсаторе, i – ток. Производная этого выражения:

$$BlwD \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{1}{C} i,$$

где

$$i = BlwDC \frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

С учетом последнего соотношения запись вращательного аналога закона Ампера применительно к вентильной машине или машине постоянного тока имеет вид

$$M = B2lw \frac{D}{2} i = (BlwD)^2 C \frac{d^2\varphi}{dt^2} = J_C \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \quad (1)$$

Однако это также запись аналога второго закона Ньютона для вращательного движения, посредством которого можно определить момент инерции, в соответствии с чем

$$J_C = (BlwD)^2 C \quad (2)$$

является емкостным моментом инерции. Поэтому рассмотренное устройство можно считать электромагнитным маховиком.

В математическом отношении выражение (2) идентично формуле для инертной емкости [7, 8]:

$$C_J = \frac{J}{(BlwD)^2}.$$

Формулу (1) можно преобразовать следующим образом:

$$M = J_C \frac{d^2\varphi}{dt^2} = J_C \frac{d\omega}{dt};$$

$$dL = M dt = J_C d\omega;$$

$$L = J_C \omega,$$

где ω – угловая скорость вращения ротора электромеханического преобразователя; L – момент количества движения.

Очевидно, что на основе линейной электрической машины может быть реализована искусственная масса [9, 10]:

$$m_C = (Blw)^2 C.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Емкостный момент инерции (емкостная масса) принципиально отличается от аналогии между массой и емкостью, поскольку электромагнитные аналоги не могут применяться в качестве элементов механических систем.

По формуле (2) установлено, что емкостный момент инерции функционально зависит от электромагнитных величин, и это создает возможность его автоматического регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Математическое моделирование формулы второго закона Ньютона. *Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием: 22-24 апреля 2019 г.* 2019. С. 310–317.
2. Попов И.П. Электромеханические или искусственные масса и упругость // *Вестник Псковского государственного университета. Технические науки.* 2016. Вып. 4. С. 89–94.
3. Попов И.П. Переходный процесс при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения // *Вестник Псковского государственного университета. Технические науки.* 2018. Вып. 7. С. 52–56.
4. Попов И.П. Теоретически установленная независимость амплитуд тока и момента синхронной машины с индуктивной нагрузкой от частоты // *Вестник МЭИ.* 2019. № 5. С. 68–72.
5. Попов И.П. Четыре теоремы для синхронных машин с реактивной нагрузкой // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления.* 2018. № 28. С. 169–178.
6. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии».* 2020. № 2 (6). С. 49–56.
7. Попов И.П. Накопитель энергии с искусственной инертной емкостью // *Вестник Калужского университета.* 2019. № 4. С. 71–73.
8. Попов И.П., Попов Д.П., Кубарева С.Ю. Вращательное инертно-емкостное зарядно-разрядное устройство // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки.* Вып. 7. 2012. № 2 (24). С. 85, 86.
9. Попов И.П. Создание искусственной массы // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки.* Вып. 9. 2014. № 2 (33). С. 23, 24.
10. Попов И.П. Искусственные масса и упругость // *Вестник Тверского государственного технического университета.* 2016. № 1 (29). С. 7–11.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Игорь Павлович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: ip.porow@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 58–63.

**ELECTROMECHANICAL FLYWHEEL
WITH AN ARTIFICIAL (CAPACITIVE) MOMENT OF INERTIA**

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. The purpose of the study is to develop an artificial capacitive flywheel with the ability to automatically control the moment of inertia. The device, which has an artificial moment of inertia, can have a significantly low weight and be used instead of massive flywheels. The device constructively can be made in the form of a direct current electric machine of independent excitation or a valve electric machine, in the armature circuit of which a capacitor is included. A mechanical device interacting with an electromagnetic flywheel, which has an artificial moment of inertia, «does not distinguish» it from a flywheel with a «natural» moment of inertia, while the idealized version of the former does not have gravitational mass. Artificial or capacitive moment of inertia functionally depends on electromagnetic quantities – capacitance and magnetic induction, which creates the possibility of its automatic regulation.

Keywords: mass, moment of inertia, electric machine, capacitor.

REFERENCES

1. Popov I.P. Mathematical Modeling of the Formula for Newton's Second Law. *Informatsionnyye Tekhnologii v Modelirovanii i Upravlenii: Podkhody, Metody, Resheniya: Sbornik Nauchnykh Statey II Vserossiyskoy Nauchnoy Konferentsii s Mezhdunarodnym Uchastiyem: 22-24 aprelya 2019 g.* 2019, pp. 310–317. (In Russian).
2. Popov I.P. Electromechanical or Artificial Mass and Elasticity. *Vestnik Pskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskiye Nauki.* 2016. Iss. 4, pp. 89–94. (In Russian).
3. Popov I.P. Transient Process when a Piezoelectric Transducer with an Elastic Load is Connected to a Constant Voltage Source. *Vestnik Pskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskiye Nauki.* 2018. Iss. 7, pp. 52–56. (In Russian).
4. Popov I.P. The Theoretically Established Independence of the Amplitudes of the Current and the Moment of a Synchronous Machine with an Inductive Load on the Frequency. *Vestnik MEI.* 2019. No. 5, pp. 68–72. (In Russian).
5. Popov I.P. Four Theorems for Synchronous Machines with Reactive Load. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta. Elektrotehnika, Informatsionnyye Tekhnologii, Sistemy Upravleniya.* 2018. No. 28, pp. 169–178. (In Russian).
6. Popov I.P. Amplitude-frequency Features of Load Modes of a Synchronous Electric Machine. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i Khimicheskiye Tekhnologii».* 2020. No. 2 (6), pp. 49–56. (In Russian).
7. Popov I.P. Energy Storage Device with an Artificial Inert Capacity. *Vestnik Kaluzhskogo Universiteta.* 2019. No. 4, pp. 71–73. (In Russian).

8. Popov I.P., Popov D.P., Kubareva S.Yu. Rotational Inert-capacitive Charging-discharging Device. *Vestnik Kurganskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskiye Nauki*. Iss. 7. 2012. No. 2 (24), pp. 85, 86. (In Russian).
9. Popov I.P. Creation of Artificial Mass. *Vestnik Kurganskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskiye Nauki*. Iss. 9. 2014. No. 2 (33), pp. 23, 24. (In Russian).
10. Popov I.P. Artificial Mass and Elasticity. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2016. No. 1 (29), pp. 7–11. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – Senior Lecturer of the Department Technology of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, Kurgan State University, 63/4, Sovetskaja, Kurgan, 640020, Russia. E-mail: ip.popow@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Electromechanical Flywheel with an Artificial (Capacitive) Moment of Inertia // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology»*. 2021. No. 1 (9), pp. 58–63.

УДК 629.7.052

ЗАМЕЧАНИЕ О ЦЕНТРАХ *S*-СИММЕТРИИ И *C*-СИММЕТРИИ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ

Ал.А. Шум¹, А.М. Ветошкин², Ан.А. Шум¹

¹*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

²*Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Мытищи, Московская область)*

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А., 2021

Аннотация. Изучены понятия *s*-симметрии и *c*-симметрии плоской пластины. Установлен критерий совпадения центра *c*-симметрии плоской выпуклой пластины с началом координат, который представляет собой аналог полученного ранее критерия для случая *s*-симметрии. Рассматривается пример применения нового критерия.

Ключевые слова: симметрия, *c*-симметрия, *s*-симметрия, центр симметрии, линия полумасс, линия равновесия, функция плотности, масса, центр масс, электрическая машина.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-63-70

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–13] описаны многочисленные технологии и методы механической и физико-технической обработки деталей машин. Чтобы выбрать конкретную технологию изготовления и балансировки, нужно учитывать распределение массы внутри обрабатываемой детали. При этом та или иная симметрия распределения массы может играть важную или даже определяющую роль. Таким образом, интерес представляет

изучение вопросов симметрии распределения массы внутри деталей, как плоских, так и объемных. В статьях [14–20] исследовались вопросы симметрии плоских деталей (иначе называемых *пластинами* [16]), а в статьях [21–24] рассматривались вопросы симметрии деталей объемных. В настоящей статье продолжают исследования симметрии плоских деталей, т.е. пластин, и в первую очередь авторы отталкиваются от результатов статьи [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Простой областью называется область плоскости, ограниченная замкнутой линией без самопересечений (границу области считаем частью области, поэтому всякая простая область *замкнута*). Точки простой области, не лежащие на границе, являются ее *внутренними* точками. Простая область называется *выпуклой*, если всякая прямая, проведенная через любую внутреннюю точку этой области, пересекает ее границу ровно в двух точках. Под *областью* понимается простая область или объединение нескольких простых областей. Область S_1 называется *подобластью* области S , если $S_1 \subseteq S$.

Простая область S вместе с определенной в этой области непрерывной неотрицательной функцией (*функцией плотности*) – это *пластина* D . Подобласть области S вместе с соответствующим ограничением функции плотности называется *подпластиной* пластины D (отметим, что область подпластины, в отличие от области пластины, не должна быть простой). Пластина D называется *выпуклой*, если выпукла соответствующая ей область S .

Функцию плотности пластины D будем записывать в виде $f(\varphi, \rho)$, считая заданной подходящую полярную систему координат (следует отметить, что при переходе от одной системы координат к другой выражение функции $f(\varphi, \rho)$ через координаты изменяется, хотя сама функция (как функция точки) остается неизменной).

$$\text{Массой пластины } D \text{ называется } m(D) = \iint_S f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi.$$

Если прямая линия делит пластину на две подпластины одинаковой массы, то это *линия полумасс* пластины D . Прямая линия называется *линией равновесия* пластины D , если она делит область S пластины D на две подобласти, S_1 и S_2 , так, что $\iint_{S_1} r(\varphi, \rho) f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = \iint_{S_2} r(\varphi, \rho) f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi$, где $r(\varphi, \rho)$ – расстояние от точки (φ, ρ)

до данной прямой (заметим, что прямая является линией равновесия пластины в том и только том случае, если эта пластина, положенная на лезвие бритвы вдоль данной прямой, будет сохранять равновесие).

Рассмотренные выше определения соответствуют определениям из статьи [16]. В этой же статье введены понятия *центров симметрии*: *центром s -симметрии* (*центром полумасс*) пластины D называется точка пересечения всех ее линий полумасс, а *центром c -симметрии* (*центром масс*) пластины D называется точка пересечения всех ее линий равновесия (это понятие центра масс совпадает с традиционным [25]). Центр c -симметрии пластины D всегда существует и единственен, в то время как центр s -симметрии может и не существовать (но если он существует, то также единственен). Как показывают примеры из статьи [14], возможны случаи, когда оба центра симметрии существуют, но не совпадают.

Функцию угла φ назовем *полярно-симметричной*, если она имеет период π . Значения такой функции одинаковы для углов φ , определяющих противоположные направления в рамках полярной системы координат.

Нижеприведенный критерий для центра s -симметрии установлен в [17].

Лемма 1. Пусть начало координат полярной системы является внутренней точкой некоторой выпуклой области S пластины D с функцией плотности $f(\varphi, \rho)$ и $r(\varphi)$ – расстояние от начала координат до границы этой области вдоль луча, определяемого углом φ . Тогда пластина D имеет центр s -симметрии в начале координат в том и только

том случае, когда функция $F(\varphi) = \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho d\rho$ является полярно-симметричной.

Для центра s -симметрии похожий критерий представляет следующая лемма.

Лемма 2. Пусть начало координат полярной системы является внутренней точкой некоторой выпуклой области S пластины D с функцией плотности $f(\varphi, \rho)$, $r(\varphi)$ – расстояние от начала координат до границы этой области вдоль луча, определяемого

углом φ , и функция $F_1(\varphi) = \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho^2 d\rho$ является полярно-симметричной. Тогда

пластина D имеет центр s -симметрии в начале координат.

Доказательство. Из теорем [16] и определения центра масс следует, что центр масс пластины D находится в начале координат в том и только том случае, когда выполнены следующие условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint_S \rho \cos \varphi f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = 0, \\ \iint_S \rho \sin \varphi f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = 0. \end{array} \right.$$

Эти условия для случая, когда функция $F_1(\varphi)$ полярно-симметрична, т.е. имеет период π , выполнены. В самом деле, выполнение первого условия подтверждают следующие вычисления:

$$\begin{aligned} \iint_D \rho \cos \varphi f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi &= \iint_D \cos \varphi f(\varphi, \rho) \rho^2 d\rho d\varphi = \int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho^2 d\rho = \int_0^{2\pi} \cos \varphi F_1(\varphi) d\varphi = \\ &= \int_0^{\pi} \cos \varphi F_1(\varphi) d\varphi + \int_{\pi}^{2\pi} \cos \varphi F_1(\varphi) d\varphi = \left\{ \begin{array}{l} t = \varphi - \pi \\ \varphi = t + \pi \\ d\varphi = dt \end{array} \right. = \int_0^{\pi} \cos \varphi F_1(\varphi) d\varphi + \int_0^{\pi} \cos(t + \pi) F_1(t + \pi) dt = \\ &= \int_0^{\pi} \cos \varphi F_1(\varphi) d\varphi - \int_0^{\pi} \cos t F_1(t + \pi) dt = \int_0^{\pi} \cos \varphi F_1(\varphi) d\varphi - \int_0^{\pi} \cos t F_1(t) dt = 0. \end{aligned}$$

Аналогичные вычисления подтверждают выполнение второго условия:

$$\begin{aligned} \iint_D \rho \sin \varphi f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi &= \iint_D \sin \varphi f(\varphi, \rho) \rho^2 d\rho d\varphi = \int_0^{2\pi} \sin \varphi d\varphi \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho^2 d\rho = \int_0^{2\pi} \sin \varphi F_1(\varphi) d\varphi = \\ &= \int_0^{\pi} \sin \varphi F_1(\varphi) d\varphi + \int_{\pi}^{2\pi} \sin \varphi F_1(\varphi) d\varphi = \begin{cases} t = \varphi - \pi \\ \varphi = t + \pi \\ d\varphi = dt \end{cases} = \int_0^{\pi} \sin \varphi F_1(\varphi) d\varphi + \int_0^{\pi} \sin(t + \pi) F_1(t + \pi) dt = \\ &= \int_0^{\pi} \sin \varphi F_1(\varphi) d\varphi - \int_0^{\pi} \sin t F_1(t + \pi) dt = \int_0^{\pi} \sin \varphi F_1(\varphi) d\varphi - \int_0^{\pi} \sin t F_1(t) dt = 0, \end{aligned}$$

Таким образом, центр масс пластины находится в начале координат. Лемма доказана.

Следует отметить, что критерий, определяемый леммой 1, является необходимым и достаточным, в то время как критерий, определяемый леммой 2, является достаточным, но не является необходимым, так как возможен пример пластины D , имеющей центр масс в начале координат, для которой функция $F_1(\varphi)$ не является полярно-симметричной. Таким примером является однородная пластина, имеющая форму правильного треугольника и центр масс в начале координат. В этом случае значения функции $F_1(\varphi)$ для значений угла φ , определяющих противоположные направления к вершине треугольника и от нее, будут разными (так как расстояние до границы области в направлении вершины вдвое больше, чем такое же расстояние в противоположном направлении, а функция плотности имеет постоянное значение).

Доказано [17], что для любой внутренней точки выпуклой области можно так определить функцию плотности, что полученная пластина будет иметь центр s -симметрии (центр c -симметрии) именно в этой точке. Данное утверждение в статье [17] для случая s -симметрии представляет собой теорему 1, а для случая c -симметрии – теорему 2. Критерий, определяемый леммой 1, в статье [17] использован для доказательства теоремы 1. Покажем, как критерий, определяемый леммой 2, может быть использован для обоснования теоремы 2.

Для этого начало координат поместили в ту точку области, которая должна быть центром c -симметрии, а функцию плотности определили как $f(\varphi, \rho) = \frac{\rho}{[r(\varphi)]^4}$, где $r(\varphi)$ – расстояние от начала координат до границы области вдоль луча, определяемого углом φ [17]. Требуется доказать, что центр масс полученной пластины находится в начале координат. Чтобы это сделать, можно рассмотреть функцию $F_1(\varphi)$, которая в данном случае будет выглядеть следующим образом:

$$F_1(\varphi) = \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho^2 d\rho = \int_0^{r(\varphi)} \frac{\rho}{[r(\varphi)]^4} \rho^2 d\rho = \frac{1}{[r(\varphi)]^4} \int_0^{r(\varphi)} \rho^3 d\rho = \left[\frac{1}{[r(\varphi)]^4} \cdot \frac{\rho^4}{4} \right]_0^{r(\varphi)} = \frac{1}{4}.$$

Функция $F_1(\varphi)$ оказалась постоянной, а значит, полярно-симметричной. Следовательно, согласно лемме 2 центр c -симметрии пластины D (т.е. ее центр масс) находится в начале координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Два разных понятия симметрии – c -симметрия и s -симметрия – имеют в то же время немало общих черт, что позволяет исследовать их похожими средствами. На основе двух критериев совпадения центра симметрии с началом координат, представленных в настоящей статье леммами 1 и 2, показан пример того, как можно использовать параллели между этими двумя видами симметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожжалова В.И., Седыхин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие: в 2 т. М.: Высшая школа, 1983. Т. 1. 247 с. Т. 2. 208 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение, 1979. 487 с.
4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1981. 266 с.
5. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение, 1983. 160 с.
6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. 303 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1980. 263 с.
10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и пресс-форм. М.: ОНТИ ЭНИМС, 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз, 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1, 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание, 2006. 512 с.
14. Шум Ал.А. О симметрии функций, определенных в круге // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. Вып. 25. С. 3–8.
15. Шум Ал.А. Замечание об s -симметричных функциях // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 27. С. 3–6.
16. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 30. С. 19–23.
17. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области плоскости // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 31. С. 19–22.
18. Шум Ал.А. Симметрическая линия функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 32. С. 103–105.

19. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Симметрическая линия правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 47–53.
20. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Параметрические уравнения симметрической линии правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 44–47.
21. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о симметрии функций, определенных в шаре // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 38–46.
22. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Об одной критерии s -симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 30–35.
23. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 1 (5). С. 71–78.
24. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области пространства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 57–65.
25. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике (полный курс). М.: АЙРИС-Пресс, 2007. 604 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУМ Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет». 170026, Россия, Тверская область, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22.

ВЕТОШКИН Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, информатики и вычислительной техники, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МФ МГТУ). 141005, Россия, Московская область, г. Мытищи, улица 1-я Институтская, 1.

ШУМ Анатолий Александрович – магистрант факультета информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет». 170026, Россия, Тверская область, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о центрах s -симметрии и c -симметрии плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 63–70.

**A NOTE ON THE CENTERS
OF *S*-SYMMETRY AND *C*-SYMMETRY OF A FLAT PLATE****Al.An. Shum¹, A.M. Vetoshkin², An.Al. Shum¹**¹*Tver State Technical University (Tver)*²*Mytishchi filial of MSTU named after N.Uh. Bauman (Mytishchi, Moscow region)*

Abstract. The concepts of *s*-symmetry and *c*-symmetry of a flat plate are studied. A sufficient criterion is established for the coincidence of the center of *c*-symmetry of a flat convex plate with the origin, which is an analogue of the previously obtained criterion for the case of *s*-symmetry. An example of applying the new criterion is considered.

Keywords: symmetry, *c*-symmetry, *s*-symmetry, center of symmetry, half-mass line, equilibrium line, density function, mass, center of mass, electric machine.

REFERENCES

1. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Drozhzalova V.I., Sedykhin F.V., Smolentsev V.P., Yampolsky V.M. Electrophysical and Electrochemical Methods of Processing Materials: Uchebnoe Posobie: In 2 v. / B.A. Artamonov [et al.]. Moscow: Vysshaja Shkola, 1983. Vol. 1. 247 p. Vol. 2. 208 p.
2. Vereschaka A.S. The Performance of the Cutting Tool with Wear-resistant Coatings. Moscow: Mashinostroenie, 1993. 336 p.
3. Voronichev N.M., Tartakovskiy J.E., Genin V.B. Automatic Lines of Modular Machines. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 487 p.
4. Dalskiy A.M., Gavrilyuk, V.S. Mechanical Treatment of Materials: uchebnik dlya vuzov. Moscow: Mechanical Engineering, 1981. 266 p.
5. Nemilov E.F. Electroerosion Treatment of Materials. L.: Mashinostroenie, 1983. 160 p.
6. Poduraev V.N. Automatically Adjustable and Combined Cutting Processes. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 303 p.
7. Silin S.S. Method of Similarity When Cutting Materials. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 152 p.
8. Starkov V.K. Cutting Processing. Stability and Quality Management in Automated Production. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 297 p.
9. Trent E.M. Metal Cutting. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 263 p.
10. Areas for Electrical Discharge Machining of Working Parts of Cutting Dies and Molds. Moscow: ONTI ENIMS, 1983. 47 p.
11. Etin A.O. Kinematic Analysis and Selection of Effective Methods of Processing with a Climbing Tool. Moscow: Mashgiz, 1953. 173 p.
12. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. Contact Processes in Electro-diamond Grinding. Moscow: Mashinostroenie-1, 2004. 230 p.
13. Yastcheritsyn P.I., Feldshtein E.E., Korniewicz M.A. Theory of Cutting. Minsk: Novoe znanie, 2006. 512 p.
14. Shum Al.A. On the Symmetry of the Functions Defined in the Circle. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*. 2014. Vol. 25, pp. 3–8.
15. Shum Al.A. The Comment About *S*-symmetric Functions. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*. 2015. Vol. 27, pp. 3–6.

16. Shum Al.A. About the Centers of Symmetry of a Function of Two Variables. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*. 2016. Vol. 30, pp. 19–23.
17. Shum Al.A. About the Centers of Symmetry of a Function Defined in a Convex Domain of the Plane. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*. 2017. Vol. 31, pp. 19–22.
18. Shum Al.A. *Symmetric Line* of a Function of Two Variables. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*. 2017. Vol. 32, pp. 103–105.
19. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. The Symmetric Line of a Regular Homogeneous Triangle. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 47–53.
20. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. Parametric Equations of the Symmetric Line of a Regular Homogeneous Triangle. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 44–47.
21. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A Note on the Symmetry of Functions Defined in a Ball. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta. Series «Technical Sciences»*. 2019. No. 3 (3), pp. 38–46.
22. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On one Criterion of S -symmetry of a Function of Three Variables. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta. Series «Technical Sciences»*. 2019. No. 4 (4), pp. 30–35.
23. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the Centers of Symmetry of a Function of Three Variables. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta. Series «Construction. Electrical Engineering and Chemical Technologies»*. 2020. No. 1 (5), pp. 71–78.
24. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the Centers of Symmetry of the Function, Defined in a Convex Area of Space. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta. Series «Construction. Electrical Engineering and Chemical Technologies»*. 2020. No. 2 (6), pp. 57–65.
25. Pismennyi D.T. *Lecture Notes on Higher Mathematics (Full Course)*. Moscow: AIRIS-press, 2007. 604 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SHUM Alexander Anatolievich – Associate Professor of the Department of Mathematics, Tver State Technical University, 22, Afanasiy Nikitin embankment, Tver, 170026, Russia.

VETOSHKIN Alexander Mikhailovich – Associate Professor in the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, MF Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (MF MSTU), 1, 1st Institutskaya Street, Mytishchi City, Moscow Region, 141005, Russia.

SHUM Anatoliy Alexandrovich – Master's Student of the Faculty of Information Technologies, Tver State Technical University, 22, Afanasiy Nikitin embankment, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A Note on the Centers of S -symmetry and C -symmetry of a Flat Plate // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology»*. 2021. No. 1 (9), pp. 63–70.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 541.6

ЭНТАЛЬПИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДВУХАТОМНЫХ СПИРТОВ. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ И ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

М.Г. Виноградова, Р.Р. Козлова, Т.А. Савельева
Тверской государственной университет (г. Тверь)

© Виноградова М.Г., Козлова Р.Р., Савельева Т.А., 2021

Аннотация. Исследована энтальпия образования $\Delta_f H^\circ_{298(\text{ж})}$ двухатомных спиртов. Выведены рабочие формулы, дана их теоретико-графовая интерпретация. Проведены численные расчеты, согласующиеся с экспериментом, и получены новые данные. Установлены закономерности, связывающие энтальпию образования со строением двухатомных спиртов. Показано, что энтальпия образования зависит от длины цепи, разветвленности двухатомных спиртов и расположения гидроксогрупп.

Ключевые слова: структура, энтальпия образования, расчетные методы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-71-79

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей теоретической химии является определение свойств химических соединений на основе их молекулярной структуры. Экспериментальных сведений по корреляциям «структура – свойство» немного, в том числе и для двухатомных спиртов. Именно поэтому актуальная задача современной химии заключается в том, чтобы установить связь между строением соединений и их свойствами. Решение данной задачи даже для одного класса соединений значительно расширяет возможности теоретической химии.

Цель работы – выявить закономерности в энтальпии образования двухатомных спиртов, провести численные расчеты.

Объект исследования – двухатомные спирты. Гликоли предотвращают кристаллизацию и высыхание активных веществ, служат в качестве растворителей и пластификаторов, применяются для получения различных эфиров, полиуретанов и др.

В работе применяли феноменологические методы исследования, методы теории графов, методы линейной алгебры, метод наименьших квадратов (МНК) [1, 2] и др.

Феноменологические методы используют в виде аддитивных схем расчета и прогнозирования, с помощью которых и рассчитывается энтальпия образования молекул [1, 3, 4] и другие свойства [5–11].

По теме исследования есть литература обзорного характера, монографии и др. [1–15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Как указывалось в работах [1, 11], в феноменологическом методе молекула рассматривается в качестве системы взаимодействующих атомов. Энтальпия образования

может быть представлена суммой свойств, приходящихся на атом-атомные взаимодействия отдельных атомов (p_α), пары атомов ($p_{\alpha\beta}$), трех атомов ($p_{\alpha\beta\gamma}$) и т.д. [1, 2, 11].

При теоретико-графовом подходе исследуются математические модели молекулярной структуры – химические графы. В качестве дескрипторов для изучения корреляций «структура – свойство» в теоретико-графовом подходе [1, 2, 10] часто используются топологические индексы (ТИ).

Неизвестные параметры в феноменологическом и теоретико-графовом методах находятся через экспериментальные данные с помощью МНК [1, 2, 11].

Результаты расчетов оценивались с помощью средней абсолютной ошибки расчета ($\bar{\varepsilon}$), максимального отклонения (ε_{\max}) и др.

В работе построены аддитивные схемы расчета для двухатомных спиртов в разных приближениях.

Простые схемы не учитывают взаимного влияния между несвязанными атомами:

$$P_{C_nH_{2n+2}O_2} = h_{CC}p_{C-C} + h_{CO}p_{C-O} + h_{CH}p_{C-H}. \quad (1)$$

Эти схемы не отображают эффект структурной изомерии.

В первом приближении учитывается взаимное влияние атомов, удаленных не далее чем через один скелетный атом по цепи молекулы:

$$P_{C_nH_{2n+2}O_2} = h_{CC}p_{C-C} + h_{CO}p_{C-O} + h_{CH}p_{C-H} + x_{CC_1}\Gamma_{CC} + x_{CO_1}\Gamma_{CO} + \quad (2) \\ + x_{OO_1}\Gamma_{OO} + x_{CCC_1}\Delta_{CCC} + x_{CCO_1}\Delta_{CCO} + x_{COO_1}\Delta_{COO}.$$

Во втором приближении учитывается еще и взаимное влияние атомов, удаленных не далее чем через два скелетных атома по цепи молекулы:

$$P_{C_nH_{2n+2}O_2} = h_{CC}p_{C-C} + h_{CO}p_{C-O} + h_{CH}p_{C-H} + x_{CC_1}\Gamma_{CC} + x_{CO_1}\Gamma_{CO} + \quad (3) \\ + x_{OO_1}\Gamma_{OO} + x_{CCC_1}\Delta_{CCC} + x_{CCO_1}\Delta_{CCO} + x_{COO_1}\Delta_{COO} + x_{CC_2}\tau_{CC} + x_{CO_2}\tau_{CO} + x_{OO_2}\tau_{OO}.$$

В третьем приближении добавляется также и взаимное влияние атомов, удаленных не далее чем через три скелетных атома по цепи молекулы:

$$P_{C_nH_{2n+2}O_2} = h_{CC}p_{C-C} + h_{CO}p_{C-O} + h_{CH}p_{C-H} + x_{CC_1}\Gamma_{CC} + x_{CO_1}\Gamma_{CO} + \quad (4) \\ + x_{OO_1}\Gamma_{OO} + x_{CCC_1}\Delta_{CCC} + x_{CCO_1}\Delta_{CCO} + x_{COO_1}\Delta_{COO} + x_{CC_2}\tau_{CC} + x_{CO_2}\tau_{CO} + \\ + x_{OO_2}\tau_{OO} + x_{CC_3}\omega_{CC} + x_{CO_3}\omega_{CO} + x_{OO_3}\omega_{OO}$$

и т.д.

При определенных допущениях схема (4) переходит в (3), схема (3) – в схему (2), а последняя – в схему (1).

Формулы (1)–(4) удобны для массового расчета и прогнозирования различных свойств двухатомных спиртов, в том числе и энтальпии образования.

Для двухатомных спиртов схемы (1)–(4) могут быть записаны через ТИ. Так, в третьем приближении получаем

$$P_{C_nH_{2n+2}O_2} = a + bn + p_2\Gamma_{CC} + p'_2\Gamma_{CO} + p''_2\Gamma_{OO} + R\Delta_{CC} + \quad (5)$$

$$+ R'\Delta_{CCO} + R''\Delta_{COO} + p_3\tau_{CC} + p'_3\tau_{CO} + p''_3\tau_{OO} + p_4\omega_{CC} + p'_4\omega_{CO} + p''_4\omega_{OO},$$

где p_2, p_3, p_4, \dots – такие индексы, как число путей длины два, три, четыре; R – число троек смежных ребер; n – число атомов углерода; b, Γ_{CC} – параметры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После анализа экспериментальных данных по энтальпии образования $\Delta_f H^\circ_{298(\text{ж})}$ двухатомных спиртов можно установить следующие закономерности [1, 2, 11]:

1. Энтальпия образования зависит от длины цепи молекулы. Данная зависимость носит линейный характер для гомологов аналогичного строения. Это говорит о постоянном энергетическом вкладе CH_2 -группы.

2. При увеличении длины цепи молекулы $\Delta_f H^\circ_{298(\text{ж})}$ уменьшается (табл. 1).

3. Разности энергий между структурными изомерами двухатомных спиртов достигают 40 кДж/моль, причем наименьшее значение $\Delta_f H^\circ_{298(\text{ж})}$ имеют неразветвленные двухатомные спирты с гидроксильными группами, расположенными у соседних атомов углерода (табл. 1).

4. Энтальпия образования уменьшается при разветвлении молекул (табл. 1).

Таблица 1

Энтальпии образования двухатомных спиртов
в жидкой фазе (кДж/моль)

№	Молекула	$\Delta_f H^\circ_{298(\text{ж})}$ Опыт [15]
1	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-453,3
2	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	-485,7
3	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-464,9
4	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-501,0
5	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-503,3
6	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$	-541,5
7	$(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	-539,7
8	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-531,5

В табл. 2 и 3 приведены найденные МНК значения энтальпийных параметров и результаты расчета энтальпий образования в жидкой фазе ряда двухатомных спиртов по схемам (1)–(4) и (5) соответственно.

Из-за нехватки экспериментальных данных получились системы с линейно зависимыми столбцами, поэтому в схемах (1)–(4) параметры p_{c-n} , Γ_{oo} , Δ_{coo} и ω_{cc} пропадают, параметры p_{c-c} , p_{c-o} заменены на параметр a , а параметры Γ_{cc} и Γ_{co} , Δ_{ccc} и Δ_{cco} , τ_{cc} и τ_{co} – на параметры b , c и d .

Здесь

$$\begin{aligned} a &= h_{cc}p_{c-c} + h_{co}p_{c-o}; \\ b &= x_{cc_1}\Gamma_{cc} + x_{co_1}\Gamma_{co}; \\ c &= x_{ccc_1}\Delta_{ccc} + x_{cco_1}\Delta_{cco}; \\ d &= x_{cc_2}\tau_{cc} + x_{co_2}\tau_{co}. \end{aligned}$$

В схеме (5) пропадают параметры Γ_{co} , Γ_{oo} , Δ_{coo} и ω_{cc} (по той же причине), а параметры Δ_{ccc} и Δ_{cco} , τ_{cc} и τ_{co} , ω_{co} и ω_{oo} заменены на параметры c , d и f , где

$$c = R\Delta_{ccc} + R'\Delta_{cco};$$

$$d = p_3\tau_{cc} + p_3'\tau_{co};$$

$$f = p_4'\omega_{co} + p_4''\omega_{oo}.$$

Таблица 2

Параметры схем и результаты расчета энтальпий образования
в жидкой фазе двухосновных спиртов (кДж/моль)
в разных приближениях по схемам (1)–(4)

Параметр	Значения параметров оценки при их различном числе $\Delta_f H^\circ(\text{ж}, 298 \text{ К})$				
	1	2	3	5	7
a	-106,095	-106,427	-392,788	-357,178	-376,394
b	–	0,328	365,507	327,289	368,876
c	–	–	-376,439	-331,137	-377,347
d	–	–	–	-6,918	-19,129
τ_{oo}	–	–	–	-33,626	-60,706
ω_{co}	–	–	–	–	-20,112
ω_{oo}	–	–	–	–	-8,565
$ \bar{\varepsilon} $	52,3	52,5	6,9	2,5	0,6
ε_{\max}	135,0	-134,7	17,7	5,8	-1,6

Таблица 3

Параметры схем и результаты расчета энтальпий образования
в жидкой фазе двухосновных спиртов (кДж/моль)
в разных приближениях по схеме (5)

Параметр	Значения параметров оценки при их различном числе $\Delta_f H^\circ(\text{ж}, 298 \text{ К})$				
	2	3	4	6	7
a	-390,230	-363,533	-340,094	-358,648	-388,537
b	-31,002	-27,058	-27,035	-29,824	-4,800
Γ_{cc}	–	-14,258	-25,630	0,824	23,762
c	–	–	9,172	-4,437	-23,900
d	–	–	–	-7,070	-25,837
τ_{oo}	–	–	–	-33,989	-103,500
f	–	–	–	–	-31,975
$ \bar{\varepsilon} $	14,0	6,7	6,5	2,8	0,6
ε_{\max}	27,3	-13,5	-15,0	5,8	1,6

В зависимости от полноты учета влияния несвязанных атомов согласованность рассчитанных и экспериментальных значений $\Delta_f H^\circ(\text{ж}, 298 \text{ К})$ увеличивается.

Те рассчитанные величины, которые согласуются с экспериментальными, позволяют предсказать недостающие значения энтальпии образования членов исследуемого ряда.

В табл. 4 и 5 представлены параметры схем расчета (4) и (5), а в табл. 6 – результаты расчета энтальпии образования в жидкой фазе двухатомных спиртов C₂-C₅ по схеме (5).

Таблица 4

Параметры расчета свойств двухатомных спиртов в жидкой фазе (схема (4))

Молекула	Число параметров						
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	τ_{OO}	ω_{CO}	ω_{OO}
HOCH ₂ CH ₂ OH	3	2	0	0	1	0	0
CH ₃ CH(OH)CH ₂ OH	4	4	1	1	1	0	0
HOCH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	4	3	0	3	0	0	1
CH ₃ CH(OH)CH ₂ CH ₂ OH	5	5	1	3	0	1	1
HOCH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	5	4	0	3	0	2	0
CH ₃ CH(OH)CH(OH)CH ₃	5	6	2	3	1	0	0
(CH ₃) ₂ C(OH)CH ₂ OH	5	8	4	2	1	0	0
HOCH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	6	5	0	4	0	2	0

Таблица 5

Параметры расчета свойств двухатомных спиртов в жидкой фазе (схема (5))

Молекула	Число параметров						
	<i>a</i>	<i>b</i>	Γ_{CC}	<i>c</i>	<i>d</i>	τ_{OO}	<i>f</i>
HOCH ₂ CH ₂ OH	1	2	0	0	0	1	0
CH ₃ CH(OH)CH ₂ OH	1	3	1	1	1	1	0
HOCH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	1	3	1	0	3	0	1
CH ₃ CH(OH)CH ₂ CH ₂ OH	1	4	2	1	3	0	2
HOCH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	1	4	2	0	3	0	2
CH ₃ CH(OH)CH(OH)CH ₃	1	4	2	2	3	1	0
(CH ₃) ₂ C(OH)CH ₂ OH	1	4	3	4	2	1	0
HOCH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	1	5	3	0	4	0	2

Таблица 6

Результаты расчета энтальпий образования двухатомных спиртов в жидкой фазе по схеме (5) (кДж/моль)

№	Молекула	$\Delta_f H^\circ_{298(ж)}$	
		Опыт [15]	Расчет
1	CH ₃ CH(OH) ₂	–	–398,1
2	HOCH ₂ CH ₂ OH	–453,3	–452,1
3	CH ₃ CH ₂ CH(OH) ₂	–	–430,8
4	CH ₃ CH(OH)CH ₂ OH	–485,7	–487,3
5	HOCH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	–464,9	–464,9
6	(CH ₃) ₂ C(OH) ₂	–	–427,0
7	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH(OH) ₂	–	–596,7
8	CH ₃ CH ₂ CH(OH)CH ₂ OH	–	–597,1
9	CH ₃ CH(OH)CH ₂ CH ₂ OH	–501,0	–501,0

Окончание табл. 6

№	Молекула	$\Delta_f H^\circ_{298(\text{ж})}$	
		Опыт [15]	Расчет
10	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-503,3	-504,1
11	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{OH})_2\text{CH}_3$	-	-485,5
12	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$	-541,5	-541,5
13	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}(\text{OH})_2$	-	-487,6
14	$(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	-539,7	-539,3
15	$(\text{CH}_2\text{OH})\text{CHCH}_2\text{OH}$	-	-495,7
16	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})_2$	-	-508,5
17	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	-	-604,0
18	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-	-558,3
19	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-	-532,4
20	$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-531,5	-530,7
21	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}(\text{OH})_2\text{CH}_3$	-	-556,3
22	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$	-	-653,7
23	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$	-	-588,3
24	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{OH})_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	-	-544,1
25	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}(\text{OH})_2$	-	-572,6
26	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	-	-661,9
27	$(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-	-612,4
28	$(\text{HO})_2\text{CHCH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3$	-	-560,4
29	$\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	-	-534,5
30	$(\text{HOCH}_2)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_3$	-	-592,3
31	$\text{HOCH}_2\text{C}(\text{OH})(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3$	-	-526,4
32	$(\text{CH}_3)_2\text{CHC}(\text{OH})_2\text{CH}_3$	-	-544,2
33	$(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$	-	-669,7
34	$\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$	-	-558,4
35	$(\text{CH}_3)_3\text{CC}(\text{OH})_2$	-	-520,6
36	$(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$	-	-552,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены закономерности, связывающие энтальпию образования со строением двухатомных спиртов. Установлено, что энтальпия образования зависит от длины цепи молекулы и носит линейный характер для гомологов аналогичного строения, что говорит о постоянном энергетическом вкладе CH_2 -группы. При увеличении длины цепи молекулы и ее разветвленности энтальпия образования $\Delta_f H^\circ_{298(\text{ж})}$ уменьшается. Разности энергий между структурными изомерами двухатомных спиртов достигают 40 кДж/моль, причем наименьшее значение $\Delta_f H^\circ_{298(\text{ж})}$ имеют неразветвленные двухатомные спирты с гидроксильными группами, расположенными у соседних атомов углерода.

Были выведены также рабочие формулы для расчета энтальпии образования соединений. По данным схемам проведено систематическое расчетно-теоретическое исследование. Расчетным путем получена новая числовая информация об энтальпии образования двухатомных спиртов. Эти данные могут быть использованы химиками-

технологами и инженерами-химиками при проведении термодинамических расчетов технологических процессов в нефтехимии и химии топлива, а также при подготовке справочных изданий по термодинамическим свойствам веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папулов Ю.Г., Виноградова М.Г. Расчетные методы в атом-атомном представлении. Тверь: ТвГУ, 2002. 232 с.
2. Виноградова М.Г. Расчетные методы исследования взаимосвязи «структура – свойство» в атом-атомном представлении: дис. ... докт. хим. наук. Тверь, 2004. 440 с.
3. Степанов Н.Ф., Ерлыкина М.Е., Филиппов Г.Г. Методы линейной алгебры в физической химии. М.: МГУ, 1976. 360 с.
4. Яровой С.С. Методы расчета физико-химических свойств углеводородов. М.: Химия, 1978. 256 с.
5. Виноградова М.Г., Жерихова А.М. Энергия Гиббса алкинов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 2 (3). С. 292–293.
6. Орлов Ю.Д., Лебедев Ю.А., Сайфуллин И.Ш. Термохимия органических свободных радикалов. М.: Наука, 2001. 304 с.
7. Орлов Ю.Д., Лебедев Ю.А. Взаимосвязь феноменологических методов расчета энтальпий образования свободных радикалов (энергий диссоциации химических связей) // *Журнал физической химии*. 1993. Т. 67. № 5. С. 925–932.
8. Папулов Ю.Г., Виноградова М.Г. Энергия химических связей: основные закономерности и методы расчета: обзор // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия»*. 2006. № 8 (25). Вып. 3. С. 5–39.
9. Vinogradova M.G., Fedina Yu.A., Papulov Yu.G. Graph Theory in Structure–Property Correlations. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2016. Vol. 90. No. 2, pp. 411–416.
10. Виноградова М.Г., Папулов Ю.Г. Теоретико-графовые методы в химии: учебное пособие. Тверь: Тверской государственный университет, 2013. 88 с.
11. Виноградова М.Г. Энтальпия образования в кетонах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2019. № 2 (2). С. 75–82.
12. Pedley I.B., Naylor R.D., Kirly S.P. Thermochemical Data of Organic Compounds. London; New York: Chapman and Hall, 1986. 792 p.
13. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / под ред. В.П. Глушко. М.: Наука, 1978. Т. 1. 495 с.; 1979. Т. 2. 431 с.
14. Сталл Д., Вестрам Э., Зинке Г. Химическая термодинамика органических соединений. М.: Мир, 1971. 944 с.
15. Lange's Handbook of Chemistry / Editor: J.A. Dean. (15th Edition), McGraw-Hill. 1999. URL: <http://fptl.ru/biblioteka/spravo4niki/dean.pdf> (дата обращения: 10.12.2021).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВИНОГРАДОВА Марина Геннадьевна – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33. E-mail: Vinogradova.MG@tversu.ru

КОЗЛОВА Рада Романовна – студентка кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33. E-mail: cozlovarada@yandex.ru

САВЕЛЬЕВА Татьяна Алексеевна – студентка кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет», 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33. E-mail: savelievatanya13@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Виноградова М.Г., Козлова Р.Р., Савельева Т.А. Энтальпия образования двухатомных спиртов. Численные расчеты и основные закономерности // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 71–79.

THE ENTHALPY OF FORMATION OF DIATOMIC ALCOHOLS. NUMERICAL CALCULATIONS AND BASIC REGULARITIES

M.G. Vinogradova, R.R. Kozlova, T.A. Savelyeva
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The enthalpy of formation of $\Delta_f H^\circ_{298(1g)}$ diatomic alcohols is discussed. Working formulas are derived, and their graph-theoretic interpretation is given. Numerical calculations consistent with the experiment are carried out. New data have been obtained. A number of regularities linking the enthalpy of formation with the structure of diatomic alcohols have been established. It is found that the enthalpy of formation depends on the chain length, branching diatomic alcohols and location of hydroxyl groups.

Keywords: structure, education enthalpy, calculation methods.

REFERENCES

1. Papulov Y.G., Vinogradova M.G. Calculation Modi Atom, Atom in Repraesentationem [Calculation Methods in Atom-atom Representation]. Tver: Tver State University, 2002. 232 p.
2. Vinogradova M.G. Computational Methods for the Study of the Relationship «Structure-property» in the Atom-atom Representation: Dis. ... Doctor (Chemical Sciences). Tver, 2004. 440 p.
3. Stepanov N.F., Erlykina M.E., Filippov G.O. Linear Algebra Physica Elit in Elit [Methods of Linear Algebra in Physical Chemistry]. Moscow: MGU, 1976. 360 p.
4. Yarovoy S.S. Quia Modi Proprietatibus Computandi Triangulorum & Physico Chymicam Hydrocarbonum [Methods for Calculating the Physicochemical Properties of Hydrocarbons]. Moscow: Quaestiones, 1978. 256 p.
5. Vinogradova M.G., Zherikhova A.M. Gibbs Energy of Alkynes. *Acta De International Research and Latin*. 2016. No. 2 (3), pp. 292–293. (In Russian).
6. Orlov Y.D., Lebedev Y.A., Saifullin I.Sh. Thermochemistry Organicum Liberum Radicalis [Thermochemistry of Organic Free Radicals]. Moscow: Nauka, 2001. 304 p.
7. Orlov Y.D., Lebedev Y.A. The Relationship of Phenomenological Methods for Calculating the Enthalpies of Formation of Free Radicals (Dissociation Energies of Chemical Bonds). *Zh. Nat. Chemia*. Vol. 67. 1993. No. 5, pp. 925–932 (In Russian).
8. Papulov Y.G., Vinogradova M.G. Energy of Chemical Bonds: Basic Laws and Methods of Calculation: overview. *Vestnik Tver de re Publica University. «Chemia» series*. 2006. No. 8 (25). Vol. 3, pp. 5–39. (In Russian).
9. Vinogradova M.G., Fedina Yu. A., Papulov Yu.G. Graph Theory in Structure–Property Correlations. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2016. Vol. 90. No. 2, pp. 411–416.

10. Vinogradova M.G., Papulov Y.G. *Teoretiko-grafovye Metody v Himii: Uchebnoe Posobie*. [Theoretical and Graph Methods in Chemistry: Tutorial.] Tver: Tver State University, 2013. 88 p.
11. Vinogradova M.G. *Ketones Confractus Necessitudines in Industria. Secundum Numerum Basic Rationes et Leges. Technical Vestnik de Tver publica University. Series «Construction. Et electrica engineering eget technology»* 2019. No. 2 (2), pp. 70–78. (In Russian).
12. Pedley I.B., Naylor R.D., Kirly S.P. *Thermochemical Data of Organic Compounds*. London; New York: Chapman and Hall, 1986. 792 p.
13. *Termodinamicheskie Individuae Sunt Substantiae Proprietatibus* [Thermodynamic Properties of Individual Substances] / Ed. Glushko. Moscow: Science, 1978. Vol. 1, p. 495; CDXXXI. 1979. Vol. 2, p. 431.
14. Stall D., Vastra L., Zinke H. *Donec Termodinámica de Organic Composita* [Chemical Thermodynamics of Organic Compounds]. Moscow: Undique, 1971, p. 944.
15. *De Historiae Lange* [Lange's Handbook of Chemistry] / Editor: J.A. Dean. (15 Edition) Nabu. 1999. URL: <http://fptl.ru/biblioteka/spravo4niki/dean.pdf> (date of access: 10.12.2021).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

VINOGRADOVA Marina Gennadievna – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of Physical Chemistry, Tver State University, 33, Zhelyabova st., Tver, 170100, Russia. E-mail: Vinogradova.MG@tversu.ru

KOZLOVA Rada Romanovna – Student of the Department of Physical Chemistry, Tver State University, 33, Zhelyabova St., Tver, 170100, Russia. E-mail: cozlovarada@yandex.ru

SAVEL'EVA Tat'yana Alekseevna – Student of the Department of Physical Chemistry, Tver State University, 33, Zhelyabova st., Tver, 170100, Russia. E-mail: savelievatanya13@gmail.com

CITATION FOR AN ARTICLE

Vinogradova M.G., Kozlova R.R., Savelyeva T.A. The Enthalpy of Formation of Diatomic Alcohols. Numerical Calculations and Basic Regularities // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology»*. 2021. No. 1 (9), pp. 71–79.

УДК 627.157:002.637(282.247.41)

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Иванов Г.Н., Кривенко И.В.,
Смирнова М.А., Испирян С.Р., 2021

Аннотация. Изучена актуальная проблема внутрихозяйственного землеустройства – оценка состояния водных объектов и общего уровня техногенной нагрузки на них. Отмечено, что одним из наиболее объективных и надежных показателей, необходимых для

такой оценки, является содержание тяжелых металлов в донных отложениях водного объекта. Систематизированы и описаны различные методики оценки загрязнения донных отложений тяжелыми металлами, основанные на использовании региональных кларков элементов в почвах и донных отложениях фоновых и условно фоновых территорий. Приведены и проанализированы методики расчета различных критериев, отражающих степень загрязненности донных отложений тяжелыми металлами, и сделаны выводы об экологических рисках.

Ключевые слова: землеустройство, состояние водного объекта, донные отложения, тяжелые металлы, степень загрязненности водных объектов.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-79-86

ВВЕДЕНИЕ

Внутрихозяйственное землеустройство носит комплексный характер. Оно включает вопросы мелиорации, водоснабжения, экологического состояния водных объектов.

Одним из наиболее объективных и надежных показателей состояния водного объекта и общего уровня техногенной нагрузки является содержание тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях (ДО), поскольку последние отражают многолетние процессы накопления и трансформации веществ в водном объекте.

С одной стороны, накопление ТМ в ДО способствует самоочищению водных объектов, а с другой – возникает опасность вторичного загрязнения воды в результате залпового выброса ТМ из ДО в связи с изменением внешних условий (взмучиванием ДО и др.) При проведении мелиоративных дноуглубительных работ в водных объектах возникают проблемы утилизации ДО или их использования для повышения плодородия почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы оценить техногенные воздействия на природные (в том числе водные) объекты, используют региональные кларки элементов в областях фоновых территорий, сходных с исследуемым объектом по каким-либо критериям (климатическим, ландшафтным и т.д.). Часто рассматривают также концентрации элементов на отдельных участках исследуемого объекта, принимаемых «условно фоновыми» (например, расположенных выше по течению от источника загрязнений). В геохимии применяются методики определения аномальных (повышенных или пониженных) концентраций элемента по отношению к его фону [1].

Важное значение в эколого-геохимических исследованиях имеет степень загрязненности ДО. Существующие критерии степени загрязнения можно разделить на два типа: градацию кратности превышения содержания элемента в ДО относительно фона и градацию с учетом токсического воздействия элемента на биоту водоема.

В основе критериев степени загрязнения ДО ТМ лежит коэффициент концентрации, определяемый формулой

$$K_c = \frac{C_n}{C_\phi}, \quad (1)$$

где C_n и C_ϕ – фактическое и фоновое содержание элемента в пробе, мг/кг.

В качестве фона иногда применяют критерии качества ДО – уровни условно-безопасного содержания ТМ в седиментах.

Для оценки накопления ТМ в ДО используют показатель накопления $ПН$:

$$ПН = \frac{C_i - C_\phi}{C_\phi} 100 \%, \quad (2)$$

где C_i и C_ϕ – концентрации i -го элемента на рассматриваемом участке водного объекта и на фоновом.

Чтобы дать оценку загрязнения n -му числу ТМ, используют средний коэффициент концентрации:

$$K_{C\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Ci}}{n} \quad (3)$$

При выработке критерия степени загрязнения необходимо четко выделить градацию уровней загрязнения, без которой сложно судить о степени техногенной нагрузки.

Например, для каждого i -го пункта наблюдения суммируется коэффициент концентрации (K_{Cj}) всех определяемых j -х металлов: $K_{Ci} = \sum K_{Cj}$. Затем проводится так называемое триадное приближение для каждого i -го пункта:

$$K'_{C\phi} = 1 + (100 - 1) \frac{K_{Ci} - K_{Cmin}}{K_{Cmax} - K_{Cmin}}, \quad (4)$$

где K_{Cmin} и K_{Cmax} – минимальный и максимальный K_{Ci} среди всех i -х пунктов наблюдения. Использование формулы (4) позволяет ввести градацию загрязнения от 1 до 100.

Одним из критериев техногенного загрязнения ДО является предложенный Институтом минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов суммарный показатель загрязнения Z_c , который рассчитывается для каждого пункта наблюдений по формуле

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_{Ci} + (n - 1), \quad (5)$$

где K_{Ci} – коэффициент концентрации i -го элемента; n – число определяемых элементов.

Градация суммарного показателя загрязнения Z_c (для 15 элементов, включенных Минздравом РФ в три класса опасности): допустимый (0–16); умеренно опасный (17–64); опасный (≥ 65).

Суммарный показатель загрязнения C_d , учитывающий верхнюю вероятностную статистическую границу разброса фонового содержания элементов в ДО, основан на суммировании превышения концентраций n -го количества определяемых элементов в ДО над фоновыми:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi}, \quad (6)$$

где C_{fi} – коэффициент загрязнения i -м элементом:

$$C_{fi} = \frac{C_i}{C_{\phi i} + S_{\phi i}}, \quad (7)$$

где $S_{\phi i}$ – стандартное отклонение фонового содержания i -го элемента C_{fi} .

Для одного элемента $C_f < 1$ – низкий коэффициент загрязнения; $1 \leq C_f < 3$ – умеренный; $3 \leq C_f < 6$ – значительный; $C_f \geq 6$ – очень высокий (серьезное антропогенное загрязнение).

Для n -го количества элементов градация C_d выглядит следующим образом: незагрязненные ДО – $C_d < (n - 1)$; умеренно загрязненные – $(n - 1) \leq C_d < 2(n - 1)$; значительно загрязненные – $2(n - 1) \leq C_d < 4(n - 1)$; сильно загрязненные (до чрезвычайно загрязненных – $C_d \geq 4(n - 1)$) [2].

В последние годы широкое применение в геоэкологических исследованиях получила методика Г. Мюллера [3, 4]. Для оценки загрязнения водного объекта ТМ используются данные по содержанию ТМ во фракции ДО менее 20 мкм и рассчитываются так называемые $I_{\text{гео}}$ -классы. Доказано, что именно во фракции ДО менее 20 мкм (по европейской классификации – глины) наиболее активно сорбируются микроэлементы. Учитываются различия в гранулометрическом составе проб ДО, отобранных на различных участках водных объектов.

«Индексы геоаккумуляции» (или $I_{\text{гео}}$ -классы) определяются уравнением, лежащим в основе разделения по классам качества:

$$I_{\text{гео}, n} = \log_2(C_n/1,5 B_n), \quad (8)$$

где C_n – измеренная концентрация элемента n в ДО (фракция менее 20 мкм); $1,5 B_n$ – фоновая концентрация элемента n (в глинах), которая устанавливается по данным источника [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 приведены значения концентраций основных металлов по $I_{\text{гео}}$ -классам. На основе $I_{\text{гео}}$ -классов определен уровень загрязнения водных объектов (табл. 2).

Таблица 1

Значения концентраций основных металлов по $I_{\text{гео}}$ -классам, мг/кг

Элемент	$I_{\text{гео}}$ -классы						
	0	1	2	3	4	5	6
Fe	7,08	14,16	28,32	56,64	>56,64	–	–
Mn	1 275	2 550	5 100	10 200	20 400	40 800	>40 800
Cd	0,45	0,9	1,8	3,6	7,2	14,4	>14,4
Zn	142,5	285	570	1 140	2 280	4 560	>4 560
Pb	30	60	120	240	480	960	>960
Cu	67,5	135	270	540	1 080	2 160	>2 160
Ni	102	204	408	816	1 632	3 264	>3 264
Cr	135	270	540	1 080	2 160	4 320	>4 320
Hg	0,6	1,2	2,4	4,8	9,6	19,2	>19,2

Таблица 2

Классы загрязненности ДО	
$I_{\text{гео}}$ -класс	Уровень загрязнения ДО
0	Незагрязненные
1	Незагрязненные (до умеренно загрязненных)
2	Умеренно загрязненные
3	Среднезагрязненные
4	Сильно загрязненные
5	Сильно загрязненные (до чрезвычайно загрязненных)
6	Чрезвычайно загрязненные

Международными природоохранными организациями предложены критерии качества ДО для условной оценки степени загрязнения водных объектов (табл. 3) [5].

Таблица 3

Сравнительная оценка загрязненности ДО						
Уровень загрязнения ДО	Содержание элементов, мг/кг					
	Zn	Pb	Cu	Cd	Cr	Hg
Незагрязненные	<90	<40	<25	–	<25	<1,0
Умеренно загрязненные	90–200	40–60	25–50	–	25–75	–
Сильно загрязненные	>200	>60	>50	>6	>75	>1,0

Критерии токсичности необходимы для оценки, так как при поступлении загрязнителей из ДО в воду (вторичном загрязнении) создается опасность токсического воздействия на биоту водоема.

Наиболее информативным для оценки токсичности загрязнений ТМ можно считать индекс потенциального экологического риска RI [5, 6], который находится как сумма потенциальных экологических рисков E_r для каждого элемента:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_{ri}. \quad (9)$$

Для i -го элемента в ДО индекс риска устанавливается по формуле

$$E_{ri} = T_{ri} C_{fi}, \quad (10)$$

где C_{fi} – коэффициент загрязнения, определяемый по выражению (7); T_{ri} – коэффициент токсичности i -го элемента, сформулированный по уравнению

$$T_{ri} = \frac{A_i \sqrt{5}}{\sqrt{BPI}}, \quad (11)$$

где BPI – индекс биопродуктивности водоема, устанавливаемый на основе зависимости между BPI и содержанием общего фосфора в воде; A_i – коэффициент токсичности i -го элемента, равный 90 для Hg, 30 для Cd, 8 для Co, 5 для Pb, 3 для Ni и Cu, 1 для Zn.

Градации потенциального экологического риска E_r : низкий – $E_r < 40$; умеренный – $40 \leq E_r < 80$; значительный – $80 \leq E_r < 160$; высокий – $160 \leq E_r < 320$; очень высокий – $E_r \geq 320$.

Градации риска: низкий – $RI < 150$; умеренный – $150 \leq RI < 300$; значительный – $300 \leq RI < 600$; очень высокий – $RI \geq 600$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе приведенных выше методик исследованы водные объекты Тверской области и рассчитаны уровни загрязнения ДО ТМ таких значимых объектов, как озеро Селигер [4], участок Верхней Волги от истока до Угличского водохранилища [2] и др. Составлены подробные карты загрязнений ДО ТМ. Методики оценки уровней загрязнения ДО ТМ, систематизированные в настоящей работе, подтвердили свою эффективность на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М.: Лотос, 2000. 627 с.
2. Косов В.И., Левинский В.В., Косова И.В. Экология Верхневолжской водной системы. Тверь: Булат, 2003. 180 с.
3. Muller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins: Veranderungen Seitt 1971. *Umschau*. 1979. Vol. 79, pp. 778–783.
4. Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Аверкина Т.И., Самарин Е.Н., Иванов Г.Н., Мюллер Г., Яхья А. Загрязнение водных экосистем озера Селигер тяжелыми металлами // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2004. № 5. С. 43–46.
5. Kwon Y.-T., Lee C.-W. Application of Multiple Ecological Risk Indices for the Evaluation of Heavy Metal Contamination in a Coastal Dredging Area. *The Science of the Total Environment*. 1998. Vol. 214, pp. 203–210.
6. Kwon Y.-T., Lee C.-W. Sediment Metal Speciation for the Ecology Risk Assessment. *Analytical Science*. 2001. Vol. 17 (5), pp. 653–658.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Григорий Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры горного дела, природообустройства и промышленной экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

КРИВЕНКО Ирина Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

СМИРНОВА Марина Анатольевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информатики и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: mar-smir@yandex.ru

ИСПИРЯН Светлана Рафаиловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Методы оценки загрязнения донных отложений тяжелыми металлами // Вестник Тверского государственного тех-

нического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 79–86.

METHODS FOR ESTIMATING POLLUTION OF BOTTOM SEDIMENTS WITH HEAVY METALS

G.N. Ivanov, I.V. Krivenko, M.A. Smirnova, S.R. Ispirian
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The paper deal with learning actual problem on-farm land management that is estimating of the state of water bodies and the overall level of their technogenic load. It is noted that one of the most objective and reliable indicators required for such estimating is the content of heavy metals in the bottom sediments of a water body. We are systematized and described various methods for estimating pollution of bottom sediments with heavy metals, which based on the using the regional clarks of the content the elements in the soils and bottom sediments of background and conditionally background territories. Methods for calculating various criteria that reflect the degree of pollution the bottom sediments with heavy metals and conclusions about environmental risks based on such calculations are presented and analyzed.

Keywords: land management, state of the water body, bottom sediments, heavy metals, pollution degree of water bodies.

REFERENCES

1. Alekseenko V.A. *Ekologicheskaya Geoximiya*. Moscow: Lotos, 2000. 627 p. (In Russian).
2. Kosov V.I., Levinskij V.V., Kosova I.V. *Ekologiya Verxnevolzhskoj Vodnoj Sistemy*. Tver: Bulat, 2003 180 p. (In Russian).
3. Muller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins: Veranderungen seitt 1971. *Umschau*. 1979. Vol. 79, pp. 778–783.
4. Kolomijcev N.V., Korzhenevskij B.I., Ilina T.A., Averkina T.I., Samarin E.N., Ivanov G.N., Muller G., Yahia A. Zagryaznenie vodnyx ekosistem ozera Seliger tyazhelymi metallami. *Melioraciya i Vodnoe Khozyajstvo*. 2004. No. 5, pp. 43–46. (In Russian).
5. Kwon Y.-T., Lee C.-W. Application of Multiple Ecological Risk Indices for the Evaluation of Heavy Metal Contamination in a Coastal Dredging Area. *The Science of the Total Environment*. 1998. Vol. 214, pp. 203–210.
6. Kwon Y.-T., Lee C.-W. Sediment Metal Speciation for the Ecology Risk Assessment. *Analytical Science*. 2001. Vol. 17 (5), pp. 653–658.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

IVANOV Grigory Nikolaevich – Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining, Environmental Management and Industrial Ecology, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

KRIVENKO Irina Valer'ena – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

SMIRNOVA Marina Anatol'evna – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mar-smir@yandex.ru

ISPIRYAN Svetlana Rafailovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispirian S.R. Methods for Estimating Ollution of Bottom Sediments with Heavy Metals // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology». 2021. No. 1 (9), pp. 79–86.

УДК 539.2

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ СН-ЭВМ: ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

И.А. Саврасов

ООО СК «ИнжГидроПроектСтрой» (г. Санкт-Петербург)

© Саврасов И.А., 2021

Аннотация. Рассмотрен химический состав образцов, использованных в исследованиях процессов сложного деформирования материалов на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ Тверского государственного технического университета. Состав оценивался газообъемным, титриметрическим и гравиметрическим методами. Сделан вывод о его соответствии марке стали 45 по ГОСТ 1050-88.

Ключевые слова: сложное деформирование материалов, титриметрический метод, химический состав, силоизмеритель.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-86-90

При изучении процессов сложного деформирования материалов и их структуры были использованы трубчатые цилиндрические образцы и проведено экспериментальное исследование их напряженно-деформированного состояния при растяжении с кручением в пространстве деформаций (рис. 1). Образцы из стали 45 с толщиной стенки $h = 1$ мм, радиусом срединной поверхности $R = 15,5$ мм, длиной рабочей части $l = 110$ мм подвергались деформированию при $\sigma_t = 320$ МПа. Материал образцов был начально изотропен. Модуль упругости образцов $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. При обработке экспериментальных данных принималось условие несжимаемости ($\varepsilon_0 = 0$).



Рис. 1. Модернизированный измеритель деформации

Все опыты проводились в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета. Комплекс СН-ЭВМ, на котором выполнялись исследования, состоит из нагружающей установки, осуществляющей трехпараметрическое воздействие на образец (осевое нагружение, кручение и внутреннее давление), датчиков усилий и деформаций, измерительных преобразователей сигналов датчиков, аналого-цифрового комплекса, системы графического отображения информации (монитора ЭВМ), управляющей ЭВМ с устройством связи и блока управления (рис. 2).



Рис. 2. Автоматизированный экспериментальный комплекс СН-ЭВМ

Нагрузки, действующие на образец (осевая сила и крутящий момент), фиксировались с помощью силоизмерителя, который включает в себя круглую мембрану и элемент типа «белочья клетка» с наклеенными на них тензорезисторами (рис. 3).



Рис. 3. Силовизмеритель

Тензорезисторы рассчитаны на осевую силу 60 кН и крутящий момент 0,5 кНм. Погрешность в определении компонент нагрузки не превышает 1 %.

Для определения химического состава лаборатория ООО СК «ИнжГидроПроект-Строй» (г. Санкт-Петербург) выбрала расчлененный способ.

При определении углерода применяли газообъемный метод на газоанализаторе ГОУ-1 (ГОСТ 22536.1-88). Метод основан на сжигании навески стали в потоке кислорода при температуре 1 250–1 350 °С с последующим поглощением образующегося диоксида углерода раствором гидроксида калия.

При определении кремния был использован гравиметрический метод (ГОСТ 22536.4-88), основанный на выделении кремния из кислого раствора в виде полимеризованной кремниевой кислоты, последующей дегидратации этой кислоты и взвешивании полученного диоксида кремния. В качестве оборудования применялась электропечь сопротивления лабораторная SNOL 6,7/1300.

Для определения хрома применялся титриметрический метод (ГОСТ 22536.7-88), основанный на окислении хрома (III) надсернонокислым аммонием до хрома (VI) в серно-кислой среде в присутствии азотнокислого серебра. Хромовую кислоту восстанавливали раствором соли железа (II) и устанавливали конечную точку титрования потенциометрически. В качестве аппаратуры применяли два электрода – индикаторный (платиновый) и сравнения (вольфрамовый), рН-метр.

Титриметрический метод использовали также для определения марганца (ГОСТ 22536.5-87). В серноокислом растворе надсернонокислым аммонием окисляли двухвалентный марганец до семивалентного в присутствии азотнокислого серебра. Полученную марганцевую кислоту оттитровывали раствором арсенит-нитрита натрия.

Результаты исследований представлены в таблице.

Химический анализ материалов

Наименование материала	Содержание элементов, %			
	C	Si	Cr	Mn
Цилиндрические образцы	0,45	0,33	0,11	0,59

Сравнивая эти значения со значениями табл. 1 из ГОСТ 1050-88, можно сделать вывод, что химический состав данных образцов соответствует марке стали 45.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулятьев В.И. Закономерности пластического деформирования конструкционных материалов при сложном нагружении: дис. ... докт. техн. наук. Тверь, 2012. 43 с.
2. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gultiaev V.I. Modeling of Deformation Processes of Structural Steels Along Circular Paths. *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis*. 2020, p. 012186.
3. Патент РФ 15396. *Тензомер для измерения деформаций образца при сложном напряженном состоянии* / Гулятьев В.И., Гараников В.В., Ведерников В.Н.; Заявл. 30.05.2000. Оpubл. 10.10.2000, Бюл. № 28.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

САВРАСОВ Иван Александрович – генеральный директор ООО СК «ИнжГидро-ПроектСтрой», 191028, Россия, г. Санкт-Петербург, Литейный проспект, д. 22, литера А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Саврасов И.А. Образцы для испытаний на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ: химический анализ, средства измерения и материалы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (9). С. 86–90.

**TEST SAMPLES FOR COMPUTER-AIDED TEST SYSTEM:
CHEMICAL ANALYSIS, MEASUREMENT TOOLS AND MATERIALS***I.A. Savrasov**ООО СК «InzhGidroProektStroj» (St. Petersburg)*

Abstract. The issue of determining the chemical composition of samples used to study the processes of complex deformation of materials at the automated test complex of the MV-computer of the Tver State Technical University is being considered. For this purpose, gas-volume, titrimetric, gravimetric methods were used, which made it possible to evaluate the chemical composition of samples and conclude the compliance of the steel 45 brand according to GOST 1050-88.

Keywords: complex deformation of materials, titrimetric method, chemical composition, dynamometer.

REFERENCES

1. Gulyaev V.I. Laws of Plastic Deformation of Structural Materials at Complex Loading: Dokt. Diss (Engineering). Tver. 2012. 43 p. (In Russian).
2. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gultiaev V.I. Modeling of Deformation Processes of Structural Steels Along Circular Paths. *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis*. 2019, pp. 012186.
3. Patent RF 15396. *Tenzometr dlya ismereniya deformatsiy obraztsa pri slozhnom napryazhenom sostoyanii* [Strain Gauge for Measuring Sample Deformations under Complex Stress]. Gulyaev V.I., Garanikov V.V., Vedernikov V.N. Declared 30.05.2000. Published 10.10.2000, Bulletin No. 28. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

SAVRASOV Ivan Alexandrovich – Chief Executive Officer, ООО СК «InzhGidroProektStroj», 22, Liteyny Avenue, St. Petersburg, 191028, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Savrasov I.A. Test Samples for Computer-aided Test System: Chemical Analysis, Measurement Tools and Materials // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology». 2021. No. 1 (9), pp. 86–90.

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 1 (9), 2021

Редактор С.В. Борисов
Корректор М.Б. Юдина