

НАУКА и ТЕХНИКА

**Международный
научно-технический журнал**



**Science
and Technique** V. 17, No 2
(2018)

**International
Scientific and Technical Journal**

**Серия 2. Строительство
Серия 5. Естественные науки**

**Series 2. Civil and Industrial Engineering
Series 5. Natural Sciences**

Издается с января 2002 года
Периодичность издания – один раз в два месяца

Published from January 2002
Publication frequency – bimonthly

Учредитель
Белорусский национальный
технический университет

Founder
Belarusian National
Technical University

Журнал включен в базы данных:

Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat,
OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:

Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat,
OpenAIRE, Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Строительство

Босаков С. В., Зиневич С. И. Расчет прямоугольной плиты на двухслойном основании	91
Пшембаев М. К., Ковалев Я. Н. Оптимизация пропиточного состава для защиты бетонных покрытий автомобильных дорог	95
Михневич Э. И. Методика расчета устойчивости креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия	100
Шалый Е. Е., Ким Л. В., Леонович С. Н., Степанова А. В. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений	106
Осипов С. Н., Захаренко А. В., Поздняков Д. А. Некоторые особенности ресурсосбережения в строительстве	114
Smilka V. A. Detection of Reflexive Signs in Town Planning Systems of Ukraine and Republic of Belarus (Смилка В. А. Выявление рефлексивных признаков градостроительных систем Украины и Республики Беларусь)	123

CONTENTS

Civil and Industrial Engineering

Bosakov S. V., Zinevich S. I. Calculation of Rectangular Plate on Two-Layer Basis	91
Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N. Optimization of Impregnating Composition for Protection of Concrete Pavement of Highways	95
Mikhnevich E. I. Methodology for Calculation of Rigidity in Earth Dam Slope Protection under Conditions of Wave Impact	100
Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N., Stepanova A. V. Probabilistic Analysis of Depth and Carbonation Front Development in Concrete of Marine Structures	106
Osipov S. N., Zakharenko A. V., Pozdnyakov D. A. Some Specific Features of Resource Saving in Construction	114
Smilka V. A. Detection of Reflexive Signs in Town Planning Systems of Ukraine and Republic of Belarus	123

Мамонов К. А., Нестеренко С. Г., Штерндок Э. С., Грек М. А., Рудомаха А. В.	
Стейкхолдерно-интегрированный подход к оценке уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов	130
Юхневский П. И.	
Термохимия реакций взаимодействия сульфатов натрия и алюминия с компонентами гидратирующегося портландцемента	142
Довженко О. А., Погребной В. В., Карабаш Л. В.	
Эффективные шпоночные соединения многопустотных плит перекрытий со стенами в современном крупнопанельном домостроении . . .	146
Шибeko А. С.	
Некоторые способы экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов . . .	157

Естественные науки

Zubrzycki Ja., Karpinski R., Jaworski L., Ausiyevich A. M., Smidova N.	
Structural Analysis of the Pelvic Girdle before and after Hip Replacement Procedure (Зубжицки Я., Карпиньски Р., Яворски Л., Авсиевич А. М., Смидова Н. Структурный анализ таза до и после процедуры замены тазобедренного сустава)	165

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

В. В. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
С. В. БОСАКОВ (Республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», Минск, Республика Беларусь),
Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
О. Г. ДЕВОЙНО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

Mamonov K. A., Nesterenko S. G., Shterndok E. S., Grek M. A., Rudomakha A. V.	
Stakeholder-Integrated Approach to Assessment of Level in Urban Engineering and Infrastructure Provision	130
Yukhnevskiy P. I.	
Thermochemistry of Interaction Reactions for Sodium and Aluminum Sulphates with Components of Hydrating Portland Cement . . .	142
Dovzhenko O. A., Pohribnyi V. V., Karabash L. V.	
Effective Keyed Connections of Hollow-Core Floor Slabs with Walls in Modern Large-Panel House Building	146
Shybeka A. S.	
Some Methods for Saving Heat Energy while Manufacturing Vertical Insulating Glass Units	157

Natural Sciences

Zubrzycki Ja., Karpinski R., Jaworski L., Ausiyevich A. M., Smidova N.	
Structural Analysis of the Pelvic Girdle before and after Hip Replacement Procedure	165

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. G. BASHTOVOI (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. V. BYELI (Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
V. P. BOYKOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. V. BOSAKOV (Republican Unitary Scientific-Research Enterprise for Construction "Institute BelNIIS", Minsk, Republic of Belarus),
Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

- К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- М. З. ЗГУРОВСКИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
- Р. Б. ИВУТЬ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
- М. Г. КИСЕЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Я. Н. КОВАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- В. В. КОЗЛОВСКИЙ (Минский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь),
- В. М. КОНСТАНТИНОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Н. В. КУЛЕШОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. Н. ЛЕОНОВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. А. МАСКЕВИЧ (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
- Э. И. МИХНЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- НГУЕН ТХУ НГА (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- М. ОПЕЛЯК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
- О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
- Г. А. ПОТАЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- P. I. DYACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- M. Z. ZGUROVSKY (National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine),
- R. B. IVUT (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
- M. G. KISELEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Ya. N. KOVALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- V. V. KOZLOVSKIY (Minsk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Minsk, Republic of Belarus),
- V. M. KONSTANTINOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- N. V. KULESHOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. N. LEONOVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. A. MASKEVICH (International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus),
- E. I. MIHNEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- NGUYEN THU NGA (Institute of Energy Science of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Republic of Vietnam),
- M. OPELYAK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
- O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
- G. A. POTAEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

О. П. РЕУТ (Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики», Минск, Республика Беларусь),
Ф. А. РОМАНИУК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Л. СОЛОМАХО (Республиканский институт инновационных технологий Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь),
С. А. ЧИЖИК (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
А. Н. ЧИЧКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. К. ШЕЛЕГ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Й. ЭБЕРХАРДШТАЙНЕР (Венский технический университет, Вена, Австрия),
Б. А. ЯКИМОВИЧ (Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация)

O. P. REUT (Branch of the BNTU "Institute of Advanced Training and Retraining for New Areas of Engineering, Technology and Economy", Minsk, Republic of Belarus),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. L. SOLOMAKHO (Republic Institute of Innovative Technologies of the Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. A. CHIZHIK (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
A. N. CHICHKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. K. SHELEG (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
J. EBERHARDSTEINER (Vienna University of Technology, Vienna, Austria),
B. A. YAKIMOVICH (M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation)

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
http://sat.bntu.by

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanchyk

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 30.03.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2018

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-91-94

УДК 624.21.012

Расчет прямоугольной плиты на двухслойном основании

Докт. техн. наук, проф. С. В. Босаков¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. И. Зиневич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Опыт эксплуатации бетонных покрытий при интенсивном движении тяжелых автомобилей показал, что, несмотря на высокую прочность самих бетонных плит, под ними должны быть прочные основания. В процессе укладки бетона на грунт в нем в результате нажимов упруго прогибающихся при проезде автомобилей плит накапливаются остаточные деформации. Вначале под плитами образуются полости, плиты теряют контакт с грунтом, а затем в них появляются трещины. Увеличение прочности основания повышает стоимость дорожной одежды. В настоящей работе выполнен статический расчет прямоугольной плиты на двухслойном упругом основании в традиционной постановке. В качестве основания принимались однородные грунты с верхним и нижним слоями в виде полупространства. Рассмотрен вариант нагружения плиты симметричной относительно двух осей внешней нагрузкой от колеса расчетного автомобиля. Вычисления выполнены методом Б. Н. Жемочкина с использованием пакета символьной математики. При этом плита разбивалась на 72 прямоугольных участка, в центре каждого участка устанавливалась вертикальная связь, через которую осуществлялся контакт плиты с упругим основанием. Полученная статически неопределимая система рассчитывалась смешанным методом строительной механики, где за неизвестные принимались усилия в вертикальных связях, а также линейное и два угловых перемещения введенного защемления по оси симметрии плиты. В результате расчета получены поверхности вертикальных перемещений плиты, реактивные напряжения на контакте плиты с упругим основанием. Предлагаемый подход может быть использован для поиска решений по оптимальной (достаточной) прочности основания для расчетного автомобиля, а также для расчетов шарнирно соединенных сборных железобетонных дорожных плит.

Ключевые слова: плита, двухслойное основание, упругий слой, полупространство, способ Б. Н. Жемочкина

Для цитирования: Босаков, С. В. Расчет прямоугольной плиты на двухслойном основании / С. В. Босаков, С. И. Зиневич // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 91–94. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-91-94

Calculation of Rectangular Plate on Two-Layer Basis

S. V. Bosakov¹⁾, S. I. Zinevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Operating experience of concrete surfacing with vigorous motion of heavy vehicles has shown that despite high strength of concrete slabs they need a strong base. When concrete is placed on the ground residual deformations are accumulated in it due to presses of elastically bent plates in case of vehicle passage. Initially, cavities are formed under the plates and the plates are losing their contact with the ground, and then cracks appear in them. An increase in base strength makes the cost of road pavement higher. A static analysis of rectangular plate on two-layer elastic foundation has been made in a traditional setting. Homogeneous ground with upper and lower layers in the form of half-space has been taken as a basis. The paper considers a loading variant for a plate which is symmetrical with regard to two axes and loading has been carried out by an external load from the wheels of the calculated vehicle. The calculation has been performed while using the Zhemochkin method with a symbolic mathematics package. In this case the plate has been divided into 72 rectangular sections and a vertical bracing has been set in the center of every section and a contact of the plate with elastic basis has been arranged with the help of the bracing. The obtained statically indeterminate system has been calculated by a mixed method of structural mechanics where efforts in vertical bracings and linear and two angular displacements of input fixing along the

Адрес для переписки

Босаков Сергей Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Bosakov Siarhei V.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

axis of plate symmetry have been taken for unknowns. The calculation has made it possible to obtain surfaces of vertical plate displacements, reactive stresses in the contact of the plate with the elastic basis. The proposed approach can be used to search for solutions according to optimal (adequate) basis strength for the calculated vehicle and also for calculations of hingedly joined precast reinforced concrete road plates.

Keywords: plate, two-layer basis, elastic layer, half-space, B. N. Zhemochkin method

For citation: Bosakov S. V., Zinevich S. I. (2018) Calculation of Rectangular Plate on Two-Layer Basis. *Science and Technique*. 17 (2), 91–94. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-91-94 (in Russian)

Введение

В последнее время в Республике Беларусь строится много дорог с цементобетонным покрытием. Наряду со многими положительными характеристиками (с высокой прочностью, не зависящей от времени года, со значительно большей по сравнению с асфальтобетонными покрытиями долговечностью, с хорошими фрикционными и светотехническими характеристиками), цементобетонные покрытия имеют ряд недостатков, к которым можно отнести возможность проникновения в дорожную одежду воды через деформационные швы, ощущение толчков при проезде поперечных швов, несколько большую стоимость устройства по сравнению с асфальтобетонными покрытиями. Одним из наиболее существенных недостатков цементобетонных покрытий является то, что от укладки смеси до ввода покрытия в эксплуатацию требуется длительный и тщательный уход за бетоном, пока он не приобретет необходимую прочность. Это ограничивает возможности использования цементобетона при перестройке и капитальном ремонте дорог, когда невозможно надолго закрыть движение на дороге [1, 2].

Интерес в этом случае представляют сборные бетонные покрытия, которые имеют ряд несомненных преимуществ. Бетонные плиты готовятся на заводах заблаговременно со строгим соблюдением технологических правил и режимов ухода за бетоном. Монтировать покрытия на подготовленное основание можно в течение всего года, используя и неблагоприятные для бетонных работ периоды. Движение по сборным бетонным покрытиям открывается сразу после их устройства. Ремонт таких покрытий осуществляется по типу ремонта тротуаров из бетонной плитки, т. е. путем замены плиты с появившимися дефектами на новые [3, 4].

Вместе с тем устройство сборных покрытий сегодня не нашло широкого применения. Одна из причин – трудность обеспечения ровности покрытия, требуемой для движения с высокими скоростями. В процессе эксплуатации часто возникают просадки отдельных плит, что еще больше ухудшает ровность покрытия.

Опыт эксплуатации бетонных покрытий при интенсивном движении тяжелых автомобилей

показал, что, несмотря на высокую прочность самих бетонных плит, под ними должны быть прочные основания. В процессе укладки бетона на грунт в нем в результате нажимов упруго прогибающихся при проезде автомобилей плит накапливаются остаточные деформации. Вначале под плитами образуются полости, плиты теряют контакт с грунтом, а затем в них появляются трещины. Увеличение прочности основания повышает стоимость дорожной одежды. С целью поиска решений по оптимальной прочности основания выполнены расчеты прямоугольной плиты на двухслойном основании.

Расчет бетонной плиты

Методом Б. Н. Жемочкина [5] произведен расчет прямоугольной изолированной дорожной плиты на двухслойном основании под действием статической вертикальной нагрузки (рис. 1) в традиционной постановке [6]. С этой целью контактная поверхность плиты разбивалась на прямоугольные участки и в центре каждого участка ставилась вертикальная связь, через которую осуществлялся контакт плиты с упругим основанием (рис. 2). Считали, что усилие в связи вызывает равномерное распределение контактных напряжений в пределах каждого участка. Полученная статически неопределимая система рассчитывалась смешанным методом строительной механики [7], где за неизвестные принимались усилия в вертикальных связях, а также линейное и два угловых перемещения введенного защемления по оси симметрии плиты. Основная система смешанного метода представлена на рис. 3.

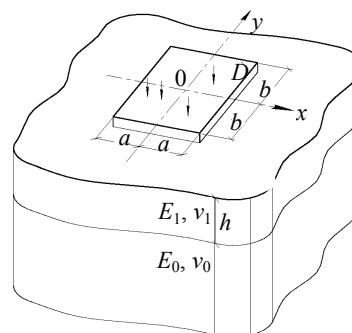


Рис. 1. Прямоугольная плита на упругом двухслойном основании
Fig. 1. Rectangular plate on elastic two-layer basis

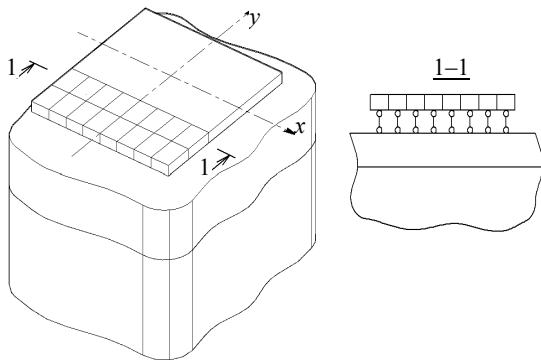


Рис. 2. Деление плиты на участки Б. Н. Жемочкина
Fig. 2. Division of plate into B. N. Zhemochkin's sections

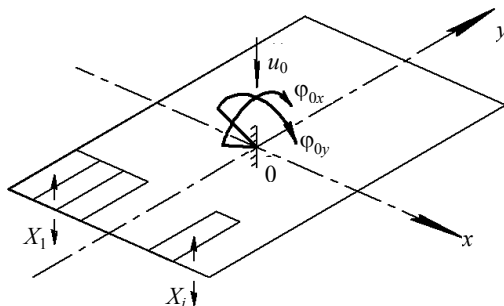


Рис. 3. Основная система смешанного метода
Fig. 3. Main system of mixed method

Система канонических уравнений способа Б. Н. Жемочкина для определения неизвестных усилий в лишних связях и перемещений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \delta_{1,1}X_1 + \dots + \delta_{1,n}X_n + u_0 + \varphi_{0x}y_1 + \varphi_{0y}x_1 + \Delta_{1p} = 0; \\ \dots \\ \delta_{n,1}X_1 + \dots + \delta_{n,n}X_n + u_0 + \varphi_{0x}y_n + \varphi_{0y}x_n + \Delta_{np} = 0; \\ \sum_{k=1}^n X_k - R = 0; \\ \sum_{k=1}^n X_k y_k - M_x = 0; \\ \sum_{k=1}^n X_k x_k - M_y = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где n – число прямоугольных участков Б. Н. Жемочкина на плите; X_k – усилие в связи с номером k ; R , M_x , M_y – величина равнодействующей внешней силы и моменты равнодействующей относительно координатных осей; u_0 , φ_{0x} , φ_{0y} – линейное и угловые перемещения введенного на плите защемления (рис. 3).

Коэффициенты при неизвестных усилиях δ_{ik} в (1) зависят от перемещений упругого основания V_{ik} и прогибов плиты с защемленной нормалью W_{ik} и определяются по формулам [8]:

$$\delta_{ik} = \frac{1}{\pi E_1 a} \left(F_{ik} + \frac{\beta}{16} W_{ik} \right);$$

$$\beta = \frac{\pi E_1 a^3}{(1 - \nu_1^2) D},$$

где F_{ik} – безразмерная функция для определения перемещений точки i на поверхности двухслойного упругого основания от действия единичной силы, равномерно распределенной по прямоугольному участку k поверхности основания (определяется интегрированием выражения из [9], которое методом специальной аппроксимации [10] приведено к виду, удобному для интегрирования [8]); W_{ik} – прогиб точки i пластинки с защемленной нормалью от действия единичной силы, приложенной в точке k той же пластинки (принимался в виде суммы решений для бесконечной пластинки с защемленной нормалью и первых четырех частных решений Клебша [8]); D – цилиндрическая жесткость плиты; E_1 , ν_1 – модуль упругости и коэффициент Пуассона верхнего слоя упругого основания (рис. 1).

Безразмерный параметр β в работе М. И. Горбунова-Посадова получил название показателя гибкости [5]. Он обобщенно характеризует физико-механические свойства основания и плиты.

Свободные члены в системе (1) определяются через прогибы плиты с защемленной нормалью W_{ik} .

Рассчитывалась железобетонная плита прямоугольной формы с размерами в плане 3000×6000 мм, изготовленная из бетона класса С20/25. Толщины плиты и защитного слоя арматуры приняты равными соответственно 180 и 30 мм. Плита опирается на двухслойное упругое основание с упругими постоянными: $E_1 = 50$ МПа; $\nu_1 = 0,25$; $h_1 = 0,5$ м; $E_2 = 50$ МПа; $\nu_2 = 0,25$.

Прямоугольная плита нагружена в центре колесом расчетного автомобиля в виде круга диаметром 0,41 м, передающего равномерно распределенную нагрузку величины 0,6 МПа (65 кН) (рис. 4).

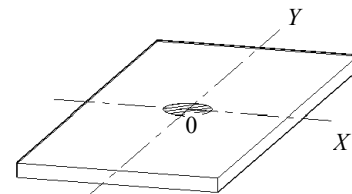


Рис. 4. Схема загрузки плиты колесом расчетного автомобиля

Fig. 4. Chart of plate loading by standard vehicle wheel

Полученные результаты расчетов приведены на рис. 5–7.

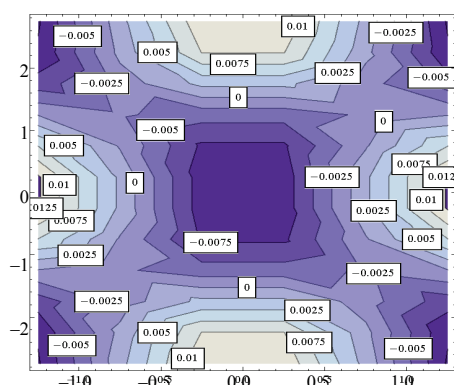


Рис. 5. Изолинии равных вертикальных перемещений, м
Fig. 5. Isolines of equal vertical movements, m

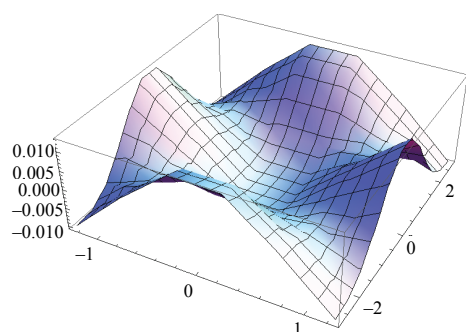


Рис. 6. Поверхность вертикальных перемещений, м
Fig. 6. Surface of vertical movements, m

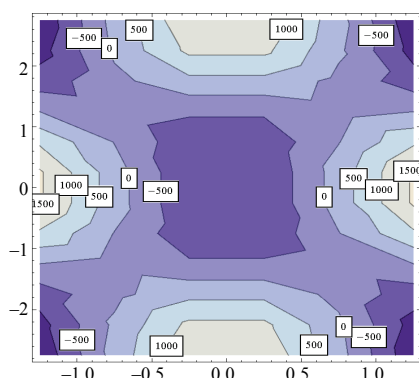


Рис. 7. Изолинии равных контактных напряжений, кПа
Fig. 7. Isolines of equal contact stresses, kPa

ВЫВОД

Приведен статический расчет прямоугольной плиты на упругом двухслойном основании под действием внешней нагрузки от колеса расчетного автомобиля. В результате вычислений получены поверхности вертикальных перемещений плиты, а также реактивные напряжения на контакте плиты с упругим основанием. Предлагаемый подход может быть использован для поиска решений по оптимальной (достаточной) прочности основания для стандартной плиты, а также для расчетов шарнирно соединенных железобетонных плит сборных дорожных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов, В. П. Состояние, проблемы, перспективы применения цементобетона при строительстве автомобильных дорог / В. П. Носов // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. Ч. 3. С. 1711–1715.
2. Левицкий, Е. Ф. Бетонные покрытия автомобильных дорог / Е. Ф. Левицкий, В. А. Чернигов. М.: Транспорт, 1980. Ч. 1. 288 с.
3. Бабков, В. Ф. Проектирование автомобильных дорог. Ч. 1 / В. Ф. Бабков, О. В. Андреев. М.: Транспорт, 1979. 367 с.
4. Орловский, В. С. Проектирование и строительство сборных дорожных покрытий / В. С. Орловский. М.: Транспорт, 1978. 149 с.
5. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Ситницын. М.: Стройиздат, 1962. 239 с.
6. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. М.: Стройиздат, 1984. 639 с.
7. Ржаницын, А. Р. Строительная механика / А. Р. Ржаницын. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.
8. Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. Минск: БНТУ, 2002. 128 с.
9. Коган, Б. И. Напряжения и деформации многослойных покрытий / Б. И. Коган // Труды ХАДИ. 1953. Вып. 14. С. 33–46.
10. Развитие теории контактных задач в СССР / Б. Л. Абрамян [и др.]; под. ред. Л. А. Галина. М.: Наука, 1976. 493 с.

Поступила 20.10.2017

Подписана в печать 28.12.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Nosov V. P. (2001) Status, Problems and Prospects for Application of Cement Concrete in Construction of Auto-Roads. *Concrete at the Turn of the third Millennium: Proceedings of the 1st All-Russian Conference on the Problems of Concrete and Ferroconcrete*. Moscow, "Ferroconcrete" Association, 1711–1715 (in Russian).
2. Levitsky E. F., Chernigov V. A. (1980) *Concrete Pavement of Auto-Roads*. Moscow, Transport Publ. 288 (in Russian).
3. Babkov V. F., Andreev O. V. (1979) *Highway Designing. Part 1*. Moscow, Transport Publ. 367 (in Russian).
4. Orlovsky V. S. (1978) *Designing and Construction of Prefabricated Auto-Road Pavements*. Moscow, Transport Publ. 149 (in Russian).
5. Zhemochkin B. N., Sinityn A. P. (1962) *Practical Calculation Methods of Foundation Beams and Plates on Elastic Foundation*. Moscow, Stroyizdat Publ. 239 (in Russian).
6. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on Elastic Foundation*. Moscow, Stroyizdat Publ. 639 (in Russian).
7. Rzhantsyn A. R. (1991) *Structural Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 439 (in Russian).
8. Bosakov S. V. (2002) *Static Calculations of Slabs on Elastic Foundation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 128 (in Russian).
9. Kogan B. I. (1953) Stresses and Deformations of Multi-Layer Coatings. *Trudy Khar'kovskogo Avtomobil'no-Dorozhnogo Instituta [Proceedings of Kharkov Automobile and Highway Institute]*, 14, 33–46 (in Russian).
10. Abramyan B. L., Aleksandrov V. M., Amenzade Yu. A., Aramanovich I. G., Babeshko V. A., Belokon' A. V., Bondareva V. F., Borodachev N. M., Vorovich I. I., Druyanov B. A., Galin L. A. (ed.) (1976) *Development of Theory for Contact Problems in the USSR*. Moscow, Nauka Publ. 493 (in Russian).

Received: 20.10.2017

Accepted: 28.12.2017

Published online: 30.03.2018

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-95-99

УДК 625.768.6

Оптимизация пропиточного состава для защиты бетонных покрытий автомобильных дорог

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев¹⁾, докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Недостатки дорожных асфальтобетонных покрытий хорошо известны специалистам-дорожникам. Они главным образом обусловлены низким модулем упругости асфальтобетона, а также быстрым старением основного компонента асфальтобетона – битума. Как следствие этого явления – сравнительно низкая долговечность покрытия, необходимость его частого ремонта. В известной степени цементобетонные покрытия существенно превосходят по данному показателю асфальтобетонные, в чем убеждает опыт эксплуатации дорог Германии, США и других стран. Правильно подобранный состав бетона, общее соблюдение технологии укладки бетонной смеси, всеобъемлющий контроль качества производства работ, достаточная квалификация инженерно-технического персонала обеспечивают длительную бездефектную работу дорожного цементобетонного покрытия. Однако нарушения при производстве работ или в процессе эксплуатации, особенно в жестких условиях замораживания–оттаивания, насыщения–высушивания, при воздействии солей-антиобледенителей приводят к появлению дефектов покрытия, снижению его долговечности. Есть два направления расчетной долговечности покрытия. Во-первых, это первичная защита – создание бетона с минимально возможным на данных компонентах смеси водоцементным отношением, что обеспечивает получение бетона с минимальной пористостью и соответственно с максимальной долговечностью. Во-вторых, вторичная защита, обеспечивающая повышение сопротивляемости уже готового бетона покрытия внешним агрессивным воздействиям. В этом случае на фоне иных способов достаточно перспективной выглядит пропитка поверхности бетонного покрытия гидрофобизирующим и структуроукрепляющим веществом. Состав такого пропитывающего вещества должен содержать несколько компонентов, в первую очередь гидрофобизатор, препятствующий проникновению жидкости в тело бетона, и тонкодисперсный кремнезем (в частности, золь кремнезема), обеспечивающий снижение пористости поверхностных слоев бетона за счет взаимодействия со свободным гидроксидом кальция. Проблема оптимизации пропиточного состава и посвящена данная работа.

Ключевые слова: долговечность, дорожный бетон, структура, пропиточный состав, гидрофобизатор, золь кремнезема

Для цитирования: Пшембаев, М. К. Оптимизация пропиточного состава для защиты бетонных покрытий автомобильных дорог / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 95–99. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-95-99

Optimization of Impregnating Composition for Protection of Concrete Pavement of Highways

М. К. Pshembaev¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Disadvantages of road asphaltic concrete pavements are well known for highway engineers. They mainly arise from low elasticity modulus of asphaltic concrete and rapid aging of the main asphaltic concrete component that is bitumen. As a consequence of this phenomenon there are a relatively low pavement durability and necessity of its frequent repair. It is fairly known that cement-concrete pavements significantly surpass asphaltic concrete pavements according to above mentioned index and this fact is proved by road operational experience in Germany, the United States and other countries. Work execution, sufficient qualification of engineers ensure long defect-free operation of road asphaltic concrete pavement.

Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

However any violations while executing works or during operational period, especially under harsh conditions of freezing and thawing, saturation–drying, exposure to deicer salt lead to occurrence of defects, reduction of its durability. There are two directions for calculation of the pavement durability. Firstly, it is a primary protection which makes it possible to create concrete with minimum possible water cement ratio for the mix components that permits to obtain concrete with minimum porosity and consequently with maximum durability. Secondly, there is a secondary protection that ensures better resistance of finished concrete pavement to external aggressive actions. In this case impregnation of concrete pavement surface with hydrophobic and structural strengthening substance looks rather prospective in contrast to other methods. Composition of such impregnating substance must contain some components: primarily that is water-repelling agent which prevents penetration of fluid into the concrete body, and then finely dispersed silica, in particular silica sol which ensures reduction in porosity of surface concrete layers due to interaction with free calcium hydroxide. The present paper is devoted to the problem pertaining to optimization of impregnating composition.

Keywords: durability, road concrete, structure, impregnating composition, water-repelling agent, silica sol

For citation: Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N. (2018) Optimization of Impregnating Composition for Protection of Concrete Pavement of Highways. *Science and Technique*. 17 (2), 95–99. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-95-99 (in Russian)

Введение

В связи с тем, что дорожный бетон представляет собой пористый композиционный материал, возникает необходимость уменьшения или кольматации в нем части пор, что определяет его коррозионную стойкость. С этой целью поверхностный слой дорожного бетонного покрытия подвергают пропитке различными органическими и неорганическими соединениями. В качестве органических соединений используют полимерные материалы на основе полиуретановых, эпоксидных и акриловых смол [1].

Пример использования неорганических композиций – применение в качестве пропитки водных растворов соединений, приводящих к образованию в порах бетона труднорастворимых фосфатов, фторидов, силикатов и других веществ [2].

Пропиточный состав

С целью снижения водопоглощения бетона следует считать целесообразным использование промышленных гидрофобизаторов на основе кремнийорганических соединений [3]. Представляют также интерес композиционные составы пропиток на основе гидрофобизатора и веществ, образующих в порах бетона труднорастворимые соединения, которые кольматируют эти поры.

Как известно, продуктами затвердевшего бетона являются гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроалюмоферриты кальция. Кроме того, в результате гидролиза клинкерных материалов цемента образуется гидроксид кальция, использование которого в композиции с пропиточным составом может привести к образованию дополнительного количества гидросиликатов кальция. В качестве такой добавки в пропиточный состав может быть введен золь

кремнезема, что вызывает дальнейшее увеличение прочности и долговечности бетона [4].

Вторичные гидросиликаты кальция, образующиеся в процессе взаимодействия золя кремнезема и гидроксида кальция, кольматируют поры бетона и упрочняют его поверхностный слой за счет образования дополнительной твердой фазы, родственной первичным гидросиликатам кальция, образующимся при твердении цемента.

В качестве исходных материалов для получения пропиточного состава использовали: ТЭОС – тетраэтоксисилан (ТУ 6-09-3687–79); Софлексил-60 (ТУ 2229-008-42942526–2001) – водный раствор гидратированного метилсиликоната калия с массовой долей основного вещества 58–63 %, pH = 14; Софлексил-защиту (ТУ 222-025-42942526–2001) – раствор олигометилгидросилоксана в органическом растворителе.

Кремнезоль получали двумя способами. Первый заключался в катионировании раствора натриевого жидкого стекла, а второй – в использовании метода титрования разбавленного жидкого стекла уксусной кислотой [5].

Планирование эксперимента

С целью изучения вышеупомянутых факторов и оптимизации пропиточного состава для дорожных покрытий был выполнен комплекс исследований с использованием математического планирования эксперимента [6]. В качестве критериев оценки долговечности цементобетонного покрытия выбраны такие физико-механические свойства бетона, как прочность на сжатие, водопоглощение и истираемость. Прочность бетона на сжатие интегрально характеризует способность бетона противостоять внешней агрессии. В технологии бетона именно

этот параметр связывают с деформативными свойствами бетона, его плотностью, проницаемостью для агрессивных флюидов. Водопоглощение бетона прямо связано с его капиллярной пористостью, а следовательно, с проницаемостью и глубиной пропитки материала уплотняющим раствором. А истираемость бетона определяет твердость образующейся на поверхности бетона уплотненной «корочки», увеличивающей долговечность покрытия.

На основании предварительных опытов были выбраны опорные исходные данные:

– оптимальное соотношение компонентов водного пропиточного раствора: гидрофобизатор : золя кремнезема : вода = 1:1:10;

– концентрация гидрофобизатора принята 60 %;

– концентрация золя кремнезема принята 20 %;

– оптимальное соотношение по сухому веществу: 0,6:0,2:10.

Исходный бетон, предназначенный для пропитки, имел следующие физико-механические параметры: прочность на сжатие 45,3 МПа, на изгиб 8,83 МПа, водопоглощение 1,5 %, истираемость 0,133 г/см². Пропиточный состав наносили распылением на поверхность образцов; расход состава – 0,2–0,3 л/м².

Для выявления оптимума пропиточного состава долю гидрофобизатора (влияющий фактор x_1) принимали в пределах от 0 до 1,2, а долю золя кремнезема (влияющий фактор x_2) – от 0 до 0,4. Условия опытов для оптимизации пропиточных составов приведены в табл. 1.

В процессе эксперимента исследовали не изменение абсолютных величин прочности бетона на сжатие, водопоглощения и истираемости, а относительные (в %), в которых для бетона без пропиточного состава они взяты за 100 %.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов
Spacings for variation of factors

Код	Значение кода	Значение фактора	
		x_1	x_2
Основной уровень	0	0,6	0,2
Интервал варьирования	x_i	0,6	0,2
Верхний уровень	+	1,2	0,4
Нижний уровень	–	0	0

Матрица планирования и полученные результаты представлены в табл. 2.

Получаемые уравнения регрессии в общем виде выглядели так:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2. \quad (1)$$

После обработки результатов экспериментов были получены адекватные полиномиальные математические модели второго порядка, описывающие изменение относительной прочности, водопоглощения и истираемости бетона в зависимости от принятых переменных факторов.

Полученные модели после исключения незначимых коэффициентов записываются в виде следующих уравнений регрессии:

– для относительной прочности бетона, %:

$$f_{\text{отн}} = 114,2 + 1,2x_1 + 3,9x_2 - 1,1x_1^2 - 8,4x_2^2 + 0,8x_1x_2; \quad (2)$$

Таблица 2

План эксперимента (двухфакторный второго порядка) и полученные результаты

Plan of experiment plan (two-factor, second order) and obtained results

№ п/п	План				Относительное свойство бетона (без пропитки 100 %)		
	в кодах		в значениях		Прочность	Водопоглощение	Истираемость
	x_1	x_2	x_1	x_2			
1	1	1	1,2	0,4	110,8	36,4	64,7
2	–1	1	0	0,4	106,8	90,6	62,1
3	1	–1	1,2	0	101,4	61,6	92,1
4	–1	–1	0	0	100,0	100,0	100,0
5	1	0	1,2	0,2	114,3	35,0	70,8
6	–1	0	0	0,2	111,9	81,2	73,6
7	0	1	0,6	0,4	109,7	46,2	61,5
8	0	–1	0,6	0	101,9	63,4	94,3
9	0	0	0,6	0,2	114,0	40,8	70,3
10	0	0	0,6	0,2	115,2	40,2	72,4
11	0	0	0,6	0,2	113,5	39,7	69,7

– для относительного водопоглощения бетона, %:

$$W_{\text{отн}} = 40,4 - 23,1x_1 - 8,6x_2 + 17,5x_1^2 + 14,2x_2^2 - 4,0x_1x_2; \quad (3)$$

– для относительной истираемости (относительной прочности) бетона, %:

$$I_{\text{отн}} = 70,7 - 1,4x_1 - 16,4x_2 + 7,3x_2^2 + 2,7x_1x_2. \quad (4)$$

Результаты выполненных расчетов и проверка статистической значимости по полученным математическим моделям подтвердили, что приведенные выше уравнения регрессии пригодны для описания этих моделей (табл. 3)

Таблица 3

Проверка пригодности уравнений
Check of equation applicability

Параметр	Уравнение		
	(2)	(3)	(4)
Число значимых коэффициентов	5	6	6
Число степеней свободы в нулевой точке	2	2	2
Число степеней свободы для уравнения	4	3	3
Дисперсия в нулевой точке	0,763	0,303	2,010
Дисперсия адекватности	1,035	0,273	1,396
Расчетное значение критерия Фишера	1,356	1,111	1,439
Табличное значение критерия Фишера	19,246	19,164	19,164

Анализ полученных результатов

Графическая интерпретация полученных результатов в виде объемных моделей представлена на рис. 1–3.

В соответствии с уравнением (2) и рис. 1 на увеличение прочности бетона наибольшее влияние оказывает содержание золя кремнезема (коэффициенты b_2 и b_{22} равны соответственно 3,9 и 8,4). Максимальный прирост прочности бетона достигнут при содержании золя 0,2. С увеличением содержания золя от 0 до 0,2 возрастает количество гидроксида кальция, вступившего в реакцию с высокодисперсным кремнеземом с образованием плотных водонерастворимых минералов, что приводит к росту прочности бетона [7]. При дальнейшем увеличении количества золя возрастает вязкость пропиточного состава, соответственно падает глубина пропитки покрытия, что обуславливает снижение прочности бетона на сжатие. В то же время влияние гидрофобизатора незначительное (коэффициенты b_1 и b_{11} рав-

ны соответственно 1,2 и 1,1), т. е. содержание гидрофобизатора на изменение прочности бетона практически не сказывается. В целом оптимальное содержание гидрофобизатора и золя кремнезема составляет соответственно около 0,6 и 0,2.

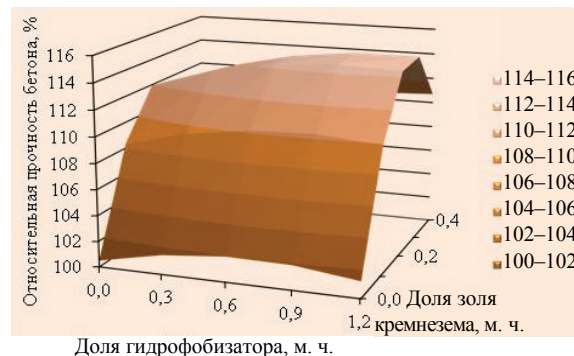


Рис. 1. Влияние содержания гидрофобизатора и золя кремнезема на относительную прочность бетона

Fig. 1. Influence of water-repellent agent and silica sol content on relative concrete strength

Обратная картина наблюдается при оценке влияния компонентов пропиточного состава на водопоглощение бетона (уравнение (3) и рис. 2). На величину водопоглощения содержание золя кремнезема практически не влияет, и это естественно, поскольку несколько уплотненная поверхностная «корочка» на кинетику проникновения воды не может влиять. Основное влияние на снижение водопоглощения оказывает содержание гидрофобизатора, причем его оптимальное количество – более 0,9.

Снижение истираемости бетона в основном определяется содержанием золя кремнезема, причем, чем больше количество микрокремнезема, тем эффект выше. Влияние гидрофобизатора сравнительно ничтожно [8–10].

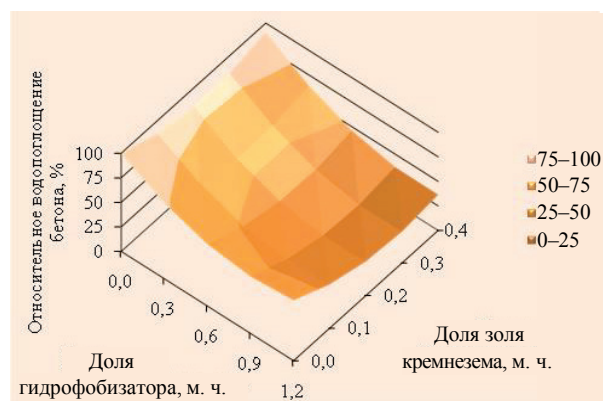


Рис. 2. Влияние содержания гидрофобизатора и золя кремнезема на относительное водопоглощение бетона

Fig. 2. Influence of water-repellent agent and silica sol content on relative concrete water absorption

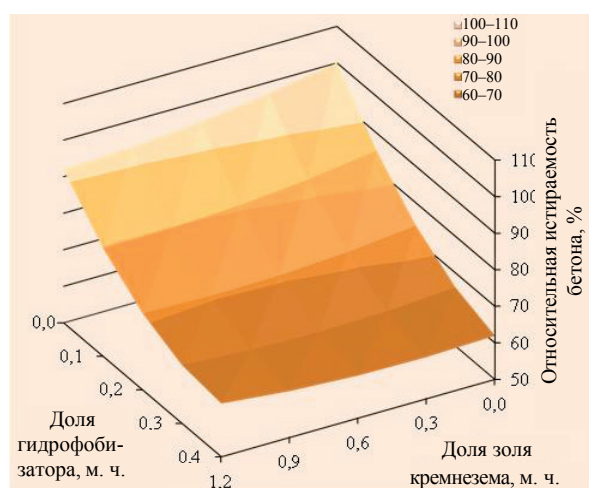


Рис. 3. Влияние содержания гидрофобизатора и золя кремнезема на относительную истираемость бетона

Fig. 3. Influence of water-repellent agent and silica sol content on relative concrete wearing properties

ВЫВОД

Анализ активного эксперимента, интерпретация полученных адекватных полиномиальных моделей позволили выявить оптимальное соотношение компонентов пропиточного состава для получения максимального эффекта по росту прочности бетона на сжатие и истираемости, а также снижению водопоглощения: содержание гидрофобизатора и золя кремнезема соответственно 0,6 и 0,2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лайдобон, Ч. С. Поверхностная модификация бетона высоковязкими составами / Ч. С. Лайдобон. Иркутск, 2005. 290 с.
2. Ершова, С. Г. Обеспечение эффективной гидрофобной защиты неорганических строительных материалов / С. Г. Ершова. Новосибирск, 2006. 174 с.
3. Пашченко, А. А. Кремнийорганические защитные покрытия / А. А. Пашченко, М. Г. Воронков. Киев: Техника, 1969. 251 с.
4. Баженов, Ю. М. Исследование наномодифицированного мелкозернистого бетона / Ю. М. Баженов, Н. П. Лукутцова, Е. Г. Матвеева // Вестник МГСУ. 2010. Т. 2, № 4. С. 415–418.
5. Соловьева, В. Я. Новые добавки полуфункционального действия, улучшающие деформативные характеристики бетона / В. Я. Соловьева, Т. В. Смирнова, И. В. Степанова // Бетон и железобетон: тез. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. Ростов на-Д., 2002. С. 312–322.
6. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В. А. Вознесенский [и др.]. Киев: Будивельник, 1989. 240 с.

7. Бунин, М. В. Структура и механические свойства дорожных цементных бетонов / М. В. Бунин, И. М. Грушко, А. Г. Ильин // Структура и механические свойства цементных бетонов. Харьков: Харьк. ун-т, 1968. 199 с.
8. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона транспортных сооружений / С. В. Шестоперов. М.: Транспорт, 1966. 500 с.
9. Дубинин, М. М. Пористая структура и свойства материалов / М. М. Дубинин // RILEM-JUPAC: междунар. симпозиум. Прага, 1973. С. 56–63.
10. Вершинина, О. С. Применение кремнийорганических соединений в строительстве / О. С. Вершинина. М., 1989. 62 с.

Поступила 28.11.2017

Подписана в печать 15.02.2018

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Laydobon Ch. S. (2005) *Surface Modification of Concrete while Using High-Viscosity Compositions*. Irkutsk. 290 (in Russian).
2. Ershova S. G. (2006) *Provision of Efficient Water-Repelling Protection for Non-Organic Construction Materials*. Novosibirsk. 174 (in Russian).
3. Pashchenko A. A., Voronkov M. G. (1969) *Organic-Silicon Protection Coatings*. Kiev, Tekhnika Publ. 251 (in Russian).
4. Bazhenov Yu. M., Lukutsova N. P., Matveeva E. G. (2010) Investigations on Nano-Modified Fine Grain Concrete. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering], 2 (4), 415–418 (in Russian).
5. Solovyova V. Ya., Smirnova T. V., Stepanova I. V. (2002) New Semi-Functional Additives Improving Stress-Related Concrete Characteristics. *Beton i Zhelezobeton v Tret'em Tysyacheletii: Materialy Vtoroi Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Concrete and Reinforced Concrete in the Third Millennium: Materials of the Second International Scientific-Practical Conf.]. Rostov-on-Don, Rostov State University of Civil Engineering, 312–322 (in Russian).
6. Voznesensky V. A., Lyashenko T. V., Ivanov Ya. P., Nikolov I. I. (1989) *Electronic Computers and Optimization of Composite Materials*. Kiev, Budivelnik Publ. 240 (in Russian).
7. Bunine M. V., Grushko I. M., Ilyin A. G. (1968) *Structure and Mechanical Properties of Road Cement Concrete*. Kharkov, Kharkov University 199 (in Russian).
8. Shestoperov S. V. (1966) *Concrete Longevity in Transport Works*. Moscow, Transport. 500 (in Russian).
9. Dubinine M. M. (1973) Porous Structure and Material Properties. *RILEM-JUPAC: International Symposium*. Prague, 56–63.
10. Vershinina O. S. (1989) *Application of Organic-Silicon Compounds in Construction*. Moscow. 62 (in Russian).

Received: 28.11.2017

Accepted: 15.02.2018

Published online: 30.03.2018

Методика расчета устойчивости креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Михневич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Для обеспечения устойчивости откосов земляных плотин при воздействии волн применяют различные типы креплений, среди которых чаще всего используют каменную наброску и сборные или монолитные железобетонные плиты. Долговечность и надежность креплений во многом зависят от того, насколько правильно рассчитаны и соответственно выполнены параметры креплений: диаметр материала каменной наброски и толщина железобетонных плит. Значения параметров креплений, рассчитанные по существующим формулам, значительно различаются. Некоторые из этих формул не пригодны для малых водохранилищ Беларуси и дают реальные результаты только для крупных водохранилищ, где высота волн достигает 2 м и более. С целью определения диаметра камня наброски и толщины плит для крепления откосов плотин в зоне активного волнового воздействия предложена новая методика расчета, пригодная для водохранилищ различных размеров, в том числе и малых водохранилищ Беларуси. Методика разработана на основе теории предельного равновесия сдвигающих и удерживающих сил на откосе. При расчете диаметра материала каменной наброски учтены сдвигающие силы: взвешивающее волновое давление, зависящее от высоты волны; влекущая сила потока, образующегося на откосе при откате волны; сдвигающий компонент силы тяжести материала крепления, зависящий от заданного коэффициента заложения откоса. Удерживающие силы определены с учетом основных физико-механических свойств материала наброски: плотности частиц во взвешенном водой состоянии, пористости, внутреннего трения и удерживающего компонента силы тяжести материала крепления. При разработке методики расчета толщины железобетонных плит влекущая сила потока не учитывалась, так как формируемый на поверхности плит поток практически не оказывает влияния на их устойчивость. В нижней зоне откоса, где гидродинамическое давление создается придонной скоростью, устраивают облегченное крепление, обычно в виде наброски из щебня, гравия или мелкого камня. В результате преобразования критерия устойчивости откоса в этой зоне получены зависимости для определения крупности материала наброски. Предложенные формулы для расчета параметров креплений откосов земляных плотин могут быть рекомендованы к применению в проектных организациях.

Ключевые слова: земляные плотины, крепления откосов, волновое воздействие, каменная наброска, железобетонные плиты, расчетные формулы

Для цитирования: Михневич, Э. И. Методика расчета устойчивости креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия / Э. И. Михневич // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 100–105. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-100-105

Methodology for Calculation of Rigidity in Earth Dam Slope Protection under Conditions of Wave Impact

E. I. Mikhnevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Various types of protection are used in order to ensure rigidity in earth dam slopes and dumped rip-rap and precast and cast-in-situ reinforced plates are the most commonly used for this purpose. Durability and reliability of the protections

Адрес для переписки

Михневич Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-71-74
fes@bntu.by

Address for correspondence

Mikhnevich Eduard I.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-71-74
fes@bntu.by

mainly depend on the fact whether protection parameters have been correctly calculated and correspondingly observed during the process of protection creation, the main protection parameters are material diameter of dumped rip-rap and thickness of reinforced plates. Values of protection parameters calculated in accordance to the existing formulae significantly differ among themselves. Some of these formulae are acceptable for small water reservoirs in Belarus and provide actual results only for large water reservoirs where a wave height reaches two metres and even more. A new calculation methodology which is suitable for Belarusian water reservoirs of various size is proposed with the purpose to determine diameter of dumped rip-rap material and thickness of plates for earth dam slope protection in the zone of active wave impact. The methodology has been developed on the basis of the theory pertaining to limit equilibrium of slope shearing and holding forces. While calculating diameter of dumped rip-rap material the following shearing forces have been taken into account: uplift wave pressure depending on wave height; drag force which is formed on the slope due to back sweep of wave; shearing component of protection material gravity force which is dependent on preselected slope ratio. Holding forces are determined with due account of main physical and mechanical properties of dumped rip-rap material: density of particles in water suspension, porosity, internal friction and holding component of protection material gravity force. While developing methodology for calculation of reinforced concrete plate thickness a drag force has not been taken into account because the flow which is formed on the plate surface does not exert an influence on their equilibrium. Bottom slope zone where hydrodynamic pressure is created by bottom velocity has usually a reduced-weight protection in the form of broken stone, gravel and finely broken stone rip-rap. Dependences for determination of dumped rip-rap fineness have been obtained as a result of slope rigidity criterion conversion. The proposed formulae for calculation of earth dam slope protection parameters can be recommended for application in design organizations.

Keywords: earth dam, slope protection, wave impact, dumped rip-rap, reinforced concrete plate, calculation formulae

For citation: Mikhnevich E. I. (2018) Methodology for Calculation of Rigidity in Earth Dams Slopes Protection under Conditions of Wave Impact. *Science and Technique*. 17 (2), 100–105. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-100-105 (in Russian)

Введение

Верховые откосы земляных плотин подвержены разрушающему воздействию ветровых волн, возникающих в акватории водохранилищ. Для предотвращения разрушения откосов применяют различные типы креплений, среди которых наибольшее распространение получили каменная наброска и сборные (реже – монолитные) железобетонные плиты [1–5].

В зоне интенсивного волнового воздействия располагают основное крепление, а ниже него – облегченное. Верхней границей основного крепления обычно является отметка гребня плотины, а при его значительном возвышении над уровнем воды в верхнем бьефе – величина наката волны на откос. Нижняя граница основного крепления назначается на отметке, заглубленной под минимальный уровень верхнего бьефа на величину $2h_b$ (h_b – высота расчетной волны) [4, 5]. Расчетные параметры волн определяют в зависимости от скорости ветра, длины разгона волны, глубины водохранилища в соответствии с ТКП 45-3.04-170–2009 [6].

Для определения диаметра камня наброски и толщины плит крепления откосов предложены различные экспериментальные зависимости [4–8]. Значения параметров креплений, определяемые по этим зависимостям, существенно различаются и не всегда пригодны для малых водохранилищ Беларуси. Поэтому представляется актуальной разработка новой, пригодной для водохранилищ различных размеров методики расчета параметров креплений откосов на основе теории предельного равновесия.

Существующие формулы для расчета устойчивости креплений откосов

Для определения диаметра камня, укладываемого на откосы в виде наброски или мощения, рекомендуются зависимости из [1, 2, 4, 7].

Необходимая масса камня M , кг, для крепления в виде наброски определяется по зависимости

$$M = \frac{0,025 \rho_k h_b^2 \lambda}{\left(\frac{\rho_k}{\rho_b} - 1 \right)^3 \sqrt{1 + m^3}}, \quad (1)$$

где ρ_k , ρ_b – плотность камня и воды, кг/м³; h_b , λ – высота и длина расчетной волны, м; m – коэффициент заложения откоса.

Расчетный диаметр камня D , м, вычисляется по формуле

$$D = 3 \sqrt[3]{\frac{M}{0,524 \rho_k}}. \quad (2)$$

В составе наброски из несортированного камня должно быть по массе не менее 50 % камней с расчетным диаметром D . Толщина крепления наброской из несортированного камня $\delta \geq 3D$, а из сортированного $\delta \geq 2,5D$.

Толщину каменного мощения по слою щебеночной или гравийной подготовки определяют по формуле П. А. Шанкина [1, 2, 4]

$$\delta_m = \frac{1,7h_b\rho_b\sqrt{1+m^2}}{(\rho_k - \rho_b)m(m+2)}. \quad (3)$$

При каменном мощении нужно меньше камня для крепления. Но применяется оно очень редко, так как требует больших затрат ручного труда для его устройства.

В справочнике [7] записана формула (4) для определения расчетного размера камня D , м, приведенного к шару, с целью обеспечения устойчивости наброски из несортированного камня в условиях волнового воздействия на откосы с коэффициентом заложения m в пределах 2–5:

$$D = 1,5ch_b \left(\frac{\sqrt[3]{m_{hb}}}{m} + 0,5 \right) \frac{m+1,8}{1,8m-1} \cdot \frac{\gamma_a}{\gamma_k - \gamma_a}, \quad (4)$$

где γ_a – удельный вес аэрированной воды, стекающей с наброски в конце отката волны, принимаемый 10 кН/м^3 ; γ_k – удельный вес камня, $\gamma_k = 26,5 \text{ кН/м}^3$; c – гидравлический коэффициент сопротивления, принимается равным 0,2 при диаметре камня более 0,15 м и высоте волны более 0,50 м; m_{hb} – пологость расчетной волны, для водохранилищ $m_{hb} = 7$.

Толщину монолитных железобетонных плит δ_{Π} рекомендуется определять из условия их устойчивости по формуле П. А. Шанкина [4]

$$\delta_{\Pi} = \kappa h_b \sqrt{\frac{\rho_b}{\rho_{\Pi} - \rho_b} \cdot \frac{\lambda}{Bm}}, \quad (5)$$

где κ – коэффициент, принимаемый 0,083 при открытых и 0,110 – при закрытых швах; ρ_{Π} – плотность материала плиты, кг/м^3 ; B – длина плиты по нормали к урезу воды, м; h_b , λ – высота и длина расчетной волны, м.

Следует отметить, что формула (5) для малых водохранилищ оказалась непригодной, по-

скольку дает реальные размеры плит только для крупных водохранилищ, где высота волны $h_b > 2$ м. Толщина монолитной плиты δ_{Π} , устойчивой к действию противодействия при откате волны, согласно [1, 9] определяется по формуле

$$\delta_{\Pi} = 0,07h_b \frac{\rho_b}{\rho_{\Pi} - \rho_b} \cdot \frac{\sqrt{m^2+1}}{m} \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda}{B}}. \quad (6)$$

Толщину сборных плит определяют по формуле В. С. Шайтана [4, 8, 9]

$$\delta_{\Pi} = 0,6h_{b,cr}^2 \frac{B_{от}^{0,75} \rho_b}{B \cos \alpha (\rho_{\Pi} - 0,3K_b \rho_b)}, \quad (7)$$

где $h_{b,cr}$ – средняя высота волны в расчетном шторме, м; $B_{от} = B/h_{b,cr}$ – относительная длина ребра плиты, м; B – длина ребра плиты, нормального уреза воды, м; α – угол наклона откоса к горизонту, при заданном коэффициенте

заложения откоса $m \cos \alpha = \frac{m}{\sqrt{1+m^2}}$; K_b – ко-

эффициент полноты погружения плиты в аэрированную водную среду, определяется в зависимости от отношения $B/h_{b,cr}$ по табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента полноты погружения плиты
Values for coefficient on completeness of plate dipping

$B/h_{b,cr}$	1,0	1,2–1,5	2,2–2,8	3,5–4,3	5,0–6,0
K_b	1,00	0,75	0,67	0,60	0,50

Новые формулы для расчета устойчивости креплений откосов

Исходя из теории предельного равновесия, автором [10] получен критерий устойчивости откоса Π_1 при воздействии волн

$$\Pi_1 = \frac{\rho'_1(mf-1)d}{h + ah_b f \sqrt{1+m^2}}, \quad (8)$$

где $\rho'_1 = \rho_1/\rho_b$ – относительная плотность; ρ_1 – плотность грунта во взвешенном водой состоянии, кг/м^3 ; ρ_b – плотность воды, кг/м^3 ; f – коэффициент внутреннего трения грунта; d – расчетный диаметр частиц грунта, м; h – глубина

потока на поверхности откоса при откате волны, м; a – коэффициент взвешивающего волнового давления, $a = 0,27$ для сплошного крепления [3] и $a = 0,27(1 - n_s)$ для зернистых материалов; n_s – пористость грунта или материала наброски; h_b – высота расчетной волны, м; m – коэффициент заложения откоса.

Критерий Π_1 может быть использован для получения формул для расчета устойчивости креплений откосов в виде каменной наброски и сборных железобетонных плит.

Принимая в критерии (8) для каменной наброски $\rho'_k = \rho_k / \rho_b$ (ρ_k – плотность камня, кг/м³) и решая этот критерий относительно диаметра камня D , м, в условиях предельного равновесия ($\Pi_1 = 1$), получим (с учетом коэффициента запаса K_3)

$$D = K_3 \frac{h + 0,27(1 - n_s)h_b f \sqrt{1 + m^2}}{(\rho_k / \rho_b)(mf - 1)}, \quad (9)$$

где K_3 – коэффициент запаса, учитывающий неравномерность распределения каменной наброски по откосу, $K_3 = 1,20$ для каменной наброски из несортированного материала, $K_3 = 1,00$ – для каменного мощения; h – средняя глубина воды на поверхности откоса при откате волны, может быть принята $h = 0,5h_b$; n_s – пористость материала наброски; f – коэффициент трения каменной наброски по слою обратного фильтра из щебня ($f = 0,9-1,0$) или из гравия ($f = 0,8-0,9$).

При использовании в качестве крепления железобетонных плит влиянием влекущей силы потока на поверхности плит можно пренебречь, т. е. принять $h = 0$. Учитывая, что для сплошного крепления $a = 0,27$ (формула (8)), выражение для определения толщины плит δ_n будет иметь вид

$$\delta_n = K_3 \frac{0,27h_b f \sqrt{1 + m^2}}{(\rho_n / \rho_b)(mf - 1)}, \quad (10)$$

где K_3 – коэффициент запаса, для сборных плит $K_3 = 1,10$, для монолитных $K_3 = 1,00$.

В табл. 2 приведены результаты сравнения расчетов по существующим (2)–(7) и предлагаемым (9), (10) формулам при следующих

данных: $h_b = 1$ м; $\lambda = 10$ м; $m = 3$; $B = 2$ м; $\rho_k = \rho_n = 2650$ кг/м³; $n_s = 0,38$; $f = 0,9$.

Из табл. 2 видно, что значения диаметра камня наброски, полученные по предлагаемой формуле (9), на 11,5 % больше значений расчета по (4), приведенной в [7], и на 23 % меньше значений, получаемых по (2). Толщина каменного мощения по (9) совпадает со значением по зависимости (3) П. А. Шанкина. Предлагаемая формула (10) для определения толщины сборных железобетонных плит показала удовлетворительное совпадение с (7) В. С. Шайтана. Уравнение (5) П. А. Шанкина и зависимость (6) для определения толщины монолитных плит для крепления откосов плотин малых водохранилищ показали результаты, заниженные примерно в три раза.

Таблица 2

Расчетные параметры креплений
Calculated parameters for bracings

Тип крепления, расчетный параметр, м	Значение параметра по формуле							
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(9)	(10)
Каменная наброска, диаметр камня D	0,32		0,23				0,26	
Каменное мощение, толщина δ_m		0,22					0,22	
Сборные железобетонные плиты, толщина δ_n						0,16		0,17
Монолитные железобетонные плиты, толщина δ_n				0,055	0,048			0,16

Облегченное крепление, располагаемое ниже основного на глубине $H > 2h_b$, обычно выполняют в виде наброски из щебня, гравия или мелкого камня. Крупность материала облегченного крепления определяют из условия его устойчивости под воздействием придонных скоростей v_d , возникающих при волнении [9]. Гидравлическое давление P_b , создаваемое на элемент наброски придонной скоростью при волнении, получено в следующем виде [10]:

$$P_b = \frac{a_0 F \gamma_b v_d^2}{2g}, \quad (11)$$

где v_d – придонная скорость, может быть найдена по формуле [9, 11]

$$v_d = \frac{\pi \bar{h}_b n}{\sqrt{\frac{\pi \bar{\lambda}}{g} \operatorname{sh} \frac{4\pi H}{\bar{\lambda}}}}. \quad (12)$$

С учетом сил взвешивания частиц водой и внутреннего трения материала наброски, а также косопоходящего ветрового волнения под углом θ к урезу воды суммарная сдвигающая сила $N_{сд}$ получена в виде

$$N_{сд} = \sqrt{\gamma_1^2 W^2 \sin^2 \alpha + \frac{0,25(a_0 F \gamma_b \pi)^2 (h_b n)^4 \cos^2 \theta}{\bar{\lambda}^2 \operatorname{sh}^2 \frac{4\pi H}{\bar{\lambda}}}}. \quad (13)$$

Удерживающая сила $N_{уд}$ определяется формулой

$$N_{уд} = \gamma_1 W f \cos \alpha \cos \theta. \quad (14)$$

Приравняв удерживающую и сдвигающую силы и поделив их значения на произведение $F \sin \alpha \cos \theta$, получим уравнение предельного равновесия

$$\gamma_1 d f m = \sqrt{\frac{\gamma_1^2 d^2}{\cos^2 \theta} + \frac{0,25(a_0 \gamma_b \pi)^2 (h_b n)^4 (1+m^2)}{\bar{\lambda}^2 \operatorname{sh}^2 \frac{4\pi H}{\bar{\lambda}}}}. \quad (15)$$

Обозначим:

$$\frac{\gamma_1 d}{\cos \theta} = \xi_1;$$

$$\frac{0,5 a_0 \gamma_b \pi (h_b n)^2 \sqrt{1+m^2}}{\bar{\lambda} \operatorname{sh} \frac{4\pi H}{\bar{\lambda}}} = \xi_2. \quad (16)$$

Тогда критерий устойчивости откоса Π_2 в зоне устройства облегченного крепления (от $H = 2h_b$ до подошвы откоса) получим в следующем виде:

$$\Pi_2 = \frac{\gamma_1 d f m}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}}. \quad (17)$$

Принимая в условиях предельного равновесия $\Pi_2 = 1$, находим диаметр D материала наброски в зоне облегченного крепления

$$D = \frac{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}}{\gamma_1 f m}. \quad (18)$$

В формулах (11)–(18) приняты следующие обозначения: γ_b, γ_1 – удельный вес воды и грунта во взвешенном водой состоянии, Н/м³; W, F – объем элемента грунта и площадь его проекции на плоскость действия равнодействующей сдвигающей силы, $W/F = d$ (d – диаметр частицы грунта, м); a_0 – коэффициент придонной скорости, по экспериментальным данным, принимается 2,27 [12]; $h_b, \bar{\lambda}$ – высота и длина волны 50%-й обеспеченности при шторме с расчетной скоростью ветра, м; n – коэффициент, зависящий от крутизны волны $\bar{\lambda}/h_b$ [11] (табл. 3); α, m – угол наклона и коэффициент заложения откоса.

Таблица 3

$\bar{\lambda}/h_b$	8	10	15	20
n	0,60	0,70	0,75	0,80

ВЫВОД

Для расчета параметров креплений откосов земляных плотин в условиях волнового воздействия на основе теории предельного равновесия разработаны новые формулы по определению диаметра камня наброски и толщины железобетонных плит, пригодные для водохранилищ различных размеров, в том числе малых водохранилищ Беларуси. Формулы учитывают основные нагрузки, создаваемые волновым потоком, и физико-механические свойства материала крепления. Они могут быть рекомендованы к практическому применению в проектных организациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения: в 2 ч. / под. ред. М. М. Гришина. М.: Высш. шк., 1979. Ч. 1. 615 с.
2. Гидротехнические сооружения: в 2 ч. / под. ред. Л. Н. Рассказова. М.: Изд-во АСВ, 2011. Ч. 1. 576 с.
3. Алперин, И. Е. Укрепление берегов судоходных каналов, рек и водохранилищ / И. Е. Алперин, П. С. Быков, В. Б. Гулевич. М.: Транспорт, 1973. 216 с.

4. Богославчик, П. М. Проектирование и расчет гидротехнических сооружений / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. Минск: БНТУ, 2003. 363 с.
5. Богославчик, П. М. Гидротехнические сооружения / П. М. Богославчик. 2-е изд., испр. Минск: БНТУ, 2014. 223 с.
6. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов): ТКП 45-3.04-170-2009 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2011. 74 с.
7. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / под. ред. В. П. Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.
8. Шайтан, В. С. Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений / В. С. Шайтан. М.: Стройиздат, 1974. 352 с.
9. Кириенко, И. И. Гидротехнические сооружения. Проектирование и расчет / И. И. Кириенко, Ю. А. Химерик. Киев: Вища шк., 1987. 253 с.
10. Михневич, Э. И. Устойчивость берегов водохранилищ при формировании профиля динамического равновесия в несвязных грунтах / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич // Мелиорация. 2016. Т. 78, № 4. С. 18–23.
11. Справочник по гидравлическим расчетам / под. ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1974. 313 с.
12. Михневич, Э. И. Устойчивость русел открытых водотоков / Э. И. Михневич. Минск: Ураджай, 1988. 240 с.
3. Alperin, I. E., Bykov P. S., Gulevich V. B. (1973) *Bank Strengthening of Shipping Canals, Rivers and Water Storage Reservoirs*. Moscow, Transport. 216 (in Russian).
4. Bogoslavchik P. M., Kruglov G. G. (2003) *Engineering and Design of Hydraulic Engineering Installations*. Minsk, Belarusian National Technical University. 363 (in Russian).
5. Bogoslavchik P. M. (2014) *Hydraulic Engineering Installations*. 2nd ed. Minsk, Belarusian National Technical University. 223 (in Russian).
6. ТКП 45-3.04-170-2009 (02250). *Hydraulic Engineering Installations. Rules for Determination of loadings and Impacts (Waves, Ice and Ships)*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2011. 74 (in Russian).
7. Zheleznyakov G. V., Izad-zade Yu. A., Ivanov P. L., Latyshenkov A. M., Nedriga V. P. (ed.), Obrazovskii A. S., Ratkovich D. Ya., Rozanov N. P., Shaitan V. S., Asarin A. E., Burenkova V. V., Vasil'eva I. A., Dianov V. G., Kaganov G. M., Klein I. S., Kolesnikova T. V., Motinov A. M., Pavilonskii V. M., Pokrovskii G. I., Rozanov N. N., Titova V. I., Berezinskii S. A., Zabavin V. S. (1983) *Hydraulic Engineering Installations: Reference Book for Designer*. Moscow, Stroyizdat Publ. 543 (in Russian).
8. Shaytan V. S. (1974) *Earth Slope Protection of Hydraulic Engineering Installations*. Moscow, Stroyizdat Publ. 352 (in Russian).
9. Kirienko I. I., Khimerik Yu. A. (1987) *Hydraulic Engineering Installations. Engineering and Design*. Kiev, Vishcha Shkola Publ. 253 (in Russian).
10. Mikhnevich E. I., Levkevich V. E. (2016) Stability of Water Reservoir Banks while Forming Profile of Dynamic Balance in Cohesionless Soil. *Melioratsia* [Melioration], 78 (4), 18–23 (in Russian).
11. Kiselev P. G. (ed.), Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Slisskii S. M. (1974) *Reference Book for Hydraulic Calculations*. Moscow, Energy Publ. 313 (in Russian).
12. Mikhnevich E. I. (1988) *Stability in Water Open Channels*. Minsk, Uradzhay Publ. 240 (in Russian).

Поступила 07.07.2017
 Подписана в печать 17.09.2017
 Опубликовано онлайн 30.03.2018

REFERENCES

Received: 07.07.2017
 Accepted: 17.09.2017
 Published online: 30.03.2018

Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений

Асп. Е. Е. Шалый¹⁾, канд. техн. наук, доц. Л. В. Ким¹⁾, докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович²⁾, инж. А. В. Степанова³⁾

¹⁾Инженерная школа ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» (Владивосток, Российская Федерация),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. На побережье Дальнего Востока России климат носит муссонный характер, который наиболее ярко выражен на юге, а к северо-востоку постепенно ослабевает. Сезонная смена океанического и континентального влияния отражается на характере климата: лето умеренно теплое и дождливое, зима холодная и малоснежная. С развитием Северного морского пути и наращиванием нефтедобычи на шельфе сегодня проблема определения долговечности инженерных гидротехнических и портовых сооружений является крайне актуальной. Согласно официальной статистике, больше половины портовых сооружений находятся в неудовлетворительном состоянии и нуждаются в ремонте или реконструкции, в свою очередь это требует значительных капиталовложений. Опыт эксплуатации показал, что средний срок службы большинства гидротехнических сооружений составляет 30–40 лет, тогда как нормативный срок службы должен составлять минимум 50–100 лет. Сегодня около 90 % железобетонных портовых сооружений имеют дефекты бетона и арматуры, которые снижают долговечность и несущую способность. В процессе эксплуатации эти сооружения, как правило, подвергаются комплексу тяжелых агрессивных воздействий, поэтому на стадии проектирования важно предусмотреть целый ряд факторов, которые могут повлиять на фактический срок службы их железобетонных элементов. Существующие методики проектирования не в полном объеме отражают реальные условия эксплуатации гидротехнических сооружений. Это особенно ярко проявляется в районах, где одновременное воздействие таких факторов, как низкие температуры воздуха и большое число ясных дней в зимнее время при сильной солнечной радиации, приводит к резкому изменению реальных условий эксплуатации по сравнению с расчетными. Бетоны многих сооружений и конструкций испытывают большее число агрессивных воздействий, чем это предусматривается нормами проектирования. Поэтому из вышесказанного следует, что проблема прогноза ресурса железобетонных элементов как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации всегда была наименее изученной в теории сооружений и наиболее весомой в социально-экономическом плане. В статье рассматривается модель воздействия окружающей среды юга Дальнего Востока, связанная преимущественно с воздействием на гидротехнические железобетонные сооружения углекислого газа в окружающей среде и последующей коррозией бетона и арматуры.

Ключевые слова: бетон, арматура, хлориды, коррозия

Для цитирования: Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений / Е. Е. Шалый [и др.] // 2018. Т. 17, № 2. С. 106–113. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-106-113

Probabilistic Analysis of Depth and Carbonation Front Development in Concrete of Marine Structures

Е. Е. Shalyi¹⁾, L. V. Kim¹⁾, S. N. Leonovich²⁾, A. V. Stepanova³⁾

¹⁾School of Engineering Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The climate on the coast of the Russian Far East is monsoonal which is strongly pronounced in the south, and it is gradually weakening to the northeast. Seasonal change of oceanic and continental influence affects the nature of the climate:

Адрес для переписки

Шалый Евгений Евгеньевич
Инженерная школа ФГАОУ
ВПО «Дальневосточный федеральный университет»
ул. Пушкинская, 37,
690014, г. Владивосток, Приморский край,
Российская Федерация
Тел.: +7 423 226-88-18
john_shamali@mail.ru

Address for correspondence

Shalyi Evgeny E.
School of Engineering
Far Eastern Federal University
37 Pushkinskaya st.,
690014, Vladivostok, Primorskiy krai,
Russian Federation
Tel.: +7 423 226-88-18
john_shamali@mail.ru

summer is moderately warm and rainy and winter is cold and with little snow. Determination of longevity for engineering hydro-technical and port facilities is considered presently as an extremely urgent problem due to development of the Northern Sea Route and an increase in oil production on the shelf. According to official statistics more than half of the port facilities are in unsatisfactory condition and require repair or reconstruction and, in its turn, it requires considerable capital investment. Operational experience has shown that the average service life of most hydraulic engineering structures is 30–40 years, whereas the normative service life should be at least 50–100 years. Today about 90 % of reinforced concrete port facilities have defects in concrete and reinforcement which reduce durability and bearing capacity. In the course of operation these structures are usually exposed to a complex of severe aggressive actions, therefore it is important at the design stage to provide for a number of factors that may affect the actual life of their reinforced concrete elements. The existing design techniques do not fully reflect the actual operating conditions of hydraulic engineering structures. This is particularly evident in the areas where simultaneous impact of such factors as low air temperatures and a large number of clear days in winter with strong solar radiation leads to a drastic change in the actual operating conditions compared to the calculated ones. Concretes of many facilities and structures are affected by a great number of aggressive impacts than it is provided for by design standards. Therefore, from the above, it follows that the problem of forecasting the resource of reinforced concrete elements, both at the design stage and in the process of exploitation, has always been the least studied in the theory of structures and the most significant in the socioeconomic sense. The paper considers a model of the environmental impact of the south of the Far East, which is mainly associated with the action of carbon dioxide on hydraulic engineering reinforced concrete structures in the environment and subsequent corrosion of concrete and reinforcement.

Keywords: concrete, reinforcement, chlorides, corrosion

For citation: Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N., Stepanova A. V. (2018) Probabilistic Analysis of Depth and Carbonation Front Development in Concrete of Marine Structures. *Science and Technique*. 17 (2), 106–113. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-106-113 (in Russian)

Обзор исследований

Начало изучения процессов газовой коррозии бетона и железобетона положено в [1–4], однако проблема до сих пор остается актуальной. Проникновение газов в железобетонные конструкции стимулирует коррозию арматуры. Глубина проникновения углекислого газа и условия его контакта с арматурой характеризуют долговечность бетона. Главные факторы, влияющие на протекание газовой коррозии в железобетонных конструкциях, следующие: отсутствие на поверхности арматуры пленки воды, минимальное содержание влаги, высокая температура, неоднородность химического состава арматуры.

Действие на железобетон газовых сред определяется видом и концентрацией кислоты, конденсирующейся на поверхности и в порах защитного слоя бетона. Агрессивное воздействие распространенных кислых газов CO_2 состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, влияющих на его свойства. Углекислый газ в бетоне соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его и обуславливая потерю защитных свойств поверхностного слоя. Для решения вероятностной задачи за основу модели карбонизации принята модель Dura Crete [5–7], которая описывает осредненные данные и тенденции их изменения с течением времени.

Описание расчетной модели

Модель Dura Crete взята в [8]. Она удобна для практического применения инженерами и дает хорошую сходимость с испытаниями на коррозионную стойкость. Модель карбонизации, уточненная в [1, 2, 9], основана на первом законе диффузии Фика [3, 4, 10] и рассматривает влияние факторов окружающей среды

$$x_c = \sqrt{2k_{RH}k_c \left(k_t R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t \right) C_s} \times \sqrt{t_{SL}} \cdot \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(p_{SR} T_{0W})^{b_w}}{2}}, \quad (1)$$

где x_c – глубина карбонизации, м; k_c – коэффициент твердения (уход за бетоном, т. е. сохранение при твердении бетона его влажностного состояния, которое исключает раннее высыхание, повышает степень гидратации, а проницаемость бетона для газов с увеличением длительности ухода снижается); ε_t – погрешность, обусловленная использованием ускоренного метода карбонизации, мм^2 ; $R_{ACC,0}^{-1}$ – обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, определенное в условиях ускоренной карбонизации (ACC), $\text{м}^5/(\text{с} \cdot \text{кг } \text{CO}_2)$; t_{SL} – время эксплуатации конструкции или расчетный срок службы, год.

Таким образом, на основании первого закона Фика [3, 4, 10] из (1) получено уравнение

$$g(a, x_c(t_p)) = a - x_c(t_p) = a - \sqrt{2k_{RH}k_c(k_t R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t)C_s} \cdot \sqrt{t_p} \cdot W(t_p), \quad (2)$$

где $x_c(t_p)$ – глубина карбонизации за время t_p , мм; C_s – концентрация CO_2 в окружающем воздухе, кг/м³; $W(t_p)$ – функция, учитывающая влияние климатических параметров.

Предполагается, что коэффициент диффузии для углекислого газа через материал является константой материала. Однако в общем случае коэффициент диффузии CO_2 в бетоне в течение времени эксплуатации может зависеть от большого количества факторов. Уравнение (2) лежит в основе полного вероятностного расчетного метода для коррозии карбонизации в бетоне без трещин, в котором толщина защитного слоя бетона сравнивается с глубиной карбонизации $x_c(t_p)$ за определенное время t_p .

Развитие карбонизации в значительной степени зависит от периодичности и длительности периодов увлажнения (табл. 1, 2)

$$w = a_w T_{0W}^{b_w}, \quad (3)$$

где a_w – параметр регрессии ($m = 0,50$); b_w – параметр регрессии при нормальном распределении ($m = 0,446$; $s = 0,163$).

Вероятность увлажнения поверхности дождем определяем по уравнению [11]

$$p_{SR} = \frac{\sum d(w_i \cap r)}{\sum d(r)}, \quad (4)$$

где $\sum d(w_i \cap r)$ – количество дней в течение одного года с ветром в направлении i во время дождя (при выпадении осадков $h \geq 2,5$ мм); $\sum d(r)$ – то же в течение одного года с дождем.

Верификация модели карбонизации

Принятые в расчетах вероятностные модели базисных переменных, входящих в функции состояния (2), представлены в табл. 3. Принятое условие: железобетонная конструкция экс-

плуатируется в различных районах Дальнего Востока и выполнена из бетона на портландцементе с расходом 450 кг/м³ при В/Ц = 0,37. Расчетные районы Дальнего Востока показаны на рис. 1, а глубины карбонизации x_c и распространение фронтов карбонизации u_k по принятой математической модели для этих районов представлены в табл. 4–12.

Таблица 1

Статистические параметры среднегодовой относительной влажности RH_{real} для Дальнего Востока
Statistical parameters of average annual relative humidity RH_{real} for Far East

Название местности	Значение относительной влажности, %		
	Среднее μ	Минимальное a_r	Максимальное b_r
Северо-восточная часть о. Сахалин	84	77	100
Восточная часть о. Сахалин	79	75	100
Юго-восточная часть о. Сахалин	81	74	100
Ванино	81	75	100
Пос. Де-Кастри	80	77	100
Николаевск-на-Амуре	83	74	100
Владивосток	84	61	100
Пос. Славянка	73	64	100
Находка	83	72	100

Таблица 2

Среднее количество дней с дождем и влажное время
Average number of rainy days and humid period

Название местности	Количество дней с осадками за 2013 г., $h_{Nd} \geq 2,5$ мм/год	Влажное время T_{0W}
Северо-восточная часть о. Сахалин	167	0,464
Восточная часть о. Сахалин	147	0,408
Юго-восточная часть о. Сахалин	99	0,275
Ванино	153	0,452
Пос. Де-Кастри	95	0,264
Николаевск-на-Амуре	137	0,381
Владивосток	166	0,461
Пос. Славянка	130	0,361
Находка	103	0,286

Таблица 3

Вероятностные модели базисных переменных, характеризующих свойства материалов, условия эксплуатации конструкции, применяемые для вероятностного расчета глубины и скорости карбонизации железобетонного элемента

Probabilistic models of base variables characterizing material properties, operational conditions of structures which are applied for probability calculation of depth and rate of reinforced element carbonization

Параметр	Единица измерения	Тип распределения	Среднее значение (μ), стандартное отклонение (σ), нижняя и верхняя абсолютные границы (a , b)								
			Северо-восточная часть о. Сахалин	Восточная часть о. Сахалин	Юго-восточная часть о. Сахалин	Ванино	Де-Кастри	Николаевск-на-Амуре	Владивосток	Славян-ка	Наход-ка
$RH_{real}(k_c)$	%	Бета (с верхним и нижним пределами)	$\mu = 84$ $\sigma = 4,6$ $a_r = 77$ $b_r = 100$	$\mu = 79$ $\sigma = 3,9$ $a_r = 75$ $b_r = 100$	$\mu = 81$ $\sigma = 5,2$ $a_r = 74$ $b_r = 100$	$\mu = 81$ $\sigma = 6,1$ $a_r = 75$ $b_r = 100$	$\mu = 80$ $\sigma = 3,5$ $a_r = 77$ $b_r = 100$	$\mu = 83$ $\sigma = 5,7$ $a_r = 74$ $b_r = 100$	$\mu = 84$ $\sigma = 12,58$ $a_r = 61$ $b_r = 100$	$\mu = 73$ $\sigma = 6,18$ $a_r = 64$ $b_r = 100$	$\mu = 83$ $\sigma = 10,69$ $a_r = 72$ $b_r = 100$
$RH_{ref}(k_c)$	%	det	65/(-)								
g_{e_1}	—	det	2,5								
f_e	—	det	5,0								
t_c	дни	det	1								
b_c	—	N	$\mu = -0,567 / \sigma = 0,024$								
k_t	—	LN	$\mu = 1,25 / \sigma = 0,35$								
$R_{ACC,0}^{-1}$	(мм ² /год)/(кг/м ³)	LN	$\mu = 1552$								
ε_t	(мм ² /год)/(кг/м ³)	LN	$\mu = 315,5 / \sigma = 48$								
C_s	кг/м ³	LN	$\mu = 8,15 \cdot 10^{-4} / \sigma = 1 \cdot 10^{-4}$								
b_w	—	LN	$\mu = 0,446 / \sigma = 0,163$								
T_{0W}	—	det	0,464	0,408	0,275	0,452	0,264	0,381	0,461	0,361	0,286
$p_{SR}(W)$	—	det	0,240	0,359	0,239	0,248	0,190	0,300	0,367	0,338	0,267
$t_0(W)$	годы	det	0,0767 (равно 28 дней)								
a	мм	det	50								
Δa	мм	N	$\mu = +5 / \sigma = 5$								
t_p	годы	det	1–100								

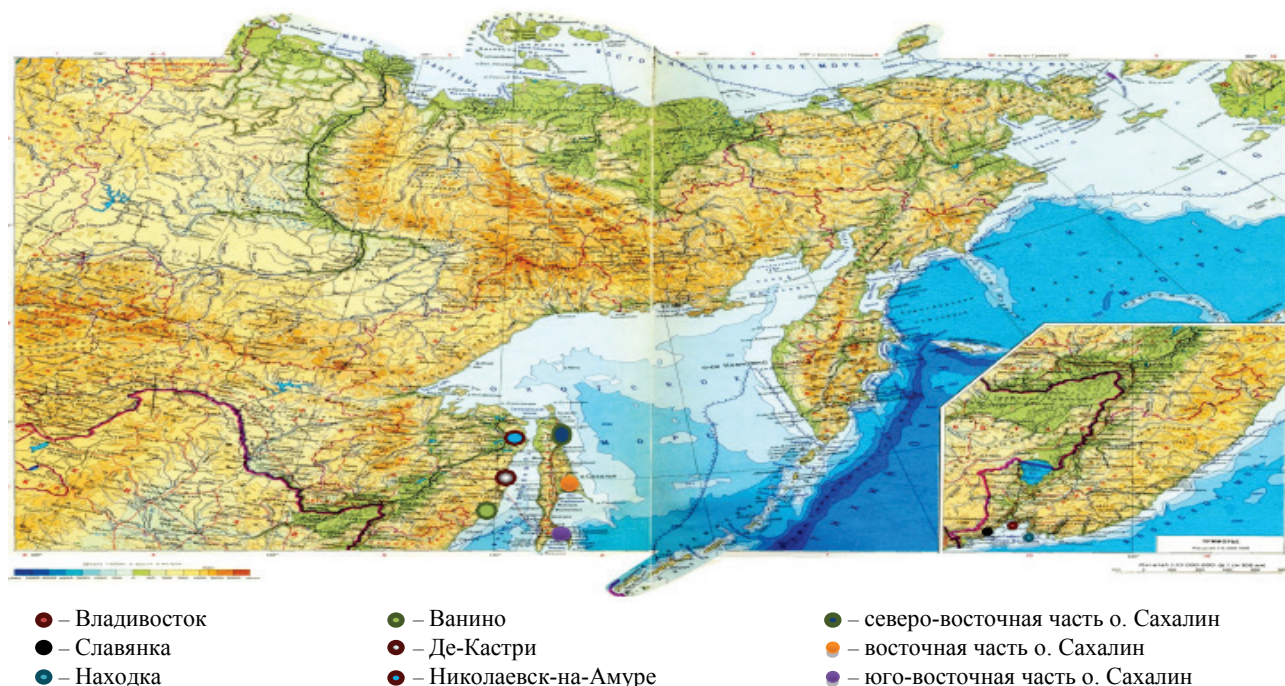


Рис. 1. Расчетные районы Дальнего Востока

Fig. 1. Calculation regions of Far East

Таблица 4

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для северо-восточной части о. Сахалин

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for North-Eastern part, Sakhalin Island

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	10,54	1,0540000
25	16,67	0,6668000
30	18,26	0,6086667
50	23,57	0,4714000
100	33,33	0,3333000

Таблица 5

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для восточной части о. Сахалин

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for Eastern part, Sakhalin Island

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	12,970	1,2970000
25	20,500	0,8200000
30	22,460	0,7486667
50	28,996	0,5799200
100	41,010	0,4101000

Таблица 6

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для юго-восточной части о. Сахалин

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for South-Eastern part, Sakhalin Island

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	11,88	1,1880
25	18,78	0,7512
30	20,58	0,6860
50	26,56	0,5312
100	37,57	0,3757

Таблица 7

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для г. Ванино

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for town Vanino

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	28,5000	2,850000
25	45,0544	1,802176
30	49,3500	1,645000
50	63,7200	1,274400
100	90,1100	0,901100

Таблица 8

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для пос. Де-Кастри

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for township De-Kastri

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	18,51	1,8510000
25	29,26	1,1704000
30	32,05	1,0683333
50	41,38	0,8276000
100	58,52	0,5852000

Таблица 9

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для г. Николаевска-на-Амуре

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for town Nikolayevsk-on-Amur

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	23,780	2,37800
25	37,597	1,50388
30	41,190	1,37300
50	53,170	1,06340
100	75,190	0,75190

Таблица 10

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для г. Владивостока

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for town Vladivostok

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	20,76	2,076000000
25	32,83	1,313200000
30	35,96	1,198666667
50	46,42	0,928400000
100	65,65	0,656500000

Таблица 11

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для пос. Славянка

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for township Slavyanka

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	26,37	2,637000000
25	41,69	1,667600000
30	45,67	1,522333333
50	58,96	1,179200000
100	83,38	0,833800000

Таблица 12

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для г. Находки

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for town Nakhodka

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	17,2	1,720000000
25	27,2	1,088000000
25	27,2	1,088000000
30	29,8	0,993333333
50	38,47	0,769400000
100	54,4	0,544000000

Экспериментальные исследования карбонизации на портовых сооружениях о. Сахалин. Проверка адекватности модели карбонизации

Для уточнения результатов вероятностного моделирования (рис. 2, 3) проникновения углекислого газа в бетон гидротехнических сооружений отдельно выполнено обследование причальных сооружений острова Сахалин и определение карбонизации бетона посредством фенолфталеиновой пробы (рис. 4).

Пробы показали, что на гидротехнические сооружения со стороны моря карбонизация оказывает незначительное воздействие. Однако со стороны территории портов, а также в зоне переменного уровня наблюдается проникновение углекислого газа на всю глубину защитного слоя бетона (рис. 4).

Измерение прочностных характеристик причального сооружения выполняли с помощью ультразвукового прибора «Пульсар 2.1» и склерометра Original-Schmidt. Результаты исследований приведены в табл. 13.

По результатам табл. 13 можно сделать вывод, что наибольшие потери прочности произошли в бетоне зоны переменного уровня надстройки. Потеря прочности случилась из-за отслоения гидроизоляции с последующей коррозией бетона в результате воздействия на сооружение углекислого газа воздуха, хлоридов и сульфатов морской воды.

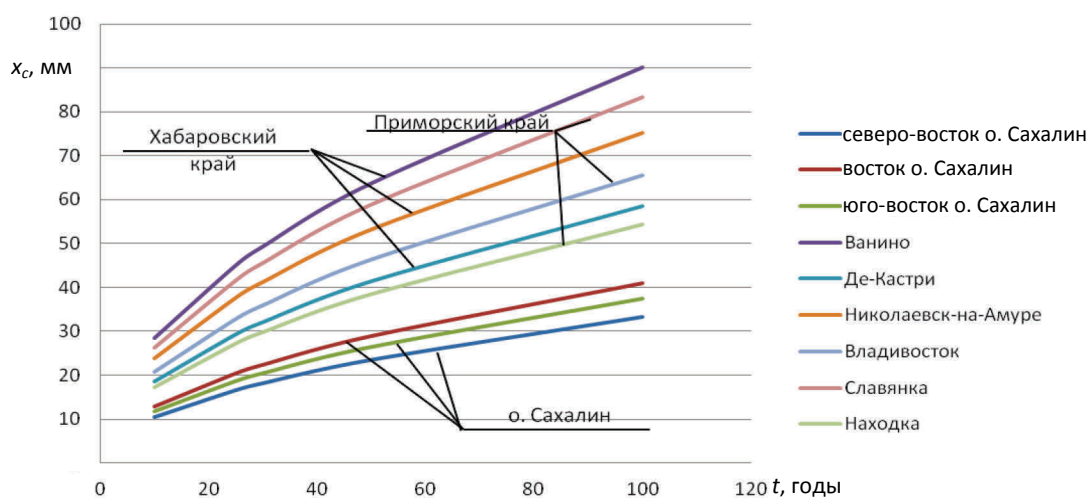


Рис. 2. Рост глубины карбонизации с течением времени для различных районов Дальнего Востока

Fig. 2. Carbonation depth growth due to time period for various regions of Far East

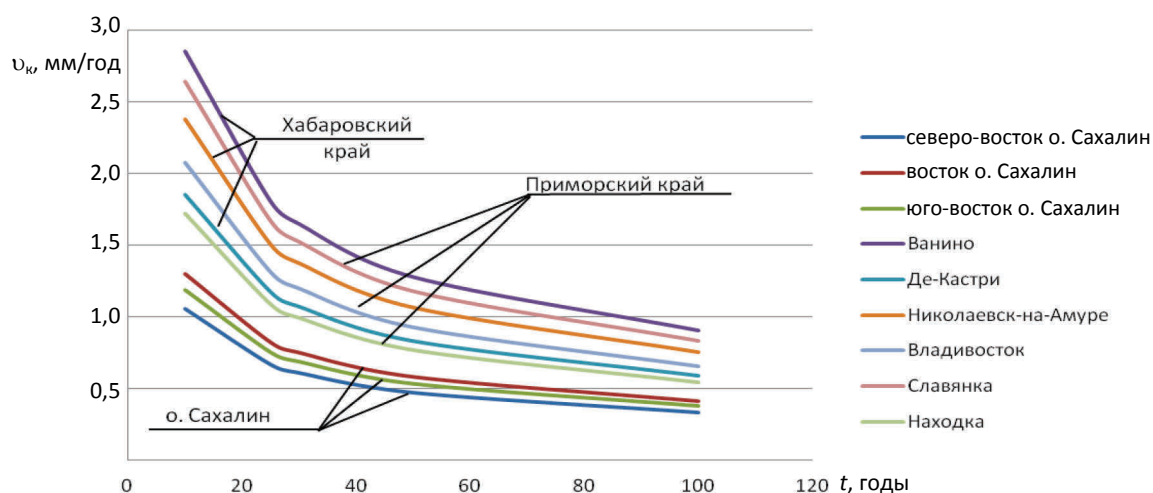


Рис. 3. Изменение скорости перемещения фронта карбонизации с течением времени для различных районов Дальнего Востока

Fig. 3. Changes in displacement rate of carbonation front due to time period for various regions of Far East

Таблица 13

Результаты испытаний защитного слоя бетона методами неразрушающего воздействия

Test results for concrete protective layer while using method without destructiveness

Способ и характеристика измерения	Место измерения			
	Холмский морской торговый порт		Корсаковский морской торговый порт	
	Лицевая причальная стенка	Железобетонная надстройка	Лицевая причальная стенка	Железобетонная надстройка
Склерометр (R_m , МПа)	40,0	33,7	36,2	32,6
Пульсар 2.1 (R_m , МПа)	40,4	41,9	41,7	30,8
Общая оценка прочности (R_m , МПа)	40,2	37,8	38,95	31,7
Соответствие классу бетона	B30	B30	B30	B25
Класс бетона по проекту	B30	B30	B30	B30



Рис. 4. Фенолфталеиновая проба

Fig. 4. Phenolphthalein sample

ВЫВОДЫ

1. На основе предложенных вероятностных моделей и при использовании полученных мо-

делей базисных переменных выполнены моделирование глубины и скорости карбонизации бетона, а также анализ концентрации хлоридов на некоторой глубине защитного слоя бетона для условий о. Сахалина.

2. Различия по карбонизации для вероятностного подхода при натурном определении глубины проникновения углекислого газа в бетон защитного слоя и натурных исследованиях на период 30 лет составляют до 7 %. Поэтому в дальнейшем, оперируя значениями, полученными в ходе вероятностного моделирования, можно достаточно точно рассчитать срок службы бетона шельфовых конструкций в данном районе и надежно определить возможность эксплуатации конструкции без специальной (вторичной) защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gehlen, C. Probabilistic Lebensdauerberechnung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur Wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. RWTH-Aachen, 2000.
2. Dura Crete: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions. Report No BE 95-1347–2000. P. 62–63.
3. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. М.: Стройиздат, 1976. 205 с.
4. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]. М.: Стройиздат, 1990. 247 с.
5. Dura Crete: Brite EuRam III Project BE95-1347, Report R4-5, Modeling of Degradation, 1998.
6. Eurocode 1: DIN V ENV 1991. Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkung auf Tragwerke. Teil 1–4. 1991.
7. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1-1:2004 (E). Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 225 p.
8. Roberts, M. H. Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates, BRE, Information Sheet. 1981.
9. Durable Concrete Structures: Design Guide / CEB – Comité Euro International du Béton. London: Thomas Telford, 1992.
10. Несущие и ограждающие конструкции: СНиП 3.03.01–87. Введ. 01.07.1988. М.: ЦНИИОМТП, 1987. 190 с.
11. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов. М.: Информавтодор, «Росавтодор» Минтранса, 2002. 140 с.

Поступила 10.06.2016

Подписана в печать 26.01.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Gehlen C. (2000) *Probabilistic Lebensdauerberechnung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur Wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. RWTH-Aachen (in German).
2. *Dura Crete: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions*. Report No BE 95-1347–2000, 2000, 62–63.
3. Alexeev S. N., Rozental N. K. (1976) *Corrosion Resistance of Reinforced Concrete Structures in Aggressive Industrial Environment*. Moscow, Stroyizdat Publ. 205 (in Russian).
4. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Shissl' P. (1990) *Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Environments*. Moscow, Stroyizdat Publ. 247 (in Russian).
5. Dura Crete: Brite EuRam III Project BE95-1347, Report R4-5, Modeling of Degradation, 1998.
6. Eurocode 1: DIN V ENV 1991. Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkung auf Tragwerke. Teil 1–4. 1991.
7. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1-1:2004 (E). Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 225.
8. Roberts M. H. (1981) *Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates*, IP6/81. Building Research Establishment, Garston, 1981.
9. CEB – Comité Euro International du Béton (1992). *Durable Concrete Structures: Design Guide*. London, Thomas Telford.
10. SNiP [Construction Norms and Regulations] 3.03.01–87. *Bearing and Enclosing Structures*. Moscow, Central Scientific Research Institute of Organization, Mechanization and Assistance to Construction, 1987. 190 (in Russian).
11. *Methodology for Computed Prediction of Service Life for Reinforced Concrete Superstructures of Highway Bridges*. Moscow, Publishing House “Informavtodor”, “Rosavtodor”, Ministry of Transport, 2002. 140 (in Russian).

Received: 10.06.2016

Accepted: 26.01.2017

Published online: 30.03.2018

Некоторые особенности ресурсосбережения в строительстве

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Осипов¹⁾, асп. А. В. Захаренко¹⁾, Д. А. Поздняков¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Для Республики Беларусь с ограниченными важными природными ресурсами их сбережение является одним из стратегических направлений развития строительной отрасли. При этом наибольшая эффективность использования закономерностей ресурсосбережения может достигаться не путем экономии денежных средств за счет применения более дешевых материалов с худшими свойствами, а, наоборот, путем выбора более дорогих качественных строительных материалов и изделий, но, безусловно, в определенных условиях изменения цены. Так, анализ изменения цены бетона с ростом прочности на сжатие показал, что цена 1 м³ бетона возрастает гораздо медленнее увеличения прочности. Поэтому для работы на сжатие высокопрочные бетоны являются более выгодными по сравнению с низко- и среднечастными. Для оценки ресурсоэффективности предложены новые сравнительные единицы прочностных и других физических свойств: удельные цена (при использовании) и стоимость (при производстве) позволяют сравнить различные материалы и изделия, что, например, необходимо при использовании трубобетонных конструкций в строительстве. Как показывают расчеты, в обычных условиях эксплуатации для трубобетонных конструкций следует применять высокопрочный бетон и трубы с минимальной толщиной стенок, выдерживающих боковое давление деформирующегося под нагрузкой сердечника. При этом для компенсации различия в деформационных характеристиках бетона и материала трубы необходимо использовать демпфирующие устройства, обеспечивающие предельно допустимые нагрузки бетонного сердечника и материала трубы.

Ключевые слова: ресурсосбережение, цена, высокопрочный бетон, трубобетон, труба, деформационные характеристики, демпфирующее устройство, предельные нагрузки

Для цитирования: Осипов, С. Н. Некоторые особенности ресурсосбережения в строительстве / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко, Д. А. Поздняков // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 114–122. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-114-122

Some Specific Features of Resource Saving in Construction

S. N. Osipov¹⁾, A. V. Zakharenko¹⁾, D. A. Pozdnyakov¹⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The Republic of Belarus possesses a limited number of important natural resources and their conservation is considered as one of the strategic directions for the development of construction industry. Regularities in resource saving can be used not only for cost-cutting at the expense of cheaper materials with worse properties but they can also be used under certain specific conditions for price formation through selection of expensive qualitative construction materials and products. Thus an analysis of changes in concrete price due to higher compressive strength has shown that the price per one concrete cubic metre is increasing much more slowly than an increase in strength. For this reason high-performance concrete is more advantageous in comparison with low- and medium-strength concrete. New comparative units for strength and other physical properties have been proposed for assessment of resource efficiency: unit price (in case of being used) and cost price (in case of being manufactured) make it possible to compare various materials and products and such approach is necessary while using steel tube confined concrete (STCC) structures in construction. Estimates suggest that high-strength concrete and tubes with minimum thickness of walls withstanding lateral pressure of a core which is deformed under load must be applied for STCC structures under normal operational conditions. In this context it is necessary to use damping devices for compensation

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15б,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

of difference in characteristics of concrete and tube material and these devices ensure maximum safe load of concrete core and tube material.

Keywords: resource saving, price, high-performance concrete, tube concrete, tube, deformation characteristics, damping device, maximum safe load

For citation: Osipov S. N., Zakharenko A. V., Pozdnyakov D. A. (2018) Some Specific Features of Resource Saving in Construction. *Science and Technique*. 17 (2), 114–122. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-114-122 (in Russian)

Ресурсосбережение [1, с. 446] при строительстве различных объектов является одним из основных факторов эффективности проектирования и проведения строительных работ. При этом наибольшая эффективность использования закономерностей ресурсосбережения может достигаться не путем экономии денежных средств за счет применения более дешевых материалов с худшими свойствами, а, наоборот, путем выбора более дорогих качественных строительных материалов и изделий, но, безусловно, в определенных условиях изменения цены [1, с. 580]. Особенно интересно проанализировать возможности ресурсосбережения при применении бетона и его сочетании с другими материалами вследствие того, что в Республике Беларусь производство высококачественного цемента [2, 3], являющегося главной составляющей бетона, превышает внутренние потребности.

Анализ изменения стоимости бетона [4, 5] с ростом его средней прочности на сжатие (СТБ 1544–2005, приложение А) показывает, что цена 1 м³ бетона возрастает гораздо медленнее увеличения прочности. Как видно из графика на рис. 1, где приведены зависимости стоимости 1 м³ бетона от его прочности [4], значения цены в виде точек располагаются на одной прямой линии, описываемой выражением

$$C = a_1 + b_1 \sigma, \quad (1)$$

где C – цена 1 м³ бетона, у. е.; a_1 , b_1 – эмпирические коэффициенты при a в у. е. и b в у. е./кгс/см²; σ – прочность полностью затвердевшего бетона на сжатие, кгс/см².

При помощи корреляционной обработки параметров восьми фактических значений цены (точки на рис. 1) определены величины $a_1 \approx 27,5$ у. е. и $b_1 \approx 0,05$ у. е./кгс/см². Коэффициент линейной корреляции при этом составил $r \approx 0,998$, что характеризует возможную погрешность в размере около 0,0015. Эти значения показывают почти идеальную линейную связь между прочностью данного бетона и его

ценой, что позволяет экстраполировать полученную зависимость до $\sigma = 0$, т. е. до полного отсутствия цемента в бетонной смеси. Следовательно, исходная смесь щебня с другими добавками для получения бетона оценивается примерно в $a_1 = 27,5$ у. е., что для бетона марки ПЗ М500 (класс С30/37) составляет только около половины цены (≈ 53 у. е.).

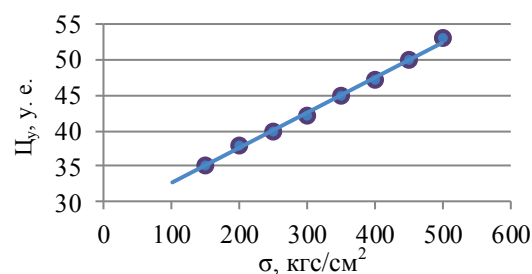


Рис. 1. Зависимость стоимости бетона на щебне от прочности на сжатие (точки соответствуют цене в у. е. из [4] при 1 у. е. $\approx$ 2 бел. руб.)

Fig. 1. Dependence of crushed-stone concrete cost on compression strength (points correspond to price in currency units from [4] when 1 c. u. $\approx$ 2 BYR)

Анализ соотношения «прочность–цена» для других бетонов и производителей показывает примерно аналогичные зависимости, но с меньшими значениями коэффициентов корреляции и возможными отклонениями при использовании различных, особенно специфических, добавок.

Однако для лучшего понимания изменения цены (при покупке) и стоимости (при производстве) при росте прочности бетона необходимо ввести новые показатели: удельную цену C_y и удельную стоимость C_σ , которые относятся к единице прочности. В данном случае – количество наиболее устойчивых денежных единиц к единице прочности, т. е. C_y и C_σ в у. е./кгс/см².

Следовательно, удельная цена и удельная стоимость определяются по зависимостям:

$$C_y = C/\sigma; \quad (2)$$

$$C_\sigma = C/\sigma, \quad (3)$$

где C , C – цена и стоимость; σ – прочность в физических единицах.

В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость удельной цены бетона на щебне от прочности на сжатие, построенная по значениям цены для точек на рис. 1.

Для аппроксимации этой зависимости были выбраны следующие алгебраические выражения:

$$C_y = a_2 + b_2 \sigma^n; \quad (4)$$

$$C_y = a_3 + b_3/\sigma. \quad (5)$$

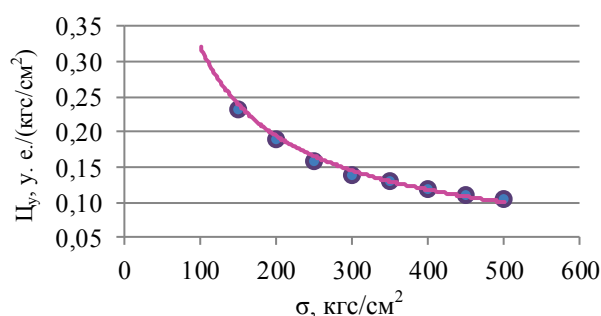


Рис. 2. Зависимость удельной цены бетона на щебне от прочности на сжатие

Fig. 2. Dependence of crushed-stone concrete price on compression strength

Как показал корреляционный анализ этих линейаризованных выражений, для них коэффициенты корреляции составили около $-0,94$, что для подобных приближенных расчетов достаточно хороший результат. Поэтому принимаем (5) при $a_3 \approx 0,05$ и $b_3 \approx 27,7$. Для сравнения, в (4) получено $a_2 \approx 0,048$; $b_2 \approx 25,9$ и $n = -0,985$.

В Российской Федерации наблюдается еще более резкая зависимость удельной цены бетона от прочности на сжатие. Так, для бетона на гранитном щебне при увеличении прочности со 100 кгс/см^2 (М100) до 1000 кгс/см^2 (М1000) цена повышается в $6500/3070 = 2,12$ раза [6]. Стоимость бетона на гравийном щебне при увеличении прочности со 100 кгс/см^2 (М100) до 400 кгс/см^2 (М400) повышается в $3600/2810 = 1,28$ раза. В цене бетона существенная роль принадлежит цементу. При отсутствии цемента или другого связующего в бетоне прочность на сжатие стремится к нулю.

Приведенные расчеты показывают, что в случае отсутствия каких-либо условий на объем при необходимости использования прочности бетона на сжатие наиболее экономически вы-

годными являются высокопрочные бетоны. Кроме цены, при использовании высокопрочных бетонов уменьшаются расходы на транспорт и монтаж. Поэтому рекомендации по применению бетона различных марок следует пересмотреть.

Выгода использования высокопрочного бетона видна из сравнения удельной цены бетонов марок ПЗ М150 (класс С10/12,5) и ПЗ М450 (класс С28/35) на щебне (рис. 2), которая составляет $0,23/0,11 \approx 2$ раза при трехкратном повышении прочности.

Необходимо также отметить долговечность и трещиностойкость высокопрочных бетонов по сравнению с низкопрочными [7, с. 148, 169], что делает их применение еще более привлекательным.

Значительный интерес представляет возможное ресурсосбережение при сочетании бетона и стали, которое будет рассмотрено на примере трубобетонного эффекта.

Впервые трубобетонный эффект, характеризуемый превышением допустимой нагрузки на металлическую трубу, заполненную бетоном, суммарной нагрузки на незаполненную трубу и бетонное ядро раздельно, обнаружен J. S. Sewell [8]. С той поры проведено много исследований, часть из которых описана в монографии Л. К. Лукши [9].

Определенная сложность правильного расчета трубобетонных конструкций заключается в необходимости учета нагружения оболочки сжатием и внутренним давлением твердой дилатансирующей среды (бетона), способной к сопротивлению и в осевом направлении. При этом в технической литературе недостаточно полно описан учет аналогичного воздействия оболочки на бетон, что дало возможность получить патент [10] на способ повышения прочности трубобетонной конструкции [11]. В этом способе используется учет возможного различия в деформации стальной оболочки и бетонного наполнителя, характеризующихся различными (примерно на порядок) величинами модулей упругости и деформаций при одинаковом воздействии сжимающих нагрузок.

При осевом нагружении трубобетонной конструкции для бетонного сердечника в трубе создают возможность поперечной деформации без существенного обжатия до величины нагрузки, соответствующей прочности бетона при одноосном сжатии, а при этом воз-

возможные продольные деформации бетонного стержня и стальной трубы обеспечивают отдельно до расчетного предела их прочности с учетом труботонного эффекта и необходимого различия в деформациях в соответствии с выражением

$$\Delta l = l \left[\frac{1}{E_b} \left(\sigma_{1.0} + \frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{\text{вн}}} \sigma_{\text{т}} \right) - \frac{\sigma_{\text{т}}}{E_{\text{т}}} \right], \quad (6)$$

где l – продольная длина труботонной конструкции, см; E_b , $E_{\text{т}}$ – модуль упругости бетона и стали трубы, МПа; $\sigma_{1.0}$ – предел прочности бетона на одноосное сжатие, МПа; $\sigma_{\text{т}}$ – предел прочности стали трубы, МПа; μ – коэффициент Пуассона; δ – толщина стенки трубы, см; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, см.

Продольный деформационный промежуток создают за счет использования легкодеформируемого специального слоя на внутренней поверхности трубы, обеспечивающего возможность некоторого перемещения бетонного сердечника вдоль трубы при восприятии нагрузки до момента начала продольного нагружения трубы сжимающей нагрузкой.

С целью обеспечения раздельного учета возможных продольных деформаций бетонного сердечника и стальной трубы продольную сжимающую нагрузку на труботонную конструкцию начинают с нагружения бетонного столба и после достижения его усадки на величину продольного деформационного промежутка продольную сжимающую нагрузку распространяют и на стальную трубу.

Способ решения технической задачи поясняет принципиальная схема работы труботонной конструкции, представленная на рис. 3.

Столб бетона, представленный в виде сердечника 1 цилиндрической формы, через боковую податливую прокладку 2 взаимодействует с внутренней поверхностью заполняемой им стальной трубы 3. Конструкция содержит также торцевую податливую прокладку 4 и верхнюю торцевую накладку 5 для передачи вертикальной нагрузки (показана стрелкой на рис. 3) на труботонную конструкцию, а также твердое основание 6. Как известно [12, с. 99–100], разрушение образца бетона при продольном сжатии в случае отсутствия влияния торцов происходит путем трещинообразования параллельно направлению сжимающих сил.

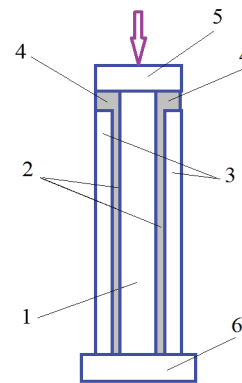


Рис. 3. Схема работы труботонного устройства
Fig. 3. Operational scheme of tube confined concrete device

Как следует из обобщенного закона Гука [12, с. 173–175], при объемном напряженном состоянии материала и равенстве боковых напряжений ($\sigma_{2\text{бок}} = \sigma_3$) осевое напряжение при локализации (практическом отсутствии) боковых деформаций ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3 \approx 0$, что характерно для труботона) составляет

$$\sigma_1 = \frac{1-\mu}{\mu} \sigma_{2,3\text{бок}}, \quad (7)$$

где μ – коэффициент Пуассона (для бетона $\mu_b = 0,15–0,20$ [9, с. 15], для стали трубы $\mu_{\text{т}} = 0,33$); $\sigma_{2,3\text{бок}}$ – боковые напряжения, воспринимаемые стальной трубой.

Тогда при $\mu_b = 0,15$ $\sigma_1 = 5,7\sigma_{2,3\text{бок}}$, а при $\mu_b = 0,20$ $\sigma_1 = 4\sigma_{2,3}$, т. е. при полном силовом взаимодействии бетона с оболочкой прочность бетона на действие осевой нагрузки, по крайней мере в области упругой реакции стальной трубы, увеличивается от 4 до 5,7 раза в зависимости от свойств бетона.

Как следует из результатов опытов проф. А. А. Долженко, приведенных в [9, табл. 1.1], и расчетов автора (табл. 1), при совместной нагрузке бетонного заполнителя и трубы повышение прочности бетона за счет труботонного эффекта составляет

$$\frac{\Delta N_6^s}{N_{6.0}} = 2,08–3,23 \text{ раза}$$

за (табл. 1, колонка 9), что значительно меньше

$$\text{теоретически возможных } \frac{\Delta N_6}{N_{6.0}} = 2,08–6,27 \text{ (ко-$$

$$\text{лонка 10) и } 1 + \frac{\Delta N_6^p}{N_{6.0}} = 3,08–7,27 \text{ раза (ко-$$

лонка 11).

Таблица 1

№	d , см	δ , см	σ_T , МПа	σ_6 , МПа	N_T , кН	$N_{6.0}$, кН	N_0 , кН	$N_{T.6}^3$, кН	$\frac{\Delta N_6^3}{N_{6.0}}$	$\frac{\Delta N_6^p}{N_{6.0}}$	$1 + \frac{\Delta N_6^p}{N_{6.0}}$	σ_6^p , МПа	$\frac{N_{T.6}^p}{N_{T.6}^3}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	25,4	0,86	304	16,1	2150	820	2970	4800	3,23	4,70	5,70	92	1,5
2	25,6	0,92	345	16,1	2650	830	3480	4900	2,70	6,27	7,27	117	1,78
3	25,5	0,84	304	16,1	2100	820	2920	4740	3,22	4,90	5,90	95	1,48
4	25,4	0,84	304	16,1	2100	820	2920	4740	3,22	4,90	5,90	95	1,5
5	20,6	0,25	340	15,1	560	500	1060	1600	2,08	2,08	3,08	46,5	1,32
6	20,3	0,33	330	15,1	710	490	1200	1800	2,22	2,82	3,82	57,5	1,43
7	30,5	0,36	334	15,1	1170	1100	2270	3700	2,31	2,24	3,24	49	1,25
8	30,5	0,56	334	15,1	1820	1100	2920	5000	2,90	3,24	4,24	64	1,31

Примечания: d – диаметр трубы; δ – толщина стенки трубы; σ_T – предел прочности материала трубы; σ_6 – то же бетона при одноосном сжатии; N_T – предельная нагрузка на трубу; $N_{6.0}$ – то же для бетона при одноосном сжатии; N_0 – то же на трубу и бетон без учета труботетонного эффекта; $N_{T.6}^3$ – то же, полученное экспериментально с учетом труботетонного эффекта при одновременном нагружении.

Как видно из приведенных в табл. 1 результатов расчетов, при $\mu_6 = 0,20$ для бетона теоретически возможное использование общего труботетонного эффекта значительно (на 25–73 %, колонка 13) превышает достигнутое в эксперименте. При этом необходимо отметить, что первоначальное использование прочности бетона, почти свободно деформирующегося в поперечном направлении внутри трубы, увеличивает общий труботетонный эффект при $\sigma_6 = 15,1$ – $16,1$ МПа на 10–30 % в зависимости от соотношения начальной прочности трубы (колонка 5) и бетона (колонка 6). О принципиальной правильности представленных в табл. 1 результатов расчетов свидетельствует тот факт, что теоретические расчеты труботетонного эффекта при одновременном восприятии нагрузки трубой и бетоном и небольшом различии в их первоначальной прочности (табл. 1, пересечения строк 5 и 7 с колонками 9 и 10) примерно совпадают.

Технический результат достигается тем, что при осевом нагружении труботетонной конструкции для бетонного сердечника 1 в трубе создают возможность поперечной деформации без существенного обжатия до величины нагрузки, соответствующей прочности бетона при одноосном сжатии (рис. 3). Практически это достигается посредством того, что при заполнении трубы бетоном и образовании бетонного сердечника между ним и внутренней поверхностью стальной трубы 3 создается продольный деформационный промежуток, достаточный для сво-

бодной боковой деформации бетонного сердечника при его первоначальном нагружении до предела прочности при одноосном сжатии. Такой промежуток может быть создан за счет использования легкодеформируемого специального слоя в виде боковой податливой прокладки 2 на внутренней поверхности трубы. Величина первоначальной деформации этого слоя в радиальном направлении трубы должна соответствовать величине боковой деформации бетонного сердечника при его первоначальном нагружении до предела прочности при одноосном сжатии. Одновременно этот слой должен обеспечивать возможность некоторого перемещения столба бетона вдоль трубы при восприятии нагрузки до момента начала продольного нагружения трубы сжимающей нагрузкой. В качестве материала для создания прокладки для такого слоя могут быть использованы, например, многослойные и высокопористые пластмассы.

Кроме возможности поперечного расширения бетона в трубе, необходимо создать условия последовательного восприятия сжимающей нагрузки сначала бетоном, а в конце процесса нагружения – и стальной трубой в соответствии с усадочными характеристиками (модулями упругости) бетона ($E_6 = (0,146$ – $0,232) \cdot 10^5$ МПа в зависимости от предела прочности [12, с. 662, приложение 9]) и стали ($E = (2,0$ – $2,1) \cdot 10^5$ МПа), которые отличаются примерно на порядок.

Ввиду большой разницы усадочных и прочностных характеристик бетона и стали, их со-

вместная работа на сжатие должна начинаться в условиях, когда полное использование прочностных характеристик согласуется в пространстве и времени. Поэтому начальное разделение воздействия нагрузки на бетонный сердечник и стальную трубу заключается в разделении пространственно-временных характеристик нагружения бетона 1 и трубы 3 (рис. 3) и производится за счет конструктивных элементов, таких как торцевая податливая прокладка 4, верхняя торцевая прокладка 5. При этом вся трубобетонная конструкция упирается в твердое основание 6.

Для такой реализации способа можно использовать приведенный выше вариант обобщенного закона Гука при условном обозначении $\sigma_{2,3} = \sigma_2$. Тогда порядок расчета параметров работы трубобетонной конструкции для полного использования трубобетонного эффекта можно описать следующим образом:

1) боковая деформация бетонного цилиндра и зазор между ним и внутренней поверхностью трубы

$$\Delta r = \frac{\mu}{1-\mu} r_{6,0} \frac{\sigma_{1,0}}{E_6}, \quad (8)$$

где $r_{6,0}$ – начальный радиус бетонного цилиндра, см; $\sigma_{1,0}$ – прочность бетона при одноосном сжатии, МПа; E_6 – модуль упругости Юнга для бетона, МПа;

2) предельная реакция внутренней поверхности трубы на боковое расширение бетона

$$\sigma_2 = \frac{2\delta}{d_{\text{вн}}} \sigma_T, \quad (9)$$

где σ_T – предел упругости стали, МПа;

3) предельно допустимое продольное напряжение бетона

$$\sigma_{1,6} = \sigma_{1,0} + \frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{\text{вн}}} \sigma_T; \quad (10)$$

4) полная продольная деформация бетонного цилиндра

$$\Delta l_6 = \frac{1}{E_6} \left(\sigma_{1,0} + \frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{\text{вн}}} \sigma_T \right); \quad (11)$$

5) полная продольная деформация стальной трубы с учетом $\Delta l \ll l$, когда различие в длинах бетонного цилиндра и стальной трубы можно не учитывать ($l_6 \approx l_T \approx l$)

$$\Delta l_T = \frac{\sigma_T}{E_T} l; \quad (12)$$

6) превышение величины усадки бетонного цилиндра над усадкой стальной трубы

$$\begin{aligned} \Delta l &= \Delta l_6 - \Delta l_T = l \left[\frac{1}{E_6} \left(\sigma_{1,0} + \frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{\text{вн}}} \sigma_T \right) - \frac{\sigma_T}{E_T} \right] = \\ &= \sigma_{1,0} \frac{1}{E_6} \left[1 + K_1 \left(\frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{\text{вн}}} - \frac{1}{K_2} \right) \right], \quad (13) \end{aligned}$$

где $K_1 = \sigma_T / \sigma_{1,0}$; $K_2 = E_T / E_6$.

Следовательно, возможные продольные деформации бетонного сердечника и стальной трубы обеспечиваются отдельно до расчетного предела их прочности с учетом трубобетонного эффекта и необходимого различия в деформациях посредством того, что продольную сжимающую нагрузку на трубобетонную конструкцию начинают с нагружения бетонного столба, и только после достижения его усадки на Δl продольную сжимающую нагрузку следует распространить и на стальную трубу.

Как видно из приведенной методики расчета, величина Δl зависит от многих параметров, из которых самый влиятельный коэффициент Пуассона μ . При анализе коэффициентов эффективности трубобетона и Пуассона в [1, с. 32–33] приведены значения $\mu = 0,10$ и $0,15–0,50$ (по О. Я. Бергу), а также сказано, что μ бетона изменяется нелинейно в зависимости от действующих напряжений. По-видимому, значения E_6 также зависят от действующих напряжений, что подтверждается данными [12, с. 662, приложение 9] для бетона при $\sigma_{1,0} = 10, 15$ и 20 МПа, характеризуемого E_6 , равным $(1,46–1,96) \cdot 10^4$, $(1,64–2,14) \cdot 10^4$ и $(1,82–2,32) \cdot 10^4$ МПа. Здесь при увеличении $\sigma_{1,0}$ в два раза предельные значения E_6 увеличились на 18 %.

Следует отметить, что в соответствии с [12, с. 662] величины коэффициентов Пуассона составляют: $\mu = 0,24–0,28$ – для углеродистых сталей; $\mu = 0,25–0,30$ – для легированных

сталей. Тогда при $\mu = 0,33$ $\sigma_1 \approx 2\sigma_{2,3}$, а при $\mu = 0,25$ $\sigma_1 \approx 3\sigma_{2,3}$, что в 1,5 раза больше. Для бетона при $\mu = 0,2$ $\sigma_{1,6} \approx 4\sigma_{2,3,6}$, а при $\mu = 0,15$ $\sigma_{1,6} \approx 5,7\sigma_{2,3,6}$, что примерно в 1,4 раза больше.

Как указывается в [9, с. 14], логика подсказывает, что очень существенно влияние прочности стали на прочность трубобетонного элемента. Однако относительно прочности бетона известны разные мнения [13–15]. Так, формулы В. Ф. Маренина [13] основываются на предположении, что при сжатии труба не сопротивляется в осевом направлении, а несущая способность трубобетонного элемента определяется прочностью бетонного ядра. По мнению А. А. Долженко [14], в трубобетоне эффективнее применение низкомарочных бетонов. В [15] отмечается, что более эффективно использование высокомарочных бетонов и сталей низкой прочности. Что касается относительной толщины стенки δ/d , то здесь мнение едино [9, с. 14]: чем тоньше стенка трубы, тем эффективнее работа трубобетона. Вообще, следует отметить, что за последние примерно 100 лет проблеме прочности трубобетонных конструкций посвящено много работ, часть из которых (80) приведена в списке литературы монографии Л. К. Лукши [9].

Однако выдача евразийского патента автору данной статьи [10, 11] свидетельствует о том, что многие свойства трубобетонных конструкций еще изучены недостаточно, а преимущества применения различных сортов стали и бетона при использовании трубобетонных конструкций зависят от конкретных условий и экономической эффективности.

В качестве примера можно привести расчет величины превышения усадки бетонного цилиндра над стальной трубой. Воспользовавшись данными табл. 1, принимаем для самой тонкостенной трубы: $d_{\text{вн}} = 20,6$ см; $\delta = 0,25$ см; $\sigma_{1,0} = 15,1$ МПа; $E_6 = 2 \cdot 10^4$ МПа [12, с. 662]; $\mu = 0,17$ [12, с. 662]; $\sigma_T = 330$ МПа; $E_T = 2 \cdot 10^5$ МПа; $l = 8$ м. Тогда

$$\Delta l = 800 \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 10^4} \cdot \left(15,1 + \frac{1-0,17}{0,17} \cdot \frac{2 \cdot 0,25}{20,6} \cdot 330 \right) - \frac{330}{2 \cdot 10^5} \right] = 0,85 \text{ (см)}.$$

Таким образом, деформационный промежуток между воздействием нагрузки на бетонный стержень и одновременно на бетонный стержень и трубу составляет 8,5 мм.

Начальный боковой зазор между бетонным стержнем и внутренней поверхностью трубы

$$\Delta r = \frac{0,17}{1-0,17} \cdot 10,3 \cdot \frac{15,1}{2 \cdot 10^4} = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 0,013 \text{ мм},$$

что достаточно только для тонкого пленочного покрытия, при этом $\sigma_{2,3} = 8$ МПа.

Элементарный расчет возможных нагрузок для данной трубобетонной конструкции дает с учетом использования предлагаемого способа $N_{T,6}^p = 2320$ кН, что почти в 1,45 раза больше эксперимента (экспериментальная величина $N_{T,6}^p = 1600$ кН).

В случае применения существующей технологии одновременной нагрузки бетона и трубы (без использования $\sigma_{1,0}$) $N_{T,6}^p = 2320 - 520 = 1800$ кН, что только на 12 % больше полученного в эксперименте.

Для самой толстостенной трубы: $d_{\text{вн}} = 25,6$ см; $\delta = 0,92$ см; $\sigma_{1,0} = 16,1$ МПа; $E_6 = 2 \cdot 10^4$ МПа [12, с. 662]; $\mu = 0,17$ [12, с. 662]; $\sigma_T = 345$ МПа; $E_T = 2 \cdot 10^5$ МПа; $l = 8$ м. Тогда

$$\Delta l = 800 \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 10^4} \cdot \left(16,1 + \frac{1-0,17}{0,17} \cdot \frac{2 \cdot 0,92}{25,6} \cdot 345 \right) - \frac{345}{2 \cdot 10^5} \right] = 5,05 \text{ (см)}.$$

Таким образом, деформационный промежуток между воздействием нагрузки на бетонный стержень и одновременно на бетонный стержень и трубу составляет 50,5 мм, что почти в шесть раз больше, чем в предыдущем случае с тонкостенной трубой.

Начальный боковой зазор между бетонным стержнем и внутренней поверхностью трубы

$$\Delta r = \frac{0,17}{1-0,17} \cdot 12,8 \cdot \frac{16,1}{2 \cdot 10^4} = 1,89 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 0,019 \text{ (мм)},$$

что примерно в 1,5 раза больше по сравнению с предыдущим случаем, при этом $\sigma_{2,3} = 24,8$ МПа.

Элементарный расчет возможных нагрузок для толстостенной труботонной конструкции дает с учетом использования предлагаемого изобретения $N_{т.б}^p = 9400$ кН, что почти в 1,9 раза больше эксперимента (экспериментальная величина $N_{т.б}^э = 4900$ кН).

В случае применения существующей технологии одновременной нагрузки бетона и трубы (без использования $\sigma_{1,0}$), но с созданием возможности раздельной продольной деформации бетона и стали возможная расчетная нагрузка составляет $N_{т.б.1}^э = 8580$ кН, что в 1,75 раза превышает эксперимент.

Таким образом, в тонкостенных труботонных конструкциях при одновременном воздействии нагрузки на бетон и трубу труботонный эффект используется почти полностью, а в толстостенных трубах – только частично.

Относительно недавно была успешно защищена диссертация по труботону [16], где проанализирован существенный недостаток сталетруботонных элементов, обусловленный расслоением композитного сечения по границе двух материалов. Эффект расслоения может наблюдаться еще до нагружения элемента вследствие развития усадочных деформаций в бетоне, а также на стадии действия эксплуатационных нагрузок по причине положительной разницы между коэффициентами Пуассона стали и бетона. Это подтверждает полезность учета различий во всех деформациях бетона и оболочки при различиях в их деформационных и прочностных свойствах.

Для оценки возможностей ресурсосбережения при использовании труботонных конструкций в строительстве необходимо сравнить удельные стоимости бетона и стальных труб, цена которых около 600 у. е./т [17]. При массе 1 м³ стали около 7,8 т и расчетной (упругой) прочности на сжатие $\sigma_{ст} \approx 1600$ кгс/см² [12] удельная стоимость составляет примерно $\Pi_{у.ст} \approx 2,9 \cdot 10^{-4}$ у. е./(кгс/см²).

При удельных ценах разных марок бетона от 0,10 до 0,25 у. е./(кгс/см²) (рис. 2) удельная стоимость стальной трубы примерно на порядок больше, что обеспечивает относительную

дешевизну бетона по сравнению со стальной трубой при любых разумных колебаниях цен на рынке.

При использовании предела текучести стали на растяжение в качестве расчетной величины [16, табл. 1 и рис. 6] удельная цена может уменьшиться в 1,5–2,5 раза, но все равно будет больше удельной цены на бетон.

Поэтому при использовании труботона следует применять прочные бетоны и стальные трубы с минимальной толщиной стенки, выдерживающей внутренний распор бетона.

ВЫВОДЫ

1. Появление новых материалов, изделий и технологий требует оценки условий их безопасного, эффективного и ресурсосберегающего применения в строительной отрасли.

2. Предложены новые единицы измерения ресурсоемкости прочностных и других механических и физических свойств материалов и изделий.

3. При использовании бетона в несущих конструкциях зданий и сооружений необходимо оценивать ресурсоемкость его различных марок (классов).

4. В настоящее время при отсутствии особых условий для ресурсосбережения в несущих бетонных и железобетонных конструкциях целесообразно использовать высокопрочные бетоны.

5. В обычных условиях эксплуатации для труботонных конструкций следует использовать высокопрочный бетон и трубы с минимальной толщиной стенок, выдерживающих боковое давление деформирующегося бетона сердечника.

6. Для компенсации различия в деформационных характеристиках бетона и материала трубы необходимо использовать демпфирующие устройства, обеспечивающие их предельно допустимые нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большой строительный терминологический словарь-справочник: официальные и неофициальные термины и определения в строительстве, архитектуре, градостроительстве и строительной технике / В. Д. Наумов [и др.]; под ред. Ю. В. Феофилова. Минск: Минсктип-проект, 2008. 811 с.

2. Цементы. Общие технические условия: ГОСТ 30515–2013. Введ. 01.08.2016. Минск: Госстандарт, 2016. 43 с.
3. Цементы общестроительные. Технические условия: ГОСТ 31108–2003. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстрой-архитектуры, 2005. 14 с.
4. Цены на бетон в Минске [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://betonminsk.by/prodazha-betona/cena>. Дата доступа: 13.12.2016.
5. Марки и характеристики бетона [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.betontrans.by/produkcija/marki-i-harakteristiki-betona>. Дата доступа: 13.12.2016.
6. Стоимость бетона за куб [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://atlantbeton.ru/price>. Дата доступа: 12.12.2016.
7. Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения / С. Н. Леонович. Минск: Тыздзень, 1999. 263 с.
8. Sewell, J. S. Columns for Buildings / J. S. Sewell // *Engineering News*. 1902. Vol. 48, No 17. P. 10–17.
9. Лукша, Л. К. Прочность трубобетона / Л. К. Лукша. Минск: Вышэйш. шк., 1977. 95 с.
10. Способ повышения прочности трубобетонной конструкции: Евразийский пат. № 017610 / С. Н. Осипов. Опубл. 30.01.2013.
11. Осипов, С. Н. Повышение прочности трубобетонной конструкции за счет полного использования «эффекта обоймы» / С. Н. Осипов // *Тандем: цемент & строительство*. 2015. Т. 11, № 3. С. 48–50.
12. Писаренко, Г. С. Сопротивление материалов: учеб. для машиностроит. специальностей вузов / под ред. Г. С. Писаренко. Киев: Вища шк., 1973. 671 с.
13. Маренин, В. Ф. Исследование прочности стальных труб, заполненных бетоном при осевом сжатии / В. Ф. Маренин. М.: Моск. ордена Трудового Красного Знамени инж.-строит. ин-т имени В. В. Куйбышева, 1959. 15 с.
14. Долженко, А. А. Исследование сопротивления трубобетона осевому сжатию / А. А. Долженко // *Сб. тр. Воронежского ИСИ. Вып. 1: Теория сооружений и конструкций*. 1964. № 10. С. 31–40.
15. Ситников, Ю. В. Исследование железобетонных элементов со стальной обоймой для несущих конструкций промышленных зданий / Ю. В. Ситников. Воронеж: Воронежский инж.-строит. ин-т, 1970. 32 с.
16. Бондаренко, В. М. Сопротивление осевому сжатию сталетрубобетонных элементов круглого сечения с ядром из напрягающего бетона / В. М. Бондаренко. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2010. 19 с.
17. Труба круглая [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.stalnoy.by/truba-kruglaja>. Дата доступа: 13.12.2016.
- Official and Unofficial Terms and Definitions in Construction, Architecture, Urban Planning and Construction Machinery*. Minsk: Minsktipproyekt Publ. 811 (in Russian).
2. State Standard 30515–2013. *Cement. General Technical Specifications*. Minsk, State Standard Publishing House, 2016. 43 (in Russian).
3. State Standard 31108–2003. *Standard Cement. Technical Specifications*. Minsk, Minstroyarkhitektura Publishing House, 2005. 14 (In Russian).
4. *Concrete Cost in Minsk*. Available at: <http://betonminsk.by/prodazha-betona/cena>. (Date Access 13 December 2016) (in Russian).
5. *Concrete Grades and Characteristics*. Available at: <http://www.betontrans.by/produkcija/marki-i-harakteristiki-betona>. (Date Access 13 December 2016) (in Russian).
6. *Concrete Cost Per Cube*. Available at: <http://atlantbeton.ru/price>. (Date Access 12 December 2016) (in Russian).
7. Leonovich S. N. (1999) *Crack Resistance and Longevity of Concrete and Reinforced Concrete Elements in Terms of Force and Energy Criteria of Fracture Mechanics*. Minsk, Board of “Tydzen”. 263 (in Russian).
8. Sewell J. S. (1902) Columns for Buildings. *Engineering News*, 48 (17), 10–17.
9. Louksha L. K. (1977) *Strength of Tube Confined Concrete*. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 95 (in Russian).
10. Osipov S. N. (2013) *Method for Improvement of Strength in Tube Confined Concrete Structure*. Eurasian Patent No 017610 (in Russian).
11. Osipov S. N. (2015) Improvement of Strength in Tube Confined Concrete Structure Due to Complete Usage of Casing Effect. *Tandem: Tsement i Stroitelstvo = Tandem: Cement & Construction*, 11 (3), 48–50 (in Russian).
12. Pisarenko G. S. (ed.) (1973) *Material Resistance*. Kiev, Visha Shkola Publ. 671 (in Russian).
13. Marenin V. F. (1959) *Research on Strength of Steel Pipes Filled with Concrete while Using Centric Compression*. Moscow, Moscow Civil Engineering Institute of the Order of the Red Banner of Labour named after V. V. Kuibyshev. 15 (in Russian).
14. Dolzhenko A. A. (1964) Research on Resistance of Tube Confined Concrete to Centric Compression. *Sbornik Trudov Voronezhskogo Inzhenerno-Stroitel'nogo Instituta, Vyp. 1: Teoriya Sooruzhenii i Konstruktsii* [Collected Papers of Voronezh Construction Engineering Institute. Issue 1: Theory of Buildings and Structures], (10), 31–40 (in Russian).
15. Sitnikov Yu. V. (1970) *Research on Reinforced Concrete Elements with Steel Casing for Bearing Structures of Industrial Buildings*. Voronezh, Voronezh Construction Engineering Institute. 32 (in Russian).
16. Bondarenko V. M. (2010) *Resistance of Steel Tube Confined Concrete Elements of Round Section with Self-Stressing Concrete Core to Centric Compression*. Minsk, Belarusian National Technical University. 19 (in Russian).
17. *Circular Pipe*. Available at: <http://www.stalnoy.by/truba-kruglaja>. (Date Access 13 December 2016) (in Russian).

Поступила 12.01.2017

Подписана в печать 15.03.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Naumov V. D., Alyavdina T. I., Bedula N. V., Zholud' A. S., Zholud' T. V., Poslova T. G., Feofilova Yu. Yu., Frolova T. S. (compilers), Feofilov Yu. V. (ed.) (2008) *Large Dictionary Reference Book of Construction Terminology*:

Received: 12.01.2017

Accepted: 15.03.2017

Published online: 30.03.2018

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-123-129

UDC 711.4

Detection of Reflexive Signs in Town Planning Systems of Ukraine and Republic of Belarus

V. A. Smilka¹⁾¹⁾Department of Planning and Architecture of Kyiv City State Administration (Kyiv, Ukraine)© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Abstract. As a city is a complex system, it complies with the principles pertaining to organization and management of systems. System analysis makes it possible to figure out the difference between managing systems (subject) from systems that are managed (object). There is a link between these system formations which unites them in a common system. Such relationship is a source of information for development of management action. Impact on the system is achieved through availability of influential means and data. Urban planning science represents a city as a complex of socio-economic, territorial-productive and demographic-ecological systems of the following type: “population” – “environment” – “activity”. “Environment” is thought of as a technical system with such synonyme notions as “urban planning system”, “anthropogenic environment”, “settlement system”. “Environment” has two components – territory and buildings. Ukrainian legislation determines that management of urban planning activities is carried out through developing urban planning documentation and carrying out urban planning monitoring. Results of the urban planning monitoring are taken into account while preparing urban planning documentation (introduction of amendments to it) and programs of socio-economic development. Thus, urban planning monitoring represents a management system of urban planning activity in the Ukraine. Legislation of the Republic of Belarus contains some provisions which regulate urban planning activity through urban development planning and zoning of territories; creation and maintenance of urban planning cadastre; control over development and implementation of urban planning, architectural and construction projects; implementation of state construction supervision. Data of the urban planning cadastre are taken into account in urban planning documentation. In comparison with the Ukraine management of the urban planning system in the Republic of Belarus is attached to the urban planning cadastre. The urban planning systems of the Ukraine and the Republic of Belarus are self-managed reflexive systems that organize their behavior with due account of not only the past experience but also due to possible impact of other system which is in interaction with it.

Keywords: city, system, monitoring, cadastre, urban planning documentation, environment, population, impact, structure, sign, essence

For citation: Smilka V. A. (2018) Detection of Reflexive Signs in Town Planning Systems of Ukraine and Republic of Belarus // *Science and Technique*. 17 (2), 123–129. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-123-129

Выявление рефлексивных признаков градостроительных систем Украины и Республики Беларусь

Канд. техн. наук В. А. Смилка¹⁾¹⁾Департамент градостроительства и архитектуры Киевской городской государственной администрации (Киев, Украина)

Реферат. Поскольку город является сложной системой, он подчиняется принципам организации и управления системами. Системный анализ отличает управляющие системы (субъект) от систем, которые управляются (объект). Между этими системными образованиями существует связь, объединяющая их в общую систему. Такая связь является источником информации для выработки управляющего воздействия. Влияние на систему достигается благодаря нали-

Адрес для переписки

Смилка Владислав Анатольевич
Департамент градостроительства и архитектуры
Киевской городской государственной администрации
ул. Крещатик, 32,
01001, г. Киев, Украина
Тел.: +380 44 234-80-04
vlsmilka@gmail.com

Address for correspondence

Smilka Vladyslav A.
Department of Planning and Architecture
of Kyiv City State Administration
32 Khreshchatyk str.,
01001, Kyiv, Ukraine
Tel.: +380 44 234-80-04
vlsmilka@gmail.com

чию средств воздействия и имеющейся информации. Градостроительная наука представляет город в виде совокупности социально-экономической, территориально-производственной и демографо-экологической систем вида население – среда – деятельность. Среда понимается как техническая система с синонимичными понятиями: «градостроительная система», «антропогенная среда», «система расселения». Среда имеет две составляющие – территорию и дома. Законодательством Украины определено, что управление градостроительной деятельностью осуществляется путем разработки градостроительной документации и проведения градостроительного мониторинга. Результаты градостроительного мониторинга учитываются при разработке градостроительной документации (внесении изменений в нее) и программ социально-экономического развития. Таким образом, градостроительный мониторинг представляет собой систему управления градостроительной деятельностью Украины. Законодательство Республики Беларусь включает положения о регулировании градостроительной деятельности путем: градостроительного планирования и зонирования территорий; создания и ведения градостроительного кадастра; контроля над разработкой и реализацией градостроительных, архитектурных и строительных проектов; осуществления государственного строительного надзора. Сведения из градостроительного кадастра учитываются в градостроительной документации. В Республике Беларусь управление градостроительной системой возложено на градостроительный кадастр. Градостроительные системы Украины и Беларуси являются самоуправляемыми рефлексивными системами, организующими свое поведение с учетом не только прошлого опыта, но и возможного воздействия другой системы, с которой они взаимодействуют.

Ключевые слова: город, система, мониторинг, кадастр, градостроительная документация, среда, население, воздействие, структура, признак, сущность

Для цитирования: Смилка, В. А. Выявление рефлексивных признаков градостроительных систем Украины и Республики Беларусь / В. А. Смилка // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 123–129. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-123-129

Introduction

The specifics of urban planning development of Ukraine and the Republic of Belarus is the fact that the formation of a network of settlements, that took place during the thousand-year history is almost completed. The main task of town planning is organizing the urban environment [1]. Efficient management of urban development process requires permanent control and making reasonable decisions aimed at sustainable development of the territory [2]. The city is a complex system with an extensive network of different functional processes governing bodies [3]. Town Planning activity is characterized by a specific management organization of urban areas and it requires constant improvement of self-management functionality. It is necessary to explore the city in terms of system analysis [4]. Information research support of urban development activities are found in the works of M. M. Habrel [5], N. M. Demin [4, 6], G. I. Lavrik [7], A. A. Lyashchenko [8], A. P. Ositnyanko [9], Y. N. Palekh [10], A. I. Syngaevskaya [1, 6, 11], Y. N. Trukhachov [12], V. D. Shipulin [13], Z. N. Yargina [14] and others. The issue of supervision in town planning and architectural activity was studied by scientists O. M. Gorban [15], E. Y. Hnatchenko [16], M. V. Gubina [17, 18], L. P. Panova [19, 20], S. A. Shubovych [20], K. A. Soroka [21].

Theory of systems

The city as a complex system, is subject to the principles of system organization and management.

“Administration” in the wide sense of the word refers to “the element, the function of organized systems of different nature (biological, social, technological), which ensures maintenance of their certain structure, support of their activity mode, implementation of their programs and objectives” [22]. Based on this definition, in the organizations of various levels can be identified managing (the subject) and managed (object) part, as well as the links between them, which in general are often called the “management system”. The management object is nothing but a system that performs the role function of the organization, whereas the subject of management supports the outputs of the system at a level that meets the specified criteria. Relationship in the management system is something, that unites management subject and object in a single unit. It should be seen as a source of information for the development of management effect. Through the channels of communication flows the information, including all subsystems of the organization and ensuring the achievement of its objectives [21].

The city has a hierarchical management structure: in addition to regional and city centre it includes district executive centers, interconnected.

According to behavior principle the systems are allocated to: material, homeostatic, deciding (not forecasting), predictive, reflexive [19, 21].

The material – a simple system whose behavior is caused only by the laws of physics, laws of conservation of energy, mass, continuity equation etc.

Homeostatic is called the behavior of dynamic systems, in which it remains constant composition and properties of the internal environment, the stability of the main system functions. In other words, the behavior is aimed at maintaining the stability of its composition and functional properties, the ability of the system to return to equilibrium. This principle of behavior is typical behavior of wildlife and most artificial systems that are in a state of dynamic equilibrium.

Crucial behavior of systems is not only limited to maintaining a balance in the system, but also the opportunity to choose one of several alternatives of their work or behavior. Those are the systems such as, for example, various automated devices or processes which take one of the possible states of operation or perform action of a certain set of options depending on conditions.

Predictive system is able to organize its behavior on the basis of past experience on the assumption, that future development does not significantly differ from the past. Such systems have sufficient memory and ability to predict the course of events for a certain period of time in the future based on interpolation and make decisions based on the results of the prediction.

Reflective system organizes its behavior based not only on past experience, but also the possible actions of other systems with which it interacts, that is behavior of systems endowed with intelligence, the ability to anticipate the actions of other systems.

According to the way of management the systems are divided into those managed externally, self-managed and the systems of combined management [19, 21]. At the second classification level the systems are divided depending on – how they are managed. For all systems – subclasses of the second level have certain common features.

The difficult according to the organization are systems with management by parameters – these are systems where the feedback is not only carried by the initial value, but also the change of the system parameters is possible. Examples of such systems are adaptive automated control systems, work of architects and designers on various function design objects.

The most difficult according to the management are systems, where management is implemented by changing the structure of the system. These systems work in extremely difficult conditions and changes in the structure of the system allows them to adapt to new conditions. Such systems include state and public administration in which organizational changes occur during development [23–26].

Certainly the city is a system of reflective principle, managed from the outside with the possibility of changing the structure of the system [27].

The city as a system

Let's look at the essence of the city. At the present stage of human civilization – the primary object of town planning development “is an artificial ecological system of the population – demographic ecological system and architectural theory and practice – are essential activities to create a harmonious (holistic) artificial environment for the processes of human activity” [3, 7, 12].

The basic structure of demographic ecological system is represented in the work of N. M. Demin, as a link between the ENVIRONMENT – POPULATION [4]. “Environment” as a natural formation in which the livelihoods of people, makes an an impact on “population” with their factors and thus there is a need for activities to create an artificial environment as a means to protect people from the adverse effects of the surrounding environment [3, 6]. Therefore N. M. Demin suggests to consider the city as a set of socio economic, territorial productive, demographic ecological system of POPULATION – ENVIRONMENT – ACTIVITIES [4].

In scientific studies of O. I. Syngaevskaya, ENVIRONMENT is understood as technical system with synonymous concepts of “town planning system”, “anthropogenic environment”, “settlement system”. ENVIRONMENT as subsystem has two components “buildings and structures” and “territory” [1, 4, 6].

So, let's take town planning system as organized set of territories with houses and buildings.

The system of city management cannot and should not cover all city entities, such as socio economic, territorial productive, demographic ecological system, with parameters control of all subsystems of the city. In this case we would need to create a system several orders more complex than the city itself. By its characteristic the system of

city management is distributed and not concentrated in one place [1, 4, 12].

This study is limited by town planning activity management through town planning system.

Analysis of town planning legislation

Let's look at the legal principles of town planning management and organization systems in Ukraine and the Republic of Belarus.

According to article [7] of the Law of Ukraine "On regulation of urban development activities" management in urban planning activities and architectural – construction control is carried out by: territorial planning at national, regional and local levels; monitoring of the designing and implementation of urban planning at all levels; determining state interests, for their consideration during the development of town planning documentation. Article [25] of the mentioned Law stipulates that the results of urban monitoring are constantly included to the urban cadastre and are issued in the form of an analytical report, which is taken into account in the development of socio economic development programs and in making changes to town planning documentation.

According to article [15] of the Law of Ukraine "On the fundamentals of urban development" the core competencies of local administrations in the field of urban development also include decision making regarding: planning areas at the appropriate level; prepare proposals for socio-economic development of the territory; monitoring of construction and other use of areas.

Thus, town planning monitoring system is a technical system of urban planning management system that has a set of tools to collect information about the controlled object and means of influencing its behavior, intended to ensure sustainable development of the territory [28–30]. The means of collecting information about the city is monitoring, verification, communication with town-planning cadastre. Means of influence on the behavior of urban planning systems are crucial for the area planning, since urban monitoring results are taken into account in town planning documentation development (making changes into it) and social economic development [10, 31].

In accordance with article [14] of the Law of the Republic of Belarus "On architectural, town-planning and building activities in the Republic of Belarus", the major areas of State regulation in the field of architecture, urban planning and construction activities, include: urban planning and zoning;

creation and maintenance of urban cadastre; monitoring of the development and implementation of urban, architectural and construction projects; state construction supervision.

According to article [28] of the Law of the Republic of Belarus town planning cadastre performs registration function in relation to the town planning documentation of general and detailed planning, town planning development regulations and the use of the territories of other elements, that are not included in the other cadastral and registration state systems. The information contained in the urban planning cadaster is used to ensure: development and implementation of state policy in the field of architecture, urban planning and construction activities; reasoning and decision-making on sustainable modes of functional use of territories; development of urban planning documentation, documentation development; forecasts and programs for social economic development of the territory; another activity that requires accurate data about the territory.

Maintenance of urban monitoring in the Republic of Belarus is governed by article [31]. Urban monitoring – is a monitoring system of town planning objects and environment in order to control the use of town planning territories and forecasting results of urban development projects. Town planning monitoring database are urban cadaster, statistical information, reports, special studies. The results of town planning monitoring shall be listed in town planning cadastre.

As compared to Ukraine in the Republic of Belarus technical urban planning management system is town planning cadastre.

Town Planning system, as has been defined, is interacting with social economic, territorial productive, demographic ecological systems, so it adjusts its behavior considering the status of other systems. The necessity to correct the behavior of town planning system in Ukraine is signaled by – urban monitoring. And in the Republic of Belarus – it is town planning cadaster, through the relationship with the town planning monitoring – it monitors, analyzes the implementation of planning documentation, assessment and forecast of objects state and change [32, 33].

Decision making in the city is made based on legislation, economical, social, political and environmental factors [1, 6, 8, 12, 34]. Below is presented a simple control scheme of town planning system based on town planning monitoring (fig. 1).

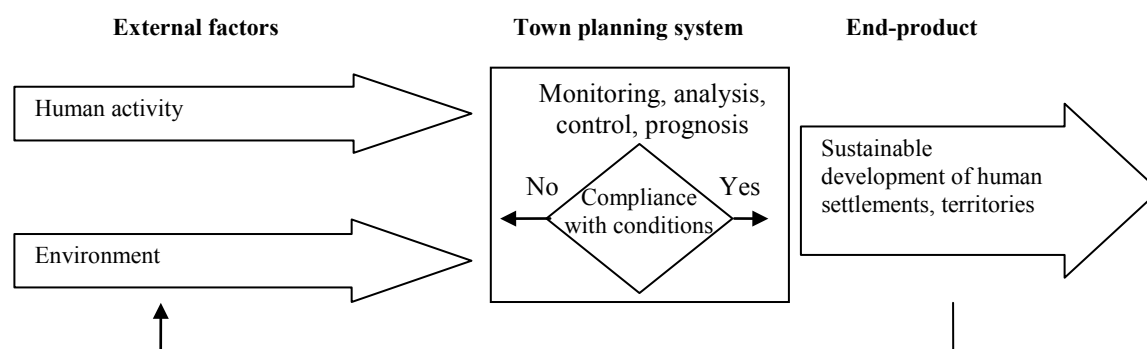


Fig. 1. Scheme of town planning management system

CONCLUSIONS

1. The decision making essences distinguished in town planning development are: managing system – local authorities, managed system – town planning system (a set of houses and buildings). Relations between the systems as a source of managing action is nothing more than a system of urban monitoring and cadastre.

2. In making urban planning decisions, such as approval of allocation/granting/sale of land for urban needs with a specific purpose; compliance of building intentions with the approved town planning documentation; the possibility of issuing initial data for the designing; the possibility of issuing building permits; approval of project documentation; the commissioning of the property; mailing address assignment to completed construction, etc. All the results of cases are submitted to the urban cadastre and are analyzed by monitoring system. The result of the monitoring analysis is information: about the critical deviation from the norm – town planning documentation, generalized and processed data of other urban systems, forecasts of further development of the territory based on mathematical models. Proposals and detected options of critical errors in the system may also be proceeded.

3. The decisions on urban system management are made based on the monitoring results, provided by the local administration [1, 12, 35]. For example, to urgently develop planning documentation, to build a new school to reconstruct the traffic intersection and etc. Thus appears system reflexive sign.

REFERENCES

1. Syngaevskaya A. I. (2013) *Information Support of Processes for Control of Urban System Development*. Kyiv, Kyiv National University of Construction and Architecture. 32 (in Russian).
2. Smilka V. A. (2014) Problems in Monitoring of Urban Planning in the Ukraine. *Arkhitektura, Gradostroitel'stvo, Istoriko-Kul'turnaya i Ekologicheskaya Sreda Gorodov Tsentral'noi Rossii, Ukrainy i Belorussii: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Architecture, Urban Planning, Historical, Cultural and Ecological Environment of Cities in Central Russia, Ukraine and Belarus: Proceedings of International Scientific-Practical Conference]. Bryansk, Bryansk State Engineering-Technological Academy, 40–43 (in Russian).
3. Yelokhov A. M. (2011) City as Subject of Management. *Vestnik Permskogo Un-ta. Ser. "Ekonomika"* = *Perm University Herald. Economy*, 3 (10), 78–86 (in Russian).
4. Demin N. M. (1991) *Management of Urban Planning System Development*. Kiev, Budivelnik Publ. 184 (in Russian).
5. Habrel M. M. (2004) *Spatial Organization of Urban Planning Systems*. Kyiv, Publishing House A.C.C. 400 (in Ukrainian).
6. Demin N. M., Syngaevskaya A. I. (2015) *Urban Planning Information Systems. Urban Planning Cadastre. Initial Structure Elements of Urban and Spatial Planning Objects*. Kyiv, Fenix Publ. 216 (in Russian).
7. Lavrik G. I. (1979) *Methodological Problems in Study of Architectural Systems*. Kiev, Kiev Engineering Construction Institute. 30 (in Russian).
8. Lyashchenko A. A. (2004) *Methodological Principles and Information Technology Models for Infrastructure of Geospatial Data of Urban Cadastral Systems*. Kyiv, Kyiv National University of Construction and Architecture. 36 (in Ukrainian).
9. Ositnyanko A. P. (2001) *Planning of City Development*. Kyiv, Kyiv National University of Construction and Architecture. 458 (in Ukrainian).
10. Palekha Yu. M., Nechaeva T. S., Smilka V. A. (2012) Urban Planning Cadastre – Information Basis for Updating Planning Urban Planning Documentation in Kyiv. *Experience and Prospects for Cities Development in Ukraine. Problems in Prospective Development of Kyiv*. Kyiv, State Enterprise Y. Bilokon Ukrainian State Scientific-Research Institute of Urban Design "DIPROMISTO", Is. 23, 39–50 (in Russian).
11. Syngaevskaya A. I. (2009) Phenomena and Objects of Application Domain in Urban Planning Activity. *Gradostroitel'noe i Territorial'noe Planirovanie* [Urban and Spatial Planning]. Kyiv, Kyiv National University of Construction and Architecture, Is. 32, 22–37 (in Ukrainian).

12. Trukhachov Yu. N. (2006) *General Theory on Urban Planning Systems (Methodological Conception)*. Rostov-on-Don, Rostov State Academy of Architecture and Art. 120 (in Russian).
13. Shipulin V. D. (2010) *Basic Principles of Geographic Information Systems*. Kharkiv, Kharkiv National Academy of Municipal Economy. 313 (in Russian).
14. Yargina Z. N., Kositskii Ya. V., Vladimirov V. V., Gutnov A. E., Mikulina E. M., Sosnovskii V. A. (1986) *Fundamentals of Urban Planning Theory*. Moscow, Stroyizdat Publ. 325 (in Russian).
15. Gorban O. M., Bakhroushin V. E. (2004) *Fundamentals of System Theory and System Analysis*. Zaporizhzhia, Humanitarian University "Zaporizhzhia Institute of Public and Municipal Administration". 204 (in Ukrainian).
16. Hnatchenko E. Yu. (2013) *Summary of lectures "Urban Planning Monitoring"*. Kharkiv, Kharkiv National University of Urban Economy. 68 (in Ukrainian).
17. Gubina M. V. (2009) *Urban Planning Monitoring and Basic Design Principles*. Kharkiv, Kharkiv National Academy of Municipal Economy. 61 (in Ukrainian).
18. Gubina M. V. (2002) *Fundamentals of Urban Planning Management and Monitoring*. Kyiv, "VIRA-R" Publishing House, 248 (in Russian).
19. Panova L. P. (2010) *Systematicity of Architecture Environment*. Kharkiv, Kharkiv National Academy of Municipal Economy. 235 (in Russian).
20. Shoubovich S. A., Solov'eva O. S., Panova L. P. (2009) *Introduction to Architectural Monitoring of Urban Environment*. Kharkiv, Kharkiv National University of Urban Economy. 67 (in Russian).
21. Soroka K. O. (2004) *Fundamentals of System Theory and System Analysis*. Kharkiv, Kharkiv National Academy of Municipal Economy. 291 (in Ukrainian).
22. Ado A. V., Aleksandrovskaya N. D., Andreev I. I., Andreev E. M., Anikeev N. P., Frolov I. T. (ed.) (1991) *Philosophical Dictionary*. Moscow, Politizdat Publ. 560 (in Russian).
23. Ye Y., Van Nes A. (2014) Quantitative Tools and Urban Morphology: Combining Space Syntax, Spacematrix and Mixed-Use Index in GIS Framework. *Urban Morphology*, 18 (2), 97–118.
24. Maguire D. J., Goodchild M. F., Batty M. (2005) *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*. US: ESRI Press. 504.
25. Golovin A. V. (2013) Modeling for Decision Making in Urban Planning Design Using Municipal Network of Educational Institutions as an Example. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Politehnicheskogo Issledovatel'skogo Universiteta. Urbanistika = PNRPU Bulletin. Urban Development*, 2 (10), 6–31 (in Russian).
26. Zav'yalov A. Yu., Maksimova S. V., Mel'tsova E. S., Lorens P. Z. (2015) Information Analytical System for Comprehensive Urban Analysis. *Architecture and Modern Information Technologies (AMIT)*, 2 (31). Available at: <http://elima.ru/articles/index.php?id=92>.
27. Forrester J. (1969) *Urban Dynamics*. Cambridge, MIT Press. 285.
28. Parrinello S., Maksimova S. V., Sosnovskikh L. V. (2015) *Modern Methods for Architectural Survey of Urban Environment*. Perm, Perm National Research Polytechnic University. 121 (in Russian).
29. Smilka V. A. (2015) Application of Geoinformation Technologies for Execution of Urban Planning Monitoring. *Information Technologies in Education, Science and Industry: III International Scientific and Technical Internet-Conference, November 20–21, 2015. Section 2*. Available at: <http://rep.bntu.by/handle/data/21915> (in Russian).
30. Bushmakova Yu. V., Gud'z' T. V., Lyubimov A. V., Maksimova S. V. (2014) Monitoring of Urban Planning Solutions on the Basis of Open Sources while Using Geoinformation Technologies. *Stroitel'stvo i Arkhitektura. Opyt i Sovremennye Tekhnologii [Construction and Architecture. Experience and Modern Technologies]*, Is. 3. Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/1kvart15/bushmakova/abstract.php> (in Russian).
31. Zav'yalov A. Yu., Maksimova S. V., Shul'ts D. N., Mikushin P. S., Lorens P. Z. (2013) Integrated Model for Spatial Development as Basis of System for Decision-Making Support in the Field of Spatial Planning. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Politehnicheskogo Issledovatel'skogo Universiteta. Urbanistika = PNRPU Bulletin. Urban Development*, 4 (12), 10–20 (in Russian).
32. Kostikova G. D., Zemlyakov G. V. (2016) The Evaluation System of Design Solutions for Residential Property on the Pre-Investment Stage Through Neural Network Technology. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (6), 481–492 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-6-481-492.
33. Zemlyakov G. V., Kostikova G. D. (2012) System Integrator Characteristics for Qualitative Evaluation of Design Solutions Pertaining to Residential Real Estate in the Republic of Belarus. *Voprosy Vnedreniya Norm Proektirovaniya i Standartov Evropeiskogo Soyuza v Oblasti Stroitel'stva: Materialy Nauch.-Metod. Seminara, Minsk, 29 maya 2012 g. Ch. 1*. [Pertaining to Introduction of Design Standards and European Union Standards in the Field of Construction: Proceedings of Scientific-Methodological Seminar, Minsk, May 29, 2012. Part 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 231–240 (in Russian).
34. Moiseev Yu. M. (2012) Urban Planning Facing New Challenges. *Architecture and Modern Information Technologies (AMIT)*, 21 (4). Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2012/4kvart12/moiseev/abstract.php> (in Russian).
35. Sterman J. (2000) *Business Dynamics: Systems Thinking and Modelling for a Complex World*. Boston, McGraw-Hill. 982.

Received: 28.02.2017

Accepted: 10.05.2017

Published online: 30.03.2018

ЛИТЕРАТУРА

1. Сынгаевская, А. И. Информационное обеспечение процессов управления развитием градостроительных систем / А. И. Сынгаевская. Киев: КНУСА, 2013. 32 с.
2. Смилка, В. А. Проблемы ведения градостроительного мониторинга в Украине / В. А. Смилка // Архитектура, градостроительство, историко-культурная и экологическая среда городов центральной России, Украины и Белоруссии: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Брянск: Брянская гос. инж.-техн. академия, 2014. С. 40–43.
3. Елохов, А. М. Город как объект управления / А. М. Елохов // Вестник Пермского ун-та. Сер. Экономика. 2011. Вып. 3, № 10. С. 78–86.
4. Демин, Н. М. Управление развитием градостроительных систем / Н. М. Демин. Киев: Будівельник, 1991. 184 с.

5. Габрель, М. М. Просторова організація містобудівних систем / М. М. Габрель. Київ: Видавничий дім А.С.С., 2004. 400 с.
6. Демин, Н. М. Градостроительные информационные системы. Градостроительный кадастр. Первичные элементы структуры объектов градостроительства и территориального планирования / Н. М. Демин, А. И. Сынгаевская. Київ: Фенікс, 2015. 216 с.
7. Лаврик, Г. И. Методологические проблемы исследования архитектурных систем / Г. И. Лаврик. Киев: КИСИ, 1979. 30 с.
8. Лященко, А. А. Методологічні основи та інформаційно-технологічні моделі інфраструктури геопросторових даних міських кадастрових систем / А. А. Лященко. Київ: КНУСА, 2004. 36 с.
9. Оситнянко, А. П. Планування розвитку міста / А. П. Оситнянко. Киев: КНУБА, 2001. 458 с.
10. Палеха, Ю. Н. Градостроительный кадастр – информационная основа обновления градостроительной документации в г. Киеве / Ю. Н. Палеха, Т. С. Нечаева, В. А. Смилка // Опыт и перспективы развития городов Украины. Проблемы перспективного развития города Киева. Киев: Діпромісто, 2012. Вип. 23. С. 39–50.
11. Сингаївська, О. І. Явища і об'єкти предметної області містобудівної діяльності // Містобудування та територіальне планування. Киев: КНУБА, 2009. Вип. 32. С. 22–37.
12. Трухачев, Ю. Н. Общая теория градостроительных систем (методологическая концепция) / Ю. Н. Трухачев. Ростов на-Д.: Ростовская гос. академия архит. и искусства, 2006. 120 с.
13. Шипулин, В. Д. Основные принципы геоинформационных систем / В. Д. Шипулин. Харьков: Харьк. нац. акад. город. хоз-ва, 2010. 313 с.
14. Основы теории градостроительства / З. Н. Яргина [и др.]; под ред. З. Н. Яргиной. М.: Стройиздат, 1986. 325 с.
15. Горбань, О. М. Основи теорії систем і системного аналізу / О. М. Горбань, В. Є. Бахрушин. Запоріжжя: ГУ ЗІДМУ, 2004. 204 с.
16. Гнатченко Є. Ю. Конспект лекцій з дисципліни «Міський моніторинг» / Є. Ю. Гнатченко. Харків: ХНУМГ, 2013. 68 с.
17. Губіна, М. В. Міський моніторинг і основи проектної справи / М. В. Губіна. Харків: ХНАМГ, 2009. 61 с.
18. Губіна, М. В. Основы градостроительного менеджмента и мониторинга / М. В. Губіна. Киев: ВИРА-Р, 2002. 248 с.
19. Панова, Л. П. Системность архитектурной среды / Л. П. Панова. Харьков: Харьк. нац. акад. город. хоз-ва, 2010. 235 с.
20. Шубович, С. А. Введение в архитектурный мониторинг городской среды / С. А. Шубович, О. С. Соловьева, Л. П. Панова. Харьков: ХНУГХ, 2009. 67 с.
21. Сорока, К. О. Основи теорії систем і системного аналізу / К. О. Сорока. Харків: ХНАМГ, 2004. 291 с.
22. Философский словарь / под ред. И. Т. Фролова. М.: Политиздат, 1991. 560 с.
23. Ye, Y. Quantitative Tools and Urban Morphology: Combining Space Syntax, Spacematrix and Mixed-Use Index in GIS Framework / Y. Ye, A. Van Nes // Urban Morphology. 2014. Vol. 18, No 2. P. 97–118.
24. Maguire, D. J. GIS, Spatial Analysis, and Modeling / J. D. Maguire, M. F. Goodchild, M. Batty. US: ESRI Press, 2005. 504 p.
25. Головин, А. В. Моделирование для принятия решений при градостроительном проектировании на примере сети муниципальных образовательных учреждений / А. В. Головин // Вестник Пермского национального политехнического исследовательского университета. Урбанистика. 2013. Т. 2, № 10. С. 6–31.
26. Информационно-аналитическая система для комплексного градостроительного анализа [Электронный ресурс] / А. Ю. Завьялов [и др.] // Архитектура и современные информационные технологии. 2015. Т. 2, № 31. Режим доступа: <http://elima.ru/articles/index.php?id=92>.
27. Форрестер, Дж. Динамика развития города / Дж. Форрестер; пер. с англ. М. Г. Орловой; под ред. Ю. П. Иванилова, А. П. Иванова, Р. Е. Оганова. М.: Прогресс, 1974. 287 с.
28. Парринелло, С. Современные методы архитектурного обследования городской среды / С. Парринелло, С. В. Максимова, Л. В. Сосновских. Пермь: Перм. нац. исслед. политех. ун-т, 2015. 121 с.
29. Смилка, В. А. Применение геоинформационных технологий при проведении градостроительного мониторинга [Электронный ресурс] / В. А. Смилка // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: III Междунар. науч.-техн. интернет-конф., 20–21 нояб. 2015 г. Секция 2. Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/21915>.
30. Мониторинг градостроительных решений на основании открытых источников с использованием геоинформационных технологий [Электронный ресурс] / Ю. В. Бушмакова [и др.] // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии 2014. Вып. 3. Режим доступа: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/1kvart15/bushmakova/abstract.php>.
31. Комплексная модель пространственного развития как основа системы поддержки принятия решений в области территориального планирования / А. Ю. Завьялов [и др.] // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. 2013. Т. 4, № 12. С. 10–20.
32. Костикова, Г. Д. Система оценки проектных решений объектов жилой недвижимости на предынвестиционной стадии с применением технологии нейронных сетей / Г. Д. Костикова, Г. В. Земляков // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 6. С. 481–492. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-6-481-492.
33. Земляков, Г. В. Системотехническая характеристика оценки качества проектных решений объектов жилой недвижимости в Республике Беларусь / Г. В. Земляков, Г. Д. Костикова // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: материалы науч.-метод. семинара, Минск, 29 мая 2012 г. Минск: БНТУ, 2012. Ч. 1. С. 231–240.
34. Моисеев, Ю. М. Градостроительное планирование перед лицом новых вызовов [Электронный ресурс] / Ю. М. Моисеев // Архитектура и современные информационные технологии. 2012. Т. 21, № 4. Режим доступа: <http://www.marhi.ru/AMIT/2012/4kvart12/moiseev/abstract.php>.
35. Sterman, J. Business Dynamics: Systems Thinking and Modelling for a Complex World / J. Sterman. Boston: McGraw-Hill, 2000. 982 p.

Поступила 28.02.2017

Подписана в печать 10.05.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

Стейкхолдерно-интегрированный подход к оценке уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов

Докт. экон. наук, проф. К. А. Мамонов¹⁾, канд. техн. наук С. Г. Нестеренко¹⁾,
Э. С. Штерндок¹⁾, М. А. Грек¹⁾, асп. А. В. Рудомакха¹⁾

¹⁾Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Разработан алгоритм оценки уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории городов с использованием геоинформационных систем в рамках стейкхолдерно-интегрированного подхода. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: охарактеризован стейкхолдерно-интегрированный подход к оценке уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов; систематизированы существующие подходы к оценке уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов; разработан алгоритм определения данных пространственных моделей; построены пространственные модели для оценки уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения с использованием геоинформационных систем. Предложен комплексный подход к моделированию пространственных факторов для оценки инженерно-инфраструктурного обеспечения города, который отличается от существующих разработкой и применением геоинформационного инструментария. Разработаны пространственные модели инженерно-инфраструктурного обеспечения территории города, включающие территориальные, экологические, энергетические, социально-экономические и другие характеристики, что позволило реализовать предложенный подход к моделированию пространственных факторов. Заслуживает внимания использование геоинформационных систем, что открывает возможность более детального рассмотрения моделей влияния пространственных факторов, позволяет повысить объективность решения поставленной проблемы.

Ключевые слова: инженерно-инфраструктурное обеспечение, геоинформационное моделирование, средства геоинформационных систем, оценка уровня, территория города

Для цитирования: Стейкхолдерно-интегрированный подход к оценке уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов / К. А. Мамонов [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 130–141. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-130-141

Stakeholder-Integrated Approach to Assessment of Level in Urban Engineering and Infrastructure Provision

K. A. Mamonov¹⁾, S. G. Nesterenko¹⁾, E. S. Shterndok¹⁾, M. A. Grek¹⁾, A. V. Rudomakha¹⁾

¹⁾O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. An algorithm for assessment of level in engineering and infrastructure support of urban area has been developed while using geographic information systems (GIS) in the framework of stakeholder-integrated approach. In order to achieve the target goal the following tasks have been solved: description of stakeholder-integrated approach to assessment of level in engineering and infrastructure support of cities; systematization of the existing approaches to assessment of level in engineering and infrastructure support of cities; development of an algorithm for determination of data for spatial models; development of spatial models for assessment of level in engineering and infrastructure support while using geographic information systems.

Адрес для переписки

Мамонов Константин Анатольевич
Харьковский национальный университет
городского хозяйства имени А. Н. Бекетова
ул. Маршала Баженова, 17,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +380 99 291-73-54
kostia_mamonov@mail.ru

Address for correspondence

Mamonov Konstantin A.
O. M. Beketov National University
of Urban Economy in Kharkiv
17 Marshal Bazhenov str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380 99 291-73-54
kostia_mamonov@mail.ru

mation systems. A comprehensive approach has been proposed to simulate spatial factors in order to assess urban engineering and infrastructure support, which is different from the existing ones due to development and application of GIS tools. Spatial models of urban engineering and infrastructure support have been developed in the paper. They include territorial, ecological, power engineering, socio-economic and other characteristics. These models have made it possible to implement the proposed approach for simulation of the spatial factors. It is necessary to point out the fact that geographic information systems have been used and this approach provides a possibility to detailed consideration of models which reveal influence of spatial factors. So it is possible to increase objectivity of solving the problem.

Keywords: engineering and infrastructure support, GIS modeling, geographic information systems tools, assessment of level, urban territory

For citation: Mamonov K. A., Nesterenko S. G., Shterndok E. S., Grek M. A., Rudomakha A. V. (2018) Stakeholder-Integrated Approach to Assessment of Level in Urban Engineering and Infrastructure Provision // *Science and Technique*. 17 (2), 130–141. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-130-141

Введение

Инженерная инфраструктура городов предназначена для обеспечения на конкретной территории всех потребителей водой, энергией, топливом, вывоза бытовых и производственных отходов. Инженерная инфраструктура городов включает в себя системы водоснабжения, канализации, тепло-, электро-, газоснабжения, связи, освещения, санитарной очистки и других видов благоустройства. Инженерное оборудование систем содержит наземные и подземные сооружения, инженерные сети и коммуникации.

Уровень инженерного обеспечения территории населенного пункта оказывает существенное влияние на качество жизни населения, а также на привлекательность города для населения. Он также является одним из факторов, который влияет на оценку пространственных характеристик, обеспечивающих формирование, распределение и использование земель городов. В таких условиях важное значение приобретает оценка уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов. Кроме того, на формирование и реализацию инженерно-инфраструктурного обеспечения городов оказывают влияние группы заинтересованных лиц (стейкхолдеров), которые взаимодействуют в сфере земельных отношений городских агломераций.

Анализ разработок

Решением проблем в сфере исследования направлений и определения особенностей инженерно-инфраструктурного обеспечения, его оценки, использования современных технологий занимаются ученые Ю. Ф. Дехтяренко [1], А. А. Лященко [2, 3], К. А. Мамонов [4–6], Ю. Н. Палеха [7, 8], В. Д. Шипулин [9] и др.

Однако остаются нерешенными вопросы, связанные с оценкой уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения, учитывая особенности формирования, распределения и использования земель городов и взаимоотношения с различными группами заинтересованных лиц (стейкхолдеров).

Целью исследования является разработка алгоритма оценки уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории городов с использованием геоинформационных систем в рамках стейкхолдерно-интегрированного подхода.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- характеристика стейкхолдерно-интегрированного подхода к оценке уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов;
- систематизация существующих подходов к оценке уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов;
- разработка алгоритма определения данных пространственных моделей;
- построение пространственных моделей для оценки уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения с использованием геоинформационных систем.

Результаты исследования

Для развития инженерно-инфраструктурного обеспечения городов предложено создать информационно-пространственный базис, который формируется на основе результатов интегральной оценки. В этом контексте для решения поставленной задачи разработан стейкхолдерно-интегрированный подход, суть которого состоит в том, что определяются интегральные

критерии пространственных характеристик инженерно-инфраструктурного обеспечения городов, формируются геоинформационные модели, что позволяет принимать обоснованные решения для повышения эффективности функционирования городских агломераций.

В [4, 7–11] определено, что оценка уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территорий города базируется на определении условий оценочных районов, в первую очередь городскими инженерными сетями. Коэффициент уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения городов K_j определяется на основе исследования влияния эксплуатационных характеристик существующих сетей тепло-, газо-, водоснабжения, канализации (местоположение, диаметр труб, давление в возможных точках подключения, линейно-узловые нагрузки на сеть и т. д.) на потребителя, учитывая особенности формирования, распределения и использования земель. Значение K_j находится в диапазоне от 1,0 (наивысшая вероятность) до 1,5 (наименьшая вероятность).

В условиях города существуют значительные сложности в получении и совокупной обработке распределенных в пространстве данных инженерно-инфраструктурного обеспечения систем. Поэтому для оценки уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории города определено, что коэффициент K_j зависит от местоположения, длины и диаметров трубопроводов инженерных сетей [5, 6, 12–16].

Исходя из того, что инженерно-инфраструктурное обеспечение систем представляется геопространственными объектами, оценка уровня выполняется с использованием геоинформационных систем. Для моделирования пространственных факторов по каждому виду трубопроводного инженерно-инфраструктурного обеспечения территории города определена последовательность:

1-й этап: создание цифрового аналога инженерной сети;

2-й этап: определение данных для модели уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории путем:

– построения элементов инженерной сети в единую систему с помощью показателей стоимости строительства трубопроводов различного диаметра;

– расчета глубин буферов от труб инженерно-инфраструктурного обустройства на основе единой системы;

3-й этап: создание геоинформационной модели инженерно-инфраструктурного обеспечения территории на основе буферизации труб инженерных сетей по определенным глубинам буферов.

Согласно установленной последовательности для моделирования уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории города разработан следующий линейный алгоритм определения данных пространственной модели:

1) *начало*: атрибуты геоинформационного слоя инженерной сети путем расчета суммарной протяженности труб

$$L_{\Sigma} = \sum L_i; \quad (1)$$

2) расчет стоимости труб определенного диаметра

$$V_{Di} = V_i L_i; \quad (2)$$

3) определение суммарной стоимости всех труб

$$V_{\Sigma} = \sum V_i L_i; \quad (3)$$

4) расчет средней стоимости 1 м труб

$$V_{cp} = V_{\Sigma} / L_{\Sigma}; \quad (4)$$

5) определение коэффициента буфера

$$K = S / L_{\Sigma} / V_{cp} / 2; \quad (5)$$

6) расчет глубины буферов

$$R_i = K V_i; \quad (6)$$

конец: атрибуты геоинформационного слоя инженерной сети с глубинами буферов.

В представленных моделях алгоритма приняты следующие обозначения: D_i – диаметр труб; V_i – стоимость 1 м пог. труб определенного диаметра; L_i – длина труб определенного диаметра; S – площадь территории; R – глубина буфера.

Согласно установленной последовательности этапов для моделирования уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории разработан линейный алгоритм расчета данных пространственной модели (рис. 1).

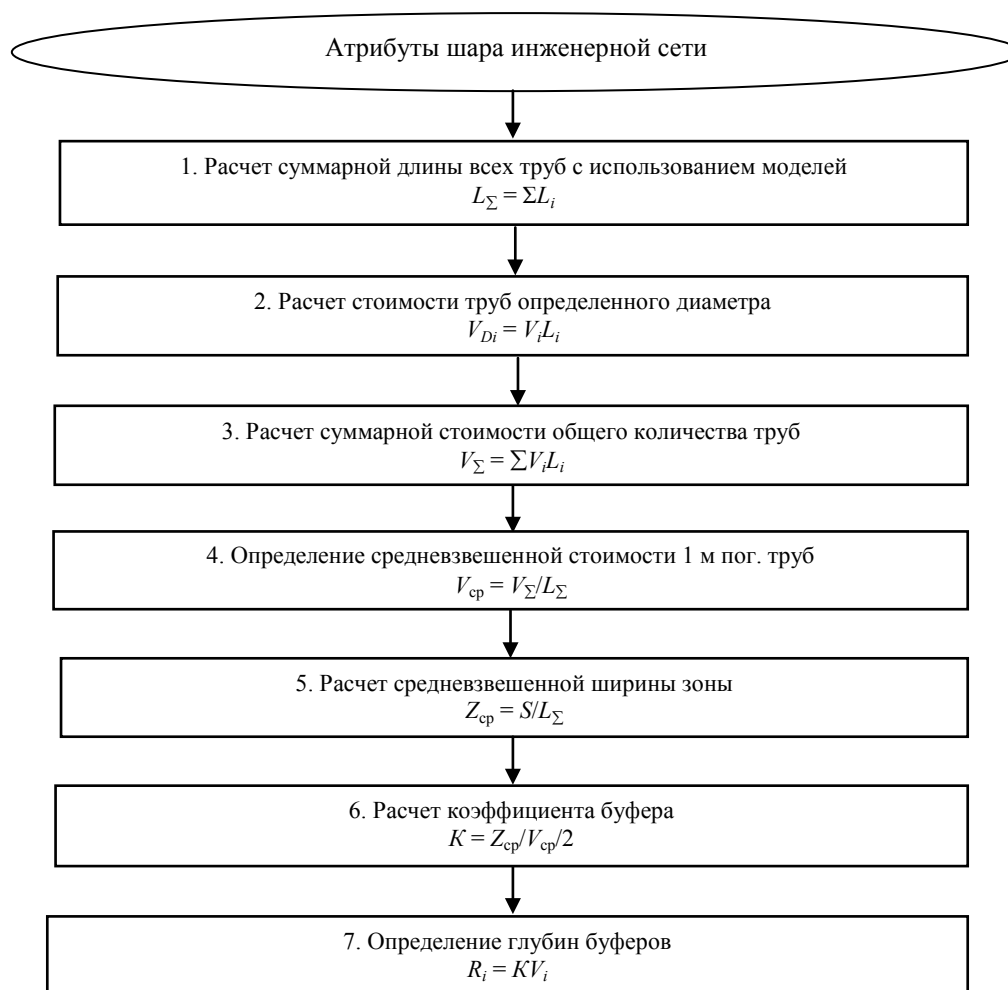


Рис. 1. Алгоритм расчета данных пространственной модели

Fig. 1. Algorithm of data calculation for spatial model

Для моделирования пространственных факторов предложена методика осуществления расчета глубин зон сети водоснабжения г. Харькова, результаты которой представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет глубин зон сети водоснабжения
Calculation of depth in water network zones

Диаметр D_i , мм	Длина L_i , мм	Значение V_i , грн	Значение $V_i L_i$, грн·м	Глубина буфера R_i , мм
1	2	3	4	5
150	5460	19	103740	78
200	12956	23	297988	94
250	3563	28	99764	114
300	100884	34	3430056	139

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
400	78618	39	3066102	159
500	40183	52	2089516	213
600	62874	64	4023936	262
700	6004	68	408272	278
800	36597	72	2634984	294
900	25167	86	2164362	352
1000	55733	100	5573300	409
1200	37417	126	4714542	515
1400	33912	154	5222448	629
1600	46098	195	8989110	797

По разработанному алгоритму (рис. 1) созданы пространственные модели инженерно-

инфраструктурного обеспечения территории г. Харькова (рис. 2–5).

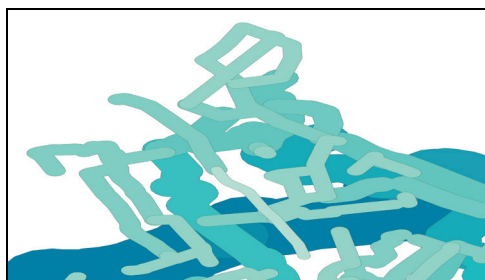


Рис. 2. Пространственная модель уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории г. Харькова существующей сетью водоснабжения (разработано авторами)

Fig. 2. Spatial model of engineering and infrastructure support level for territory of Kharkiv by existing water supply network (developed by authors)

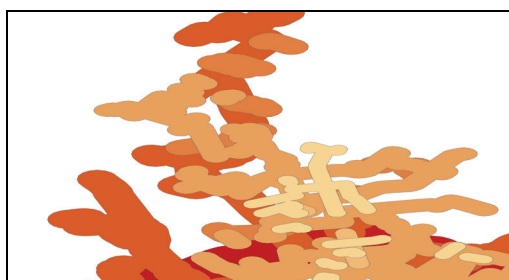


Рис. 3. Пространственная модель уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории г. Харькова существующей сетью теплоснабжения (разработано авторами)

Fig. 3. Spatial model of engineering and infrastructure support level for territory of Kharkiv by existing heat supply system (developed by authors)

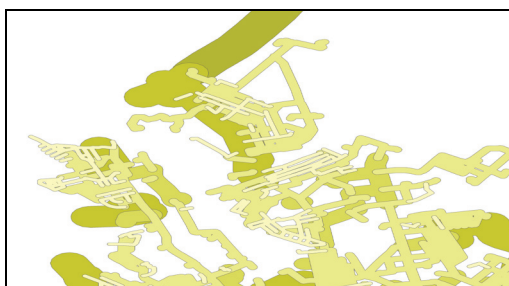


Рис. 4. Пространственная модель уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории г. Харькова существующей сетью газоснабжения (разработано авторами)

Fig. 4. Spatial model of engineering and infrastructure support level for territory of Kharkiv by existing gas supply system (developed by authors)

Для моделирования пространственных факторов земель мегаполиса предложено определить уровень обеспечения территории инженерной инфраструктурой электроснабжения.



Рис. 5. Пространственная модель уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории г. Харькова существующей сетью водоотведения (разработано авторами)

Fig. 5. Spatial model of engineering and infrastructure support level for territory of Kharkiv by existing water drainage network (developed by authors)

Показатель обеспечения территории инженерной инфраструктурой электроснабжения H_i для каждого из районов города определяется по следующим принципам. В частности, при равномерной плотности нагрузки условия электроснабжения являются функцией удаленности от источников (центра) питания. Оценка влияния фактора электроснабжения характеризуется условным показателем, для которого максимальное значение (наиболее благоприятные условия) равно 1,0 с последующим уменьшением его по мере удаленности от источников питания и с усложнением схемы электроснабжения.

Анализ значительного количества разработанных проектов, а также специально выполненных расчетов показывает, что в зоне радиусом до 1,0 км от источника (центра) питания этот показатель составляет 1,0, при удалении до 2,5 км – 0,85, при удалении до 5,0 км – 0,77 (если при этом не требуется создание нового центра питания). По этим данным путем буферизации трансформаторных пунктов создана модель уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории существующей сетью электроснабжения.

Разработана модель, характеризующаяся линией тренда по мере удаленности от источни-

ков питания (рис. 6), которая представлена логарифмической функцией

$$E = -0,144\ln(x) + 0,9946. \quad (7)$$

Большое значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,9912$) свидетельствует о существенной степени влияния независимого фактора на результирующий показатель.

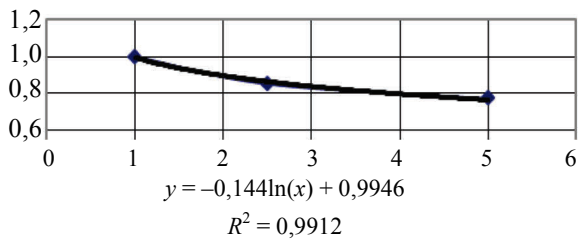


Рис. 6. Диаграмма и модель удаленности объектов от источников питания (разработано авторами)

Fig. 6. Diagram and model showing distance from project objects to sources of supply (developed by authors)

С использованием разработанной модели, геоинформационного инструментария, данных по объектам источников питания и сети электроснабжения г. Харькова построена пространственная модель уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории существующей сетью электроснабжения (рис. 7).

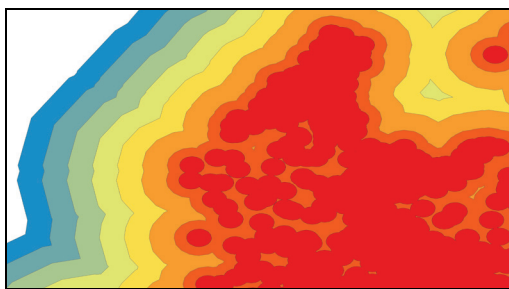


Рис. 7. Пространственная модель уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения территории г. Харькова существующей сетью электроснабжения (разработано авторами)

Fig. 7. Spatial model of engineering and infrastructure support level for territory of Kharkiv by existing electricity supply network (developed by authors)

Определение влияния инженерно-инфраструктурного обеспечения территории г. Харькова на оценочные районы осуществляется путем наложения определенного вида простран-

ственной модели инженерно-инфраструктурного обеспечения территории на оценочные районы и расчета индексов инженерно-инфраструктурного обеспечения оценочных районов с определением площадей буферов в каждом районе.

Результаты расчета нормированных индексов обеспечения инженерной инфраструктурой теплоснабжения (A_n), газоснабжения (B_n), водоснабжения (F_n), канализации (G_n) и электроснабжения (H_n) районов города предложено использовать для определения интегрального индекса уровня инженерного обустройства оценочных районов города (U_i) с помощью веса каждой из составляющих инженерного обустройства в общей оценке по модели

$$U_i = A_n a + B_n b + F_n f + G_n g_c + G_n g_r + H_n h, \quad (8)$$

где a, b, f, g_c, g_r, h – соответствующий вес каждого из факторов.

На основании интегральных индексов уровня инженерного обустройства оценочных районов средствами ГИС-технологий создается слой оценки обеспечения территории инженерной инфраструктурой, который является пространственной моделью (рис. 8).

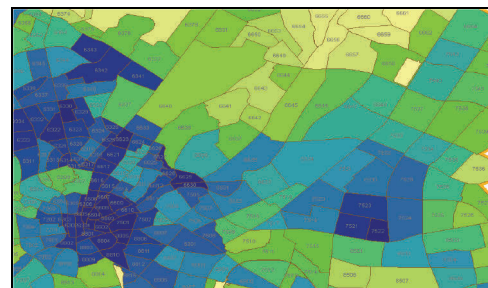


Рис. 8. Пространственная модель оценки обеспечения территории инженерной инфраструктурой (разработано авторами)

Fig. 8. Spatial model for evaluation of engineering and infrastructure support (developed by authors)

В системе геоинформационного моделирования пространственных факторов земель городов большое значение имеет экологическое состояние территорий. Его оценка осуществляется на основе определения концентрации (интенсивности действия) того или иного фактора со следующей характеристикой его интегрированного проявления (расчет интегрального ин-

декса). Наиболее влиятельными экологическими факторами являются:

- атмосферное загрязнение;
- акустическое загрязнение;
- электромагнитное загрязнение;
- загрязнение почвы.

Следует отметить, что основные источники загрязнения атмосферного воздуха города – мобильные (автотранспорт) и стационарные источники (предприятия) территории. Выходные данные об объемах выбросов в атмосферу, общий выброс загрязняющих веществ и распределение выбросов от стационарных и передвижных источников аккумулируются областным государственным управлением охраны окружающей природной среды и областным центром по гидрометеорологии. Данные загрязнения атмосферного воздуха определяются натурными наблюдениями.

Комплексная характеристика экологического состояния определяется на основе индекса загрязнения атмосферы $I_{за}$, который рассчитывается по модели

$$I_{за} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{ГДК} \right) C_i, \quad (9)$$

где q_i – концентрация, мг/м³; ГДК – граничная допустимая концентрация, мг/м³; C_i – коэффициент приведения.

На основе расположения источников загрязнения предприятиями города и соответствующих объемов выбросов в них средствами пространственного анализа ГИС, методом построения поверхностей IDW создается пространственная модель (слой) загрязнения атмосферного воздуха предприятиями (рис. 9). Для представления распределения загрязнения атмосферного воздуха по территории выбраны уровни загрязнения для наиболее загрязняющей составляющей: 1ГДК, 2,5ГДК и 5ГДК. Картина загрязнения от промышленных источников отражает наиболее вероятные и влиятельные зоны загрязнения.

На основе местоположения проезжих частей магистралей города общегородского и районного значений буферизацией создается про-

странственная модель загрязнения атмосферы от автотранспорта.

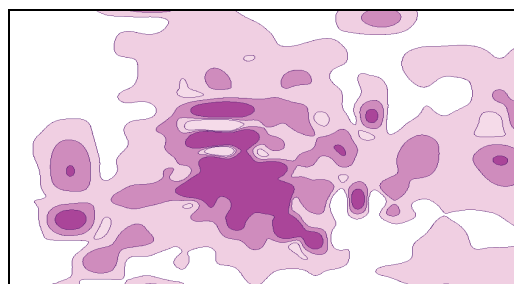


Рис. 9. Пространственная модель загрязнения атмосферного воздуха, построенная методом обратно взвешенных расстояний IDW (разработано авторами)

Fig. 9. Spatial model of air pollution built with the help of IDW method (developed by authors)

Целостную пространственную модель загрязнения атмосферы предложено разработать путем взвешенного суммирования пространственной модели загрязнения атмосферного воздуха предприятиями и от автотранспорта.

Для моделирования пространственных факторов в контексте их интегральной оценки необходимо учитывать загрязнения почв тяжелыми металлами. Основными источниками химического загрязнения почв являются выбросы в атмосферу промышленных предприятий, жидкие и газообразные вещества (твердые выбросы: сажа, свинец Pb, кадмий Cd, цинк Zn, никель Ni, железо Fe, хром Cr, кобальт Co, медь Cu, марганец Mn, ртуть Hg, ряд других металлов и органическая пыль). Крупные фракции (21 мм) оседают вблизи источников выбросов, накапливаясь в верхнем слое почвы, мелкие частицы (менее 1 мм) образуют аэрозоли и распространяются с воздушной массой на достаточное расстояние.

Исходными данными для оценки загрязнения почв должны быть данные областного центра по гидрометеорологии в контрольных точках на территории города по основным видам тяжелых металлов (Cd, Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni). По этим данным создается точечный слой точек измерений. На основе месторасположения точек и значений ЗС в них средствами пространственного анализа ГИС методом построения поверхностей Spline разработана пространственная модель загрязнения почв тяжелыми

металлами с плоскостными объектами уровней загрязнения менее 16 ЗС, 16–32 ЗС, 32–128 ЗС, более 128 ЗС (рис. 10).



Рис. 10. Пространственная модель загрязнения почв тяжелыми металлами, созданная методом построения поверхностей Spline (разработана авторами)

Fig. 10. Spatial model of soil pollution by heavy metals built with the help of method for constructing Spline surfaces (developed by authors)

Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами районов г. Харькова выполняется путем наложения пространственной модели загрязнения почв тяжелыми металлами на оцениваемые районы, расчета индексов средневзвешенной концентрации загрязнения почв тяжелыми металлами на основании определения площадей зон загрязнения по модели

$$M_i = \sum(S_{ij} \cdot ZC_j) / S_i, \quad (10)$$

где M_i – средневзвешенный показатель суммарного загрязнения почв (ZC_i) для i -го оценочного района города; S_{ij} – доля j -зоны i -го района, имеющая определенное значение ZC_i ; ZC_j – соответствующее значение ZC j -зоны.

В рамках моделирования пространственных факторов земель городов предложено осуществлять пространственное моделирование акустического загрязнения.

Следует отметить, что шум – один из существенных факторов негативного влияния на здоровье человека. Основным источником акустического загрязнения городской среды является транспорт. Характеристики транспортного шума – эквивалентный ($LA_{э\text{кв}}$) и максимальный ($LA_{\text{макс}}$) корректируемые уровни звука, дБА, на рассчитанном расстоянии:

- от оси полосы движения автотранспорта к точке расчета, или оси ближней полосы, – для многополосных автотранспортных потоков;

- от оси пути движения трамвайного транспорта к точке расчета;

- от оси пути движения железнодорожного транспорта к точке расчета;

- к точке расчета от траектории движения воздушного транспорта.

Перечисленные характеристики учитываются при построении современной пространственной модели акустического загрязнения городской территории. Зоны акустического загрязнения от автотранспорта, железной дороги и аэропорта интегрированы в одну пространственную модель акустического загрязнения города и представлены на рис. 11.

Оценка акустического загрязнения оцениваемых районов выполнена путем наложения пространственной модели акустического загрязнения на соответствующие районы, расчета средневзвешенных индексов акустического загрязнения для оценочных районов на основании определения площадей зон загрязнения по модели

$$X_i = \sum(S_{ij} \cdot K_j) / S_i, \quad (11)$$

где X_i – средневзвешенный показатель акустического загрязнения для i -го оценочного района города; S_{ij} – доля j -зоны i -го района, имеющая определенное значение K_i ; K_j – соответствующее значение K j -зоны.

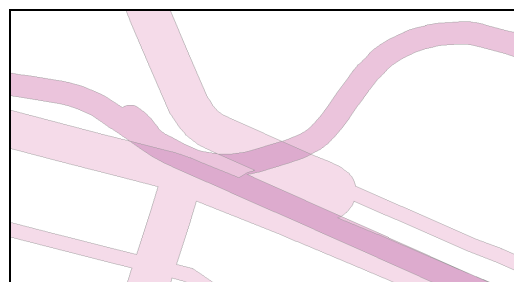


Рис. 11. Пространственная модель зон акустического загрязнения от автотранспорта и железной дороги г. Харькова (разработана авторами)

Fig. 11. Spatial model of acoustic pollution zones caused by road transport and railway on the territory of Kharkiv (developed by authors)

В рамках моделирования пространственных факторов авторами предложено определить источники и факторы электромагнитного загрязнения.

К источникам электромагнитного излучения в городах принадлежат радио-, телевизионные и радиолокационные станции различного назначения, работающие в полосе радиочастот, а также сеть линий электропередачи, которая состоит из воздушных высоковольтных линий электропередачи и электрических подстанций (распределительные устройства, преобразователи электроэнергии, трансформаторы, выпрямители и другие сооружения).

Исходная информация для расчета уровня электромагнитного загрязнения может быть предоставлена санитарно-эпидемиологической станцией. Используется также санитарный паспорт объекта.

Средствами ГИС по объектам загрязнения создаются зоны загрязнения среды. Экологическое качество районов оценивается с применением оверлейного анализа (перекрывания) территории районов с зонами загрязнения среды.

Оценка электромагнитного загрязнения оценочных районов выполнена путем наложения пространственной модели электромагнитного загрязнения на оценочные районы, расчета средневзвешенных индексов электромагнитного загрязнения на основании определения площадей зон загрязнения в каждом районе по модели

$$Z_i = \sum (S_{ij} \cdot K_j) / S_i, \quad (12)$$

где Z_i – средневзвешенный показатель электромагнитного загрязнения для i -го оценочного района города; S_{ij} – доля j -зоны i -го района, имеющая определенное значение K_j ; K_j – соответствующее значение K_j -зоны.

В системе оценки пространственных факторов земель городов для осуществления пространственного моделирования предложено определять уровень экологического состояния территории.

Следует отметить, что экологическое состояние территории отдельных участков города характеризуется интегральным индексом E_i . Он агрегирует в себе показатели, определяющие действия различных экологических факторов на качество территории. Оценка интегрального индекса экологического состояния территории осуществляется через взвешивание отдельных

факторов. Значения весовых коэффициентов получены по результатам корреляционно-регрессионного анализа влияния экологического состояния на заболевания людей с использованием экспертных оценок.

Расчет интегрального индекса экологического качества территории каждого из выделенных районов осуществляется с учетом коэффициентов по модели

$$E_i = X_n W_x + Y_n W_y + Z_n W_z + M_n W_m, \quad (13)$$

где X_n , Y_n , Z_n – индекс атмосферного, акустического и электромагнитного загрязнения соответственно; M_n – индекс загрязнения грунта; W – вес фактора.

По этим данным создается пространственная модель интегральной оценки экологического качества территории г. Харькова (рис. 12).

Пространственное моделирование факторов направлено на реализацию оценки привлекательности территории городов. В этом контексте особое значение приобретает определение социальной привлекательности (престижности) городской среды, которая отражает удовлетворение жителей архитектурно-эстетическими, социально-инфраструктурными, транспортными условиями проживания, разнообразием мест приложения труда, уровнем озеленения микрорайонов, наличием условий для развития детей, общим культурным уровнем окружения и т. п. [12].

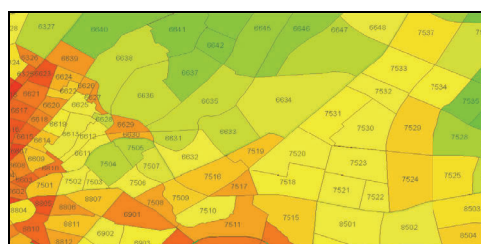


Рис. 12. Пространственная модель оценки экологического качества территории г. Харькова (разработано авторами)

Fig. 12. Spatial model for ecological quality evaluation on the territory of Kharkiv (developed by authors)

Оценка привлекательности среды в городе осуществляется методами прямых измерений, экспертным, комбинированным.

Путем прямых измерений производится оценка привлекательности среды по опреде-

ленным факторам. Для этого на основании данных топографической съемки и справочников создаются 4-точечные тематические слои следующих объектов:

- магазинов и заведений питания (N_c);
- поликлиник и аптек (O_i);
- школ и детсадов (P_i);
- учреждений культуры и искусства (Q_i).

Оценка привлекательности городской среды при наличии каждого из этих факторов выполняется средствами ГИС путем наложения тематических слоев на оценочные районы и вычисления их плотности (рис. 13) [13].

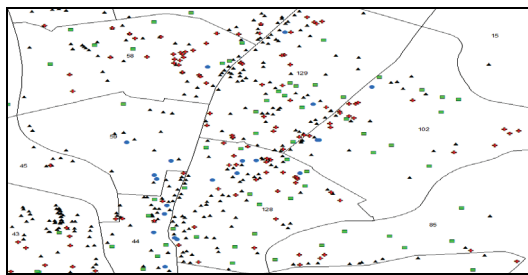


Рис. 13. Вид наложения слоя «магазины и заведения питания, поликлиники и аптеки» на оценочные районы, «учреждения культуры и искусства, магазины и заведения питания (фрагмент)» на оценочные районы (разработано авторами)

Fig. 13. View of “shops and culinary options, polyclinics and pharmacies” overlay for evaluating districts, “institutions of culture and art, shops and culinary options (fragment)” overlay for evaluating districts (developed by authors)

По представленным данным средствами ГИС-технологий создан слой привлекательности среды для оценочных районов (рис. 14).

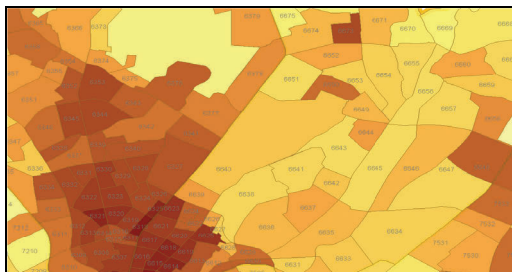


Рис. 14. Пространственная модель оценки социально-градостроительной привлекательности среды территории г. Харькова (разработана авторами)

Fig. 14. Spatial model for evaluation of socio-urban environment attractiveness on the territory of Kharkiv (developed by authors)

Обобщающим этапом моделирования пространственных факторов на зональном уровне является определение экономико-планировочных зон и зональных коэффициентов K_{m2} на основе анализа квалиметрических показателей оценочных районов.

Вычисление комплексных индексов ценности территории города I_i осуществляется по модели

$$I_i = S_i P_S + E_i P_E + U_i P_U + C_i P_C, \quad (14)$$

где S_i – интегральный индекс транспортно-функционального удобства территории города; E_i – интегральный индекс экологического качества территории; U_i – интегральный индекс инженерно-инфраструктурного обеспечения территории; C_i – интегральный индекс социально-градостроительной привлекательности среды; P_S, P_E, P_U, P_C – соответствующий вес каждого из отдельных интегральных индексов.

На основе предложенной модели, определенных пространственных показателей средствами ГИС создается пространственная модель экономико-планировочных зон города по коэффициентам K_{m2} (рис. 15).

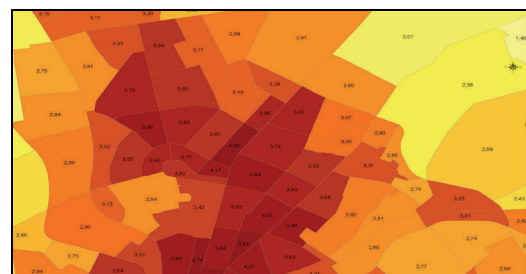


Рис. 15. Пространственная модель комплексной оценки экономико-планировочных зон г. Харькова (разработана авторами)

Fig. 15. Spatial model of complex assessment of economic-planning zones on the territory of Kharkiv (developed by authors)

ВЫВОДЫ

1. Предложен комплексный подход к моделированию пространственных факторов для оценки инженерно-инфраструктурного обеспечения города, который отличается от существующих разработкой и применением геоинформационного инструментария. Разработаны

пространственные модели инженерно-инфраструктурного обеспечения территории города, включающие территориальные, экологические, энергетические, социально-экономические и другие характеристики, что позволило реализовать предложенный подход к моделированию пространственных факторов.

2. Определены подходы и разработан алгоритм моделирования, которые позволяют создать геоинформационную модель оценки уровня инженерно-инфраструктурного обеспечения для определенной территории в условиях ограниченного доступа к данным инженерных систем. Использование геоинформационных систем открывает возможность более детального рассмотрения моделей влияния пространственных факторов, позволяет повысить объективность решения поставленной проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дехтяренко, Ю. Ф. Методичні основи грошової оцінки земель в Україні: наук. вид. / Ю. Ф. Дехтяренко, М. Г. Лихогруд, Ю. М. Манцевич. Київ: ПРОФІ, 2006. 624 с.
2. Лященко, А. А. Цифрове картографічне забезпечення грошової оцінки земель населених пунктів / А. А. Лященко, О. В. Ціпенко // Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології і перспективи розвитку: матеріали 2-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Львів; Краків: НУ «Львівська політехніка», 2000. С. 82–92.
3. Лященко, А. Методика та практичні питання геоінформаційного моделювання врахування впливу локальних факторів на нормативно-грошову оцінку земельних ділянок / А. Лященко, Ю. Кравченко, Д. Горковчук // Землевпорядний вісник. 2015. № 11. С. 28–33.
4. Мамонов, К. А. ГИС-забезпечення у раціональному використанні земельних ресурсів міської забудови / К. А. Мамонов, С. Г. Нестеренко, К. І. Вяткін // Науковий вісник будівництва. 2016. Т. 86, № 4. С. 283–286.
5. Мамонов, К. А. Геоінформаційні системи в землеустрої: напрями, особливості та практика застосування в міському середовищі / К. А. Мамонов, С. Г. Нестеренко, К. І. Вяткін // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2016. Вип. 166. С. 60–68.
6. Мамонов, К. А. Системи мобільного лазерного сканування в геоінформаційних технологіях / К. А. Мамонов, К. І. Вяткін, С. Г. Нестеренко // Комунальне господарство міст. Сер.: Технічні науки та архітектура. 2016. Вип. 132. С. 121–126.
7. Палеха, Ю. Н. Особенности использования ГИС-технологий в оценке территорий населенных пунктов

Украины / Ю. Н. Палеха // Ученые записки Таврического национального университета имени В. В. Вернадского. География. 2003. Т. 16, № 1. С. 125–132.

8. Палеха Ю. Н. Применение ГИС-технологий в градостроительных проектах на государственном и региональном уровнях / Ю. Н. Палеха, А. В. Олещенко, И. В. Соломаха // Ученые записки Таврического национального университета имени В. В. Вернадского. Сер. География. 2012. Т. 25, № 1. Р. 155–166.
9. Шипулин, В. Д. Основные принципы геоинформационных систем. / В. Д. Шипулин. Харьков: ХНАГХ, 2010. 337 с.
10. Оцінка земель. Правила розроблення технічної документації з нормативної грошової оцінки земель населених пунктів: Стандарт Державного комітету України із земельних ресурсів СОУ ДКЗР 0032632-012:2009. Київ, 2009. 98 с.
11. Порядок нормативної грошової оцінки земель населених пунктів [Електронний ресурс]: наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України, 25.11.2016, № 489 // Законодавство України. Режим доступа: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE29777.html
12. Лурье, И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков / И. К. Лурье. М.: КДУ, 2008. 424 с.
13. Митчелл, Э. Руководство по ГИС Анализу. Ч. 1: Пространственные модели и взаимосвязи / Э. Митчелл; пер. с англ. Киев: ЗАО ECOMM Co; Стило, 2000. 198 с.
14. Хаксхольд, В. Введение в городские геоинформационные системы / В. Хаксхольд; пер. с англ. М.: Дата+, 1998. 321 с.
15. Legal Barriers to 3D Cadastre Implementation: What is the Issue? / S. Ho [et al.] // Land Use Policy. 2013. Vol. 35, No 1. P. 379–387.
16. Oosterom, P. Research and Development in 3D Cadastres / P. Oosterom // Computers, Environment and Urban Systems. 2013. Vol. 40, No 1. P. 1–6.

Поступила 01.03.2017

Подписана в печать 10.05.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Dekhtyarenko Yu. F., Likhogroud M. G., Mantsevich Yu. M. (2006) *Methodological Foundations of Monetary Valuation of Land in Ukraine: Scientific Publication*. Kyiv, "PROFI" Publishing House. 624 (in Ukrainian).
2. Liashchenko A. A., Tsipenko O. V. (2000) Digital Cartographic Support of Monetary Valuation of Settlement Land. *Materiali 2-i Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf. "Kadast, Fotogrammetriya, Geoinformatika – Suchasni Tekhnologii i Perspektivu Rozvitku"* [Proceedings of the 2nd International Scientific-Practical Conference "Cadastre, Photogrammetry, Geo-Informatics – Modern Technologies

- and Prospects of Development”]. Lviv-Krakow, National University “Lviv Polytechnic”, 82–92 (in Ukrainian).
3. Liashchenko A., Kravchenko Yu., Gorkovchuk D. (2015) Methodology and Practical Issues of Geo-Modeling Taking into Account the Impact of Local Factors on Regulatory and Monetary Value of Land. *Zemlevporyadnii Visnik* [Land Management Journal], (11), 28–33 (in Ukrainian).
 4. Mamonov K. A., Nesterenko S. G., Vyatkin K. I. (2016) GIS-Provision for Rational Use of Land Resources in Urban Areas. *Naukovii Visnik Budivnitstva = Scientific Bulletin of Bulding*, 86 (4), 283–286 (in Ukrainian).
 5. Mamonov K. A., Nesterenko S. G., Vyatkin K. I. (2016) Geo-Informational Technologies in Land Planning: Directions, Special Aspects And its Practical Application in Urban Environment. *Zbirnik Naukovikh Prats' Ukraïns'kogo Derzhavnogo Universitetu Zaliznichnogo Transportu = Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, Is. 166, 60–68 (in Ukrainian).
 6. Mamonov K. A., Vyatkin K. I., Nesterenko S. G. (2016) Mobile Systems Laser Scanning Geoinformation Technologies. *Komunal'ne Gospodarstvo Mist = Municipal Economy of Cities*, Is. 132, 121–126 (in Ukrainian).
 7. Palekha Yu. N. (2003) Specific Features in Application of GIS-Technologies for Assessment of Settlement Territories in the Ukraine. *Uchenye Zapiski Tavricheskogo Natsional'nogo Universiteta imeni V. V. Vernadskogo. Geografiya = Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series Geography*, 16 (1), 125–132 (in Russian).
 8. Palekha Yu. N., Oleshchenko A. V., Solomaha I. V. (2012) Application of GIS Technology in Urban Development Projects at the National and Regional Levels. *Uchenye Zapiski Tavricheskogo Natsional'nogo Universiteta imeni V. V. Vernadskogo. Geografiya = Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series Geography*, 25 (1), 155–166 (in Russian).
 9. Shipulin V. D. (2010) *The Basic Principles of Geographic Information Systems*. Kharkiv, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. 337 (in Russian).
 10. SOU DKZR 0032632-012:2009 [Standard of the State Committee of Ukraine on Land Resources]. Land Valuation. *Rules and Regulations for Preparation of Technical Documentation with Standard Monetary Value of Settlement Land*. Kiev, 2009. 98 (in Ukrainian).
 11. Procedure for Standard Monetary Valuation of Settlement Land: Order of Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine, dated 25.11.2016 No 489. *Legislation of Ukraine*. Available at: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE29777.html (in Ukrainian).
 12. Lurie I. K. (2008) *Geo-Information Mapping. Methods for Geo-Informatics and Digital Processing of Space Images*. Moscow: KDU Publishing House. 424 (in Russian).
 13. Mitchell A. (1999) *The ESRI Guide to GIS Analysis. Volume 1: Geographic Patterns and Relationships*. ESRI Press. 190.
 14. Huxhold W. E. (1991) *An Introduction to Urban Geographic Information Systems*. Oxford University Press, New York. 337.
 15. Ho S., Rajabifard A., Stoter J., Kalantari M. (2013) Legal Barriers to 3D Cadastre Implementation: What is the Issue? *Land Use Policy*, 35 (1), 379–387. DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.06.010.
 16. Oosterom P. (2013) Research and Development in 3D Cadastres. *Computers, Environment and Urban Systems*, 40 (1), 1–6. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2013.01.002.

Received: 01.03.2017

Accepted: 10.05.2017

Published online: 30.03.2018

Термохимия реакций взаимодействия сульфатов натрия и алюминия с компонентами гидратирующегося портландцемента

Докт. техн. наук, доц. П. И. Юхневский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В технологии бетона для решения различных задач широко применяют химические добавки, в том числе сульфатсодержащие добавки-электролиты – ускорители схватывания и твердения цемента. Механизм действия добавок-ускорителей схватывания и твердения цемента достаточно сложен и не может считаться надежно установленным. Влияние сульфатсодержащих добавок типа сульфата натрия сводится к ускорению гидратации силикатных фаз цемента за счет повышения ионной силы раствора. Кроме того, существенное влияние на твердение оказывают обменные реакции аниона добавки с фазой портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) и алюминатными фазами твердеющего цемента, что ведет к образованию легкорастворимых гидроксидов и труднорастворимых солей кальция. Влияние сульфатсодержащих добавок на свойства цементного теста и камня достаточно разнообразно и зависит от концентрации соли и вида катиона. Например, действие добавки сульфата алюминия осложняется тем, что в воде добавка подвергается гидролизу, который усиливается в щелочной среде цементного теста. Образование продуктов гидролиза и их реакция с алюминатными фазами и портландитом цемента приводят к существенному ускорению схватывания. Таким образом, несмотря на схожесть добавок по участию анионов в обменных реакциях, механизм влияния их на схватывание и твердение цемента существенно различается. В настоящей статье рассмотрены особенности механизма взаимодействия добавок сульфатов натрия и алюминия в цементных композициях с позиций термохимии. Приведены термохимические уравнения реакций сульфатсодержащих добавок с фазами гидратирующегося цементного клинкера. Рассмотрены тепловые эффекты химических реакций и определено влияние образующихся продуктов на процессы схватывания и твердения портландцемента.

Ключевые слова: сульфатсодержащие добавки, обменные реакции, тепловые эффекты

Для цитирования: Юхневский, П. И. Термохимия реакций взаимодействия сульфатов натрия и алюминия с компонентами гидратирующегося портландцемента / П. И. Юхневский // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 142–145. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-142-145

Thermochemistry of Interaction Reactions for Sodium and Aluminum Sulphates with Components of Hydrating Portland Cement

P. I. Yukhnevskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Chemical additives are widely used in the technology of concrete with the purpose to solve various problems and sulphate-containing additives-electrolytes are also used as accelerators for setting and hardening of cement. Action mechanism of additive accelerators for setting and hardening of cement is rather complicated and can not be considered as well-established. An influence of sulfate-containing additives such as sodium sulfate is reduced to acceleration of cement silicate phase hydration by increasing ionic strength of the solution. In addition to it, exchange reactions of anion additive with portlandite phase ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) and aluminate phases of hardening cement have a significant effect on hardening process that lead to formation of readily soluble hydroxides and hardly soluble calcium salts. The influence of sulfate-containing additives on properties of water cement paste and cement stone is quite diverse and depends on salt concentration and cation type.

Адрес для переписки

Юхневский Павел Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-95-87
tbsm@bntu.by

Address for correspondence

Yukhnevskiy Pavel I.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-95-87
tbsm@bntu.by

For example, the action of the aluminum sulphate additive becomes more complicated if the additive is subjected to hydrolysis in water, which is aggravated in an alkaline medium of the water cement paste. Formation of hydrolysis products and their reaction with aluminate phases and cement portlandite lead to a significant acceleration of setting. Thus, despite the similarity of additives ensuring participation of anions in the exchange reactions, the mechanism of their influence on cement setting and hardening varies rather significantly. The present paper considers peculiar features concerning the mechanism of interaction of sodium and aluminum sulfate additives in cement compositions from the viewpoint of thermochemistry. Thermochemical equations for reactions of sulfate-containing additives with phases of hydrated cement clinker have been given in the paper. The paper contains description how to calculate thermal effects of chemical reactions and determine an influence of the formed products on the setting and hardening of Portland cement.

Keywords: sulfate-containing additives, exchange reactions, thermal effects

For citation: Yukhnnevskiy P. I. (2018) Thermochemistry of Interaction Reactions for Sodium and Aluminum Sulphates with Components of Hydrating Portland Cement. *Science and Technique*. 17 (2), 142–145. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-142-145 (in Russian)

Проблема снижения энергопотребления в производстве бетонных и железобетонных изделий, повышения качественных показателей изделий и улучшения условий труда строителей в Республике Беларусь по-прежнему является актуальной. Для решения этих задач в технологии бетонов широко применяют различные химические добавки, в том числе сульфатсодержащие добавки-электролиты и пластифицирующие добавки. Так, в Беларуси освоена энергосберегающая технология (сочетание метода термоса с кратковременным начальным низкотемпературным разогревом бетона (малоэнергоемкая технология) либо саморазогревом его за счет экзотермии цемента (беспрогревная технология)) производства строительных конструкций с применением сульфата натрия или комплексной добавки – нафталинформальдегидного суперпластификатора С-3 + сульфат натрия [1]. Добавки способствуют ускорению процесса гидролиза вяжущего и существенно повышают тепловыделение цемента в первые двое-трое суток твердения. Добавка сульфата натрия несколько пластифицирует бетонную смесь на стадии виброформования в виде повышенного водоотделения, что следует учитывать примерно 5–6%-м снижением расчетного водосодержания бетона. При этом время начала схватывания цементного теста сокращается на 5–20 % в зависимости от минералогического состава вяжущего.

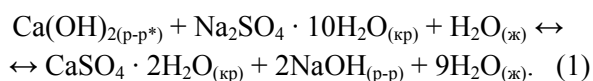
В свою очередь, сульфат алюминия, относящийся по классификации В. Б. Ратинова [2] к добавкам второй группы второго класса (добавкам солей-электролитов, вступающим с вяжущим в обменные реакции так же, как и сульфат натрия), является только ускорителем схватывания цемента и используется, например, для уплотнения структуры и предотвращения испарения влаги из бетона, твердеющего в воздушно-сухих условиях [3], либо в составе комплексных

добавок для торкрет-бетона [4]. При этом некоторые вопросы взаимодействия его с компонентами портландцемента остаются до конца не выясненными, что не способствует рациональному применению его в технологии бетона.

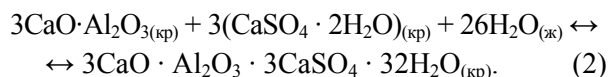
Многие пластифицирующие добавки в бетоны также являются сульфатсодержащими, поскольку содержат активную сульфогруппу. Сюда следует отнести добавки на основе алкилнафталинсульфонатов (типов С-3, СМФ), алкилмеламинсульфонатов (мельмент), алкилсульфонатов (ЛСТ), алкиларилсульфонаты и др. Кроме того, некоторые пластификаторы (например, нафталинформальдегидный суперпластификатор С-3) содержат в своем составе до 15 % сульфата натрия [5]. Как отмечено ранее [6], эффективность взаимодействия добавок-пластификаторов с гидратирующимися минералами цемента может быть оценена по энергии комплексообразования.

Рассмотрим особенности в механизме действия сульфатсодержащих добавок с позиций их термохимических реакций в цементном тесте. Несмотря на то что в результате реакций в цементном тесте в обоих случаях на начальной стадии образуется гипс, а затем – гидросульфоалюминат кальция (этtringит), эффективность добавок сульфатов натрия и алюминия в бетонах сильно различается.

Вначале изучим особенности механизма взаимодействия сульфата натрия с гидратирующимся цементным тестом. Поскольку безводный Na_2SO_4 устойчив только при температуре выше $32,384^\circ\text{C}$, ниже этой температуры в присутствии воды образуется кристаллогидрат $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Запишем реакцию взаимодействия кристаллогидрата сульфата натрия с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидратации C_3S по схеме



Выделяющийся при этом мелкодисперсный гипс реагирует в дальнейшем с алюминатными компонентами цементного клинкера



Таким образом, в реакцию вступают только анионы добавок, тогда как катионы сохраняются в поровой жидкости, увеличивают содержание щелочей и влияют на растворимость компонентов клинкера.

Используя следствие из закона Гесса [7], согласно которому тепловой эффект химической реакции равен сумме теплоты (энтальпий) образования продуктов реакции за вычетом суммы теплоты (энтальпий) образования исходных веществ, применительно к уравнению (1) запишем формулу для расчета теплового эффекта реакции

$$\Delta H = (\Delta H_{f\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} + 2\Delta H_{f\text{NaOH}} + 9\Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}) - (\Delta H_{f\text{Ca(OH)}_2} + \Delta H_{f\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}} + 9\Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}). \quad (3)$$

Пользуясь данными стандартной теплоты образования простых веществ [7], получаем в результате расчета величину теплового эффекта реакции (1) $\Delta H = 80,4$ кДж/моль, реакция эндотермическая. В свою очередь, тепловой эффект по реакции (2) образования эттрингита по аналогии составляет $\Delta H = -447,9$ кДж/моль, реакция экзотермическая.

Сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ безводный представляет собой белые кристаллы, имеющие плотность $2,71 \text{ г/см}^3$. Из водного раствора кристаллизуются бесцветные моноклинные кристаллы $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, имеющие плотность $1,69 \text{ г/см}^3$ (17°C) и обезвоживающиеся при температуре $86,5^\circ\text{C}$. При растворении в воде сульфат алюминия частично подвергается гидролизу по схеме [8]



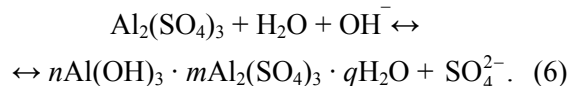
или в сокращенной ионной форме



* Р-р, кр, ж – агрегатное состояние вещества – соответственно раствор, кристаллы и жидкость, – для которого принималась энтальпия образования при расчете теплового эффекта реакции.

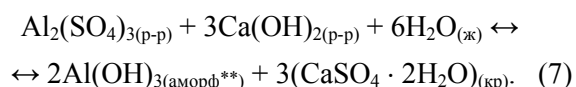
Образуется гидросульфат алюминия. Следующие ступени гидролиза практически не имеют места.

В присутствии кислот гидролиз соли подавляется, а в щелочной среде процесс гидролиза усиливается и протекает по схеме



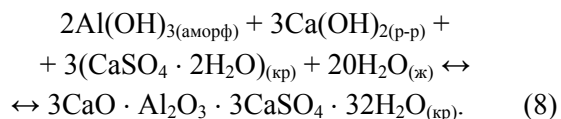
В результате реакций образуются гидрозоль алюминия, создающие пространственные структуры в виде сетки, имеющие очень развитую высокопористую поверхность, обладающие большой адсорбционной способностью и способные коагулировать поры цементного камня. Сильное подкисление раствора в результате гидролиза и образование гидроокиси алюминия существенно сказываются на кинетике гидратационного твердения цемента и составе новообразований цементного камня.

Кроме того, сульфат алюминия вступает в обменную реакцию со щелочами более активных, чем алюминий, металлов, в частности с Ca(OH)_2 :



Пользуясь данными стандартной теплоты образования простых веществ [7], получаем в результате расчета величину теплового эффекта реакции (7) $\Delta H = -109,8$ кДж/моль, реакция экзотермическая.

Как показано в [9, 10], сокращение сроков схватывания цементного теста с добавками аморфных гидроксида и гидросульфата алюминия обусловлено ускоренным образованием фазы эттрингита преимущественно из вещества добавки по реакции

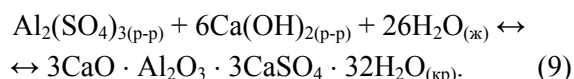


Вклад алюмосодержащих фаз портландцемента в образование эттрингита на этой стадии, по мнению автора, не существенный. При небольших дозировках обе добавки ускоряют гидратацию силикатных фаз цемента и повышают прочность цементного камня. В больших дозировках добавки (особенно $\text{Al}(\text{OH})_3$) подав-

** Аморф – агрегатное состояние вещества – аморфное, для которого принималась энтальпия образования при расчете теплового эффекта реакции.

ляют гидратацию силикатных фаз портландцемента в ранний период (одни сутки) за счет образования алюмосиликатного геля, блокирующего силикатные фазы цементного клинкера.

Воспользуемся особенностью термодинамических уравнений (тепловой эффект реакции зависит только от начального и конечного состояний вещества и не зависит от промежуточных стадий) и сложим левые и правые части (7) и (8). После преобразований получаем



Теплота образования этtringита по реакции (9) с сульфатом алюминия составляет $\Delta H = -298,5$ кДж/моль, в то время как по реакции (2) с сульфатом натрия $\Delta H = -447,9$ кДж/моль. В обоих случаях реакции экзотермические, но с сульфатом натрия протекает с большим тепловым эффектом.

ВЫВОД

Реакция образования гипса путем взаимодействия сульфата алюминия с цементным тестом протекает с выделением теплоты и с большей вероятностью, по сравнению с сульфатом натрия (требуется подвод теплоты), что подтверждает выводы [9]. Кроме того, если при введении сульфата натрия в тесте протекают реакции (1) и (2), то для сульфата алюминия характерны протекающие одновременно реакции (4), (6)–(8) и (2) на поздней стадии. Выделить долю каждой из них затруднительно, так как реакции по схемам (4) и (6)–(8) протекают одновременно. При этом определяющую роль играют реакции образования гидрозоль алюминия, гипса и в последнюю очередь – гидросульфоалюмината кальция.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батяновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона. Ч. 1 / Э. И. Батяновский, Е. А. Иванова, Р. Ф. Осос // Технологии бетонов. 2009. № 2. С. 67–69.
2. Ратинов, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. М.: Стройиздат, 1973. 207 с.
3. Эгбалник, С. Технология и эффективность защиты твердеющего бетона веществом сульфатоалюмината / С. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Строительная наука и техника. 2013. № 1. С. 14–21.
4. Вовк, А. И. «Реламикс Торкрет»: механизм действия и особенности набора прочности торкрет-бетоном / А. И. Вовк // Технологии бетонов. 2011. № 11–12. С. 25–27.

5. Вовк, А. И. Суперпластификаторы в бетоне: еще раз о сульфате натрия, наноструктурах и эффективности / А. И. Вовк // Технологии бетонов. 2009. № 5. С. 18–21.
6. Юхневский, П. И. О взаимосвязи характеристик молекулярной структуры химических добавок-пластификаторов с их эффективностью в цементных композициях / П. И. Юхневский // Наука и техника. 2012. № 1. С. 48–51.
7. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. Л.: Химия, 1978. 392 с.
8. Затковецкий, В. М. Гидролиз солей / В. М. Затковецкий. М.: МИСИ, 1983. 47 с.
9. Васильев, А. С. Влияние алюмосодержащих ускорителей на гидратацию и твердение портландцемента / А. С. Васильев. СПб., 2014. 19 с.
10. Effects of High Accelerator Dosages on the Physical, Chemical and Morphological Properties of a Hydrating Portland Cement Paste / C. Maltese [et al.] // Proc. Ninth ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures, Seville, Spain, October 2009, SP 262 – 15. P. 201–213.

Поступила 26.09.2017

Подписана в печать 28.11.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Batyanovsky E. I., Ivanova E. A., Osos R. F. (2009) Efficiency and Problems of Energy-Saving Technologies for Cement Concrete. Part 1. *Tekhnologii Betonov = Concrete Technologies*, (2), 67–69 (in Russian).
2. Ratnikov V. B., Rozenberg T. I. (1973) *Concrete Additives*. Moscow, Stroyizdat Publ. 207 (in Russian).
3. Egbalnik S., Batyanovsky E. I. (2013) *Technology and Efficiency of Curing Concrete while Using Sulphoaluminate*. Stroitel'naya Nauka i Tekhnika = Construction Science and Technique, (1), 14–21 (in Russian).
4. Vovk A. I. (2011) Setting accelerator "Relamiks Torkret": Action Mechanism and Peculiar Features in Gunite Concrete Strength Development. *Tekhnologii Betonov = Concrete Technologies*, (11–12), 25–27 (in Russian).
5. Vovk A. I. (2009) Superplasticizing Agents in Concrete: Once Again About Sodium Sulphate, Nano-Structures and Efficiency. *Tekhnologii Betonov = Concrete Technologies*, (5), 18–21 (in Russian).
6. Yuhnevsky P. I. (2012) About Interrelation Between Characteristics of Molecular Structure in Chemical Plasticizing Additives and their Efficiency in Cement Compositions. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (1), 48–51 (in Russian).
7. Rabinovich V. A., Khavin Z. Ya. (1978) *Quick Reference Book for Chemistry*. Leningrad, Khimiya Publ. 392 (in Russian).
8. Zatkovetsky V. M. (1983) *Salt Hydrolysis*. Moscow, Moscow Institute of Civil Engineering. 47 (in Russian).
9. Vasiliev A. S. (2014) *Influence of Aluminic Accelerators on Portland Cement Hydration and Setting*. Saint-Petersburg. 19 (in Russian).
10. Maltese C., Pistolesi C., Salvioni D. (et al.) Effects of High Accelerator Dosages on the Physical, Chemical and Morphological Properties of a Hydrating Portland Cement Paste. *Proc. Ninth ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures, Seville, Spain, October 2009, SP 262–15*, 201–213.

Received: 26.09.2017

Accepted: 28.11.2017

Published online: 30.03.2018

Эффективные шпоночные соединения многопустотных плит перекрытий со стенами в современном крупнопанельном домостроении

Канд. техн. наук, доц. О. А. Довженко¹⁾, кандидаты техн. наук В. В. Погребной¹⁾, Л. В. Карабаш¹⁾

¹⁾Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка (Полтава, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Рассмотрена крупнопанельная конструктивная система многоэтажных зданий, индустриальная основа которой создает условия для интенсивного роста объемов домостроения. В качестве плит перекрытий рекомендуется применение многопустотных панелей, что позволяет увеличить расстояние между несущими стенами, улучшить планировочные решения, а также существенно повысить тепло- и звукозащитные свойства дисков перекрытий (покрытий). Для обеспечения совместной работы плит со стеновыми панелями устраиваются шпоночные стыки, имеющие наибольшее сопротивление действию срезающих сил. Прототипом рассматриваемого соединения является узел опирания элементов перекрытий сборно-монолитной конструктивной системы «АРКОС» посредством бетонных шпонок. С целью увеличения несущей способности и повышения надежности работы стыков предусматривается армирование шпонок пространственными каркасами. Совершенствование узлов соединений возможно на основе учета полного количества влияющих на прочность факторов. В Полтавском национальном техническом университете имени Юрия Кондратюка разработана общая методика оценивания несущей способности шпоночных соединений, которая базируется на вариационном методе в теории пластичности бетона и отображает специфику напряженно-деформированного состояния зоны разрушения. Для экспериментальной проверки указанной методики выполнено исследование работы шпонок при их армировании посередине высоты и с разнесенной арматурой в два яруса. Наблюдаемая в опытах картина разрушения образцов подтверждает принятые при расчетах кинематические схемы, а сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений предельной нагрузки указывает на их близость. Двухуровневое армирование существенно улучшает пластические свойства бетона шпонок и исключает хрупкое разрушение. Предложенная конструкция узла соединения плит перекрытий со стеновыми панелями отличается соотношением размеров шпонок и формой арматурных каркасов в виде полых цилиндров, которые обеспечивают повышенную прочность и сейсмостойкость стыка.

Ключевые слова: бетон, армирование, срез, несущая способность, вариационный метод, конструктивное решение, сейсмостойкость

Для цитирования: Довженко, О. А. Эффективные шпоночные соединения многопустотных плит перекрытий со стенами в современном крупнопанельном домостроении / О. А. Довженко, В. В. Погребной, Л. В. Карабаш // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 146–156. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-146-156

Effective Keyed Connections of Hollow-Core Floor Slabs with Walls in Modern Large-Panel House Building

О. А. Dovzhenko¹⁾, V. V. Pohribnyi¹⁾, L. V. Karabash¹⁾

¹⁾Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University (Poltava, Ukraine)

Abstract. The paper considers large-panel constructive system of multi-storey buildings and its industrial basis creates conditions for intensive volume growth in house construction. Application of hollow-core panels are recommended as floor slabs

Адрес для переписки

Довженко Оксана Александровна
Полтавский национальный технический университет
имени Юрия Кондратюка
просп. Первомайский, 24,
36011, г. Полтава, Украина
Тел.: +38 050 982-58-54
O.O.Dovzhenko@gmail.com

Address for correspondence

Dovzhenko Oksana A.
Poltava National Technical
Yuri Kondratyuk University
24 Pershotravnevyi Ave.,
36011, Poltava, Ukraine
Tel.: +38 050 982-58-54
O.O.Dovzhenko@gmail.com

that allows to increase a distance between bearing walls, to improve planning solutions, and also significantly to increase thermal and sound protection properties of floor discs (coatings). Keyed joints having the highest resistance to shearing forces are used to ensure joint action of the slabs with wall panels. A supporting unit of floor elements in the precast-monolithic constructive system ARKOS by means of concrete keys is considered as a prototype of the considered joint. In order to increase a bearing capacity and improve reliability of joints it is envisaged to reinforce keys with space frames. Improvement of joint units is possible to carry out with due account of total number of the factors influencing on strength. Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk has developed a general methodology for assessment of bearing capacity in keyed joints which is based on the variational method in the theory of concrete plasticity and reflects specificity of stress-strain state of the failure zone. For experimental verification of this methodology investigations have been carried out with the purpose to test operation of keys when they are reinforced in mid-height and reinforcement is distributed in two tiers. The observed experimental fracture pattern in the specimens has confirmed kinematic schemes accepted for calculations and comparative analysis of experimental and theoretical values points to their closeness. Two-level reinforcement significantly improves plastic properties of concrete keys and excludes brittle failure. The proposed design of the joint unit for floor slabs with wall panels is characterized by the ratio of key dimensions and shape of reinforcing cages in the form of hollow cylinders which ensure higher strength and seismic resistance of a joint.

Keywords: concrete, reinforcement, shear, bearing capacity, variational method, constructive solution, seismic resistance

For citation: Dovzhenko O. A., Pohribnyi V. V., Karabash L. V. (2018) Effective Keyed Connections of Hollow-Core Floor Slabs with Walls in Modern Large-Panel House Building. *Science and Technique*. 17 (2), 146–156. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-146-156 (in Russian)

Введение

Для эффективного решения проблемы обеспечения населения доступным жильем одним из наиболее перспективных направлений является повышение уровня индустриализации домостроения. Об этом свидетельствует многолетний опыт развития стран Западной Европы. В России, Беларуси и Украине широкое распространение получили сборно-монолитные конструктивные системы многоэтажных зданий («КУБ-2,5» [1], SARET [2], «КАЗАНЬ-XXI век» [3], «Радиусс» [4], «АРКОС» [5]) с высокой долей сборных конструкций. Применение таких систем открывает возможность более полного использования мощностей домостроительных комбинатов, позволяет увеличить качество и снизить стоимость изготовления конструкций, а также сократить сроки строительства.

В последнее время как конкурентоспособная рассматривается бескаркасная крупнопанельная конструктивная система, индустриальная основа которой обеспечивает интенсивный рост объемов строительства. Панельное домостроение в Европе в среднем составляет около 20 %, а в Нидерландах превышает 30 % [6]. Отмечается определенная активизация крупнопанельного строительства и в Украине. Вместе с тем типовые решения панельных домов характеризуются небольшими пролетами конструкций перекрытий (покрытий) и, как следствие, близким расположением несущих стен, ограничивающих варианты планировочных решений. Для преодоления указанного недостатка в качестве плит перекрытий рекомендуется применение сборных многпустотных па-

нелей как опалубочного, так и безопалубочного формирования, что позволит увеличить расстояние между стенами, а также существенно повысить тепло- и звукозащитные свойства дисков перекрытий (покрытий). При этом современные технологии сборного железобетона на основе индустриального крупнопанельного домостроения обеспечивают возможность возведения здания с высоким уровнем эксплуатационных характеристик и инженерно-технических решений, к тому же отличающихся архитектурной выразительностью.

Конструктивное решение шпоночных соединений

Ответственными звеньями перечисленных выше несущих систем являются узлы соединения (опирания) конструкций перекрытий (покрытий) с колоннами, стенами и между собой. С увеличением пролетов повышаются величины усилий в узлах несущей системы, что предопределяет необходимость применения обладающих наиболее высоким сопротивлением срезом шпоночных соединений. Пример их использования – каркасная сборно-монолитная конструктивная система «АРКОС» (Серия Б1.020.1-7), разработанная БелНИИС (Минск, Беларусь) [7]. Опирание многпустотных плит на несущие монолитные ригели осуществляется через бетонные шпонки, образованные путем замоноличивания участков пустот на торцах плит (рис. 1а). Достаточно осторожное отношение к такому соединению объясняется оппонентами необходимостью обеспечения высокого качества работ по устройству опорных узлов [8].

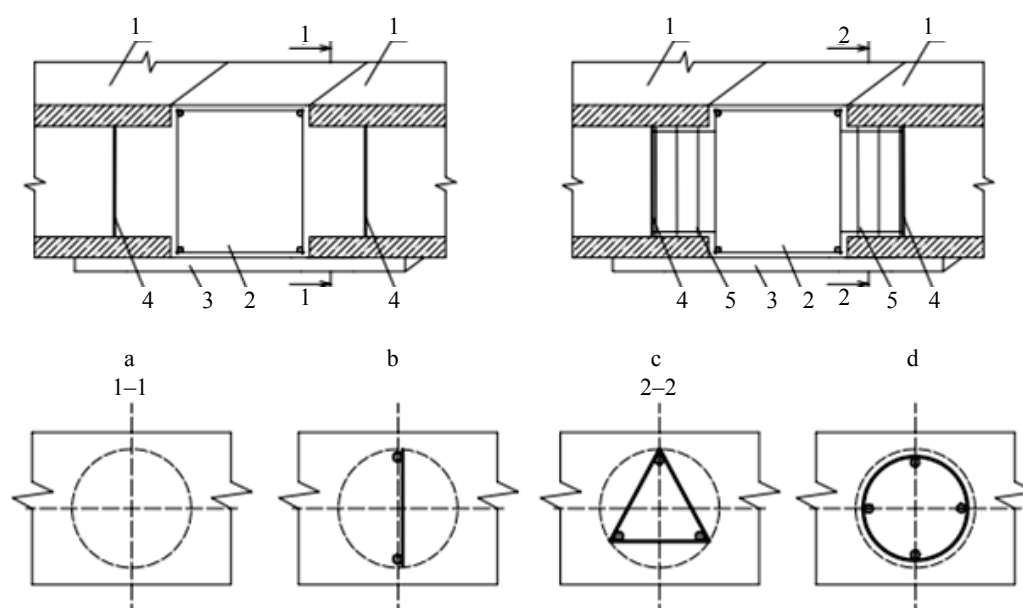


Рис. 1. Узел опирания многопустотных плит на монолитный ригель сборно-монолитного перекрытия через бетонные шпонки (а), армированные плоскими (б) и пространственными в виде полый призмы с треугольником в основе (с) или полого цилиндра (д) каркасами шпонок: 1 – многопустотная плита; 2 – ригель; 3 – опалубка; 4 – арматурный каркас шпонки; 5 – заглушка для ограничения глубины шпонки

Fig. 1. Supporting unit of hollow-core slabs on monolithic girder of precast-monolithic floor by means of concrete keys (a) which are reinforced by flat (b) and spatial (in the form of hollow prism with triangle in the base (c) or hollow cylinder) (d) by key frames: 1 – hollow-core slab; 2 – girder; 3 – formwork; 4 – reinforced key frame; 5 – end cap for limiting key depth

Наиболее эффективным для исключения возможности хрупкого разрушения бетонных элементов является их армирование или обжатие.

На Украине существует ряд патентов, касающихся предложений по армированию опорных шпонок плоскими [9] и пространственными каркасами в виде пустотелых треугольной пирамиды [10] и цилиндра [11] (рис. 1б–д). Последний обеспечивает равную прочность шпонок как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, что особенно актуально для зданий, возводимых в сейсмических районах.

Известно решение сборно-монолитного перекрытия, в котором опорные каркасы плит выступают за их пределы и анкерятся в монолитных ригелях [12]. При этом создается обжатие бетонных шпонок, и несущая способность соединения «плита – ригель» существенно увеличивается.

В [13] предлагается вариант контактно-платформенного стыка многопустотных плит со стеновыми панелями, в котором торцы плит вынесены за плоскость стены. Стык имеет большую несущую способность, чем платформенный, что позволяет уменьшить толщину

несущих стен и является актуальным для зданий повышенной этажности.

Отмеченное свидетельствует об актуальности рассмотрения вопросов создания шпоночных соединений, обладающих высокой прочностью, сейсмостойкостью и пластичностью.

Цель данного исследования – усовершенствование конструктивного решения шпоночного соединения многопустотных плит со стенами в индустриальном крупнопанельном домостроении на основе повышения точности оценки несущей способности и обеспечения заданной сейсмостойкости.

Методика оценивания несущей способности шпоночных стыков

В Полтавском национальном техническом университете (ПолтНТУ) разработана методика расчета прочности шпоночных соединений [14], которая базируется на вариационном методе в теории пластичности бетона [15]. Рассматривается плоское напряженное состояние шпонок, имеющих сечение высотой h_k и шириной b_k . Принимается кинематический механизм разру-

шения шпонки с поверхностью разрыва скоростей (разрушения) ABC (рис. 2), состоящей из двух участков AB и BC с равномерно распределенными по ним напряжениями. При этом площадка AB рассматривается как главная с нормальными растягивающими напряжениями $\sigma_{AB} = f_{ctd}$ и равнодействующей $F_{AB} = f_{ctd} L_{AB} b_k$, а площадка BC нагружена нормальной N и касательной T силами. Поверхность ABC определяется углами α и β . Для части I прямоугольной шпонки, отделенной поверхностью ABC и рассматриваемой как абсолютно жесткое тело, учитывается только поступательное движение относительно неподвижной части II с компонентами скоростей v_x и v_y .

Функционал вариационного принципа виртуальных скоростей для железобетонной шпонки включает составляющие

$$J = J_{BC} + J_{AB} + J_S - Fv_x, \quad (1)$$

где J_{BC} , J_{AB} – соответствуют мощности сил, приложенных на участке локализации необратимых деформаций бетона BC и участке AB ; J_S – отвечает мощности продольной N_S арматуры верхнего яруса площадью сечения A_S и сил N'_S арматуры нижнего яруса площадью сечения A'_S (нагельным эффектом пренебрегаем).

Величина J_{BC} при плоском напряженном состоянии

$$J_{BC} = m \int_{BC} \left[2B \sqrt{1 + \frac{1}{4} (\Delta v_t / \Delta v_n)^2} - 1 \right] \Delta v_n dS, \quad (2)$$

где

$$m = f_{cd} - f_{ctd}; \quad B = \sqrt{\frac{1}{3} [1 + \chi / (1 - \chi)^2]}; \quad \chi = f_{ctd} / f_{cd};$$

$$\Delta v_t = v_x \sin \beta + v_y \cos \beta;$$

$$\Delta v_n = v_x \cos \beta - v_y \sin \beta. \quad (3)$$

При поступательном движении абсолютно жесткой части I относительно части II подынтегральное выражение в (2) постоянно, интеграл легко определяется.

Показатель J_{AB} находится как мощность равнодействующей F_{AB} на нормальной к AB составляющей скорости

$$v_{n,AB} = v_x \cos \alpha + v_y \sin \alpha, \quad (4)$$

и получается равной

$$J_{AB} = f_{ctd} l_{AB} b_k v_{n,AB}. \quad (5)$$

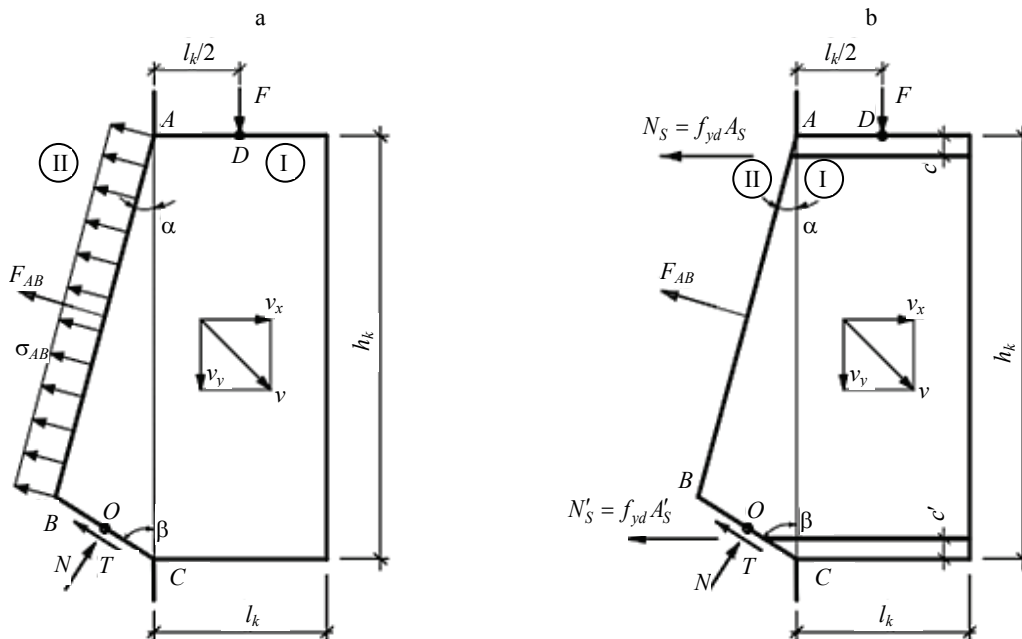


Рис. 2. Кинематический механизм разрушения бетонной (а) и железобетонной (б) шпонок

Fig. 2. Kinematic fracture mechanism for concrete (a) and reinforced concrete (b) keys

Рассматривается решение задачи, пренебрегающее нагельным эффектом арматуры верхнего и нижнего ярусов, физический предел текучести σ_y , которой достигается при разрушении. Величина J_S определяется как мощность усилий в арматуре на соответствующих скоростях

$$J_S = (N_S + N'_S)v_x, \quad (6)$$

$$\text{где } N_S = f_{yd}A_S; \quad N'_S = f_{yd}A'_S. \quad (7)$$

После подстановки в (1) составляющих (2), (5), (6) с учетом (3) и (4), а также выражения длины отрезков AB и BC , получен зависящий от неизвестных углов α , β и скоростей v_x , v_y функционал для железобетонной шпонки. Приравнявая его нулю, определяется зависимость предельной загрузки F от переменных $k = v_x/v_y$, $\operatorname{tg}\alpha$, $\operatorname{tg}\beta$

$$F = \left(m \left[2B\sqrt{(k - \operatorname{tg}\beta)^2 + 0,25(k\operatorname{tg}\beta + 1)^2} - (k - \operatorname{tg}\beta) \right] \cdot \frac{b_k h_k \operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} + f_{ctd}(k + \operatorname{tg}\alpha) \cdot \frac{b_k h_k \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} + f_{yd}(A_S + A'_S)k \right). \quad (8)$$

При поиске минимума функции (8) необходимо использовать дополнительные ограничения в виде условий равновесия моментов сил, приложенных к части I шпонки. Такие ограничения требуются для косвенного учета вращательной компоненты плоского движения час-

ти I шпонки, прямой учет которой весьма усложняет запись функционала, так как скорости и их разрывы на AB и BC становятся переменными. В качестве ограничений используются три условия равновесия моментов относительно характерных точек B , D и O (D и O – точки приложения сил F и N , рис. 2).

При составлении уравнений равновесия используются зависимости для определения нормальных и касательных напряжений на площадке BC поверхности разрушения:

$$\frac{\sigma_u}{m} = 2 \cdot \left(0,5 \pm \frac{B\Delta v_n}{\sqrt{\Delta v_n^2 + 0,25\Delta v_t^2}} \right); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\tau_u}{m} &= \pm \frac{B\Delta v_t}{2\sqrt{\Delta v_n^2 + 0,25\Delta v_t^2}} = \\ &= \pm \frac{B(k\operatorname{tg}\beta + 1)}{2\sqrt{(k - \operatorname{tg}\beta)^2 + 0,25(k\operatorname{tg}\beta + 1)^2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, расчет предельной нагрузки F_u железобетонной шпонки сводится к определению неизвестных из условия минимума функции (8) при соблюдении условий равновесия и последующему вычислению F_u по найденным параметрам k , $\operatorname{tg}\alpha$, $\operatorname{tg}\beta$.

Для определения сопротивления срезу железобетонных шпонок $f_{sh,s}^k = F_u / b_k h_k$ в инженерных расчетах предложены таблицы, как табл. 1 (при $\rho_w = 1\%$).

Таблица 1

К определению $f_{sh,s}^k$ при $A_{sw} = 101 \text{ мм}^2$ (2Ø8 A240C)

For determination of $f_{sh,s}^k$, when $A_{sw} = 101 \text{ мм}^2$ (2Ø8 A240C)

l_k / h_k	$f_{sh,s}^k / f_{cd}$								
	C12/15	C16/20	C20/25	C30/35	C32/40	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
0,2	0,467	0,419	0,383	0,346	0,327	0,308	0,300	0,291	0,283
0,3	0,419	0,373	0,338	0,302	0,285	0,266	0,259	0,250	0,243
0,4	0,378	0,333	0,300	0,266	0,249	0,232	0,225	0,217	0,210
0,5	0,342	0,299	0,268	0,236	0,220	0,204	0,198	0,190	0,184
0,6	0,311	0,270	0,241	0,211	0,196	0,181	0,176	0,169	0,163
0,7	0,284	0,246	0,218	0,190	0,176	0,162	0,157	0,151	0,145
0,8	0,260	0,225	0,198	0,172	0,160	0,147	0,142	0,136	0,131
0,9	0,240	0,206	0,182	0,157	0,146	0,134	0,129	0,124	0,119
1,0	0,222	0,190	0,167	0,144	0,134	0,122	0,118	0,113	0,109

Материалы экспериментальных исследований

В пределах одной из серий комплексных экспериментальных исследований авторов [16] изучалось влияние армирования на прочность шпонок, разрушающихся путем среза. Образцы имели высоту $h_k = 200$ мм и толщину $b_k = 150$ мм. Использовались нагружающие устройства шириной $l_k = 50$ мм, что соответствовало соотношению размеров шпонок $l_k/h_k = 0,25$. В плоскости среза шпонки армировались поперечными стержнями класса А240С. Применялись каркасы двух типов: с расположением арматуры в один ярус посередине высоты шпонки и в два яруса. Последний вариант соответствует армированию узла опирания многпустотных плит на стеновые панели. Показатель армирования ρ_w изменялся в пределах 0,34–1,03 %. Арматура надежно анкерилась в боковых частях образцов. Использовался тяжелый и керамзитобетон. Шифр опытных образцов содержит (рис. 3): ША – шпонки армированные; 0,25 – отношение l_k/h_k ; П – прямоугольный профиль; ВП или Л – тяжелый или легкий бетон; процент армирования ρ_w ; 1, 2 – одно- или двухуровневое расположение арматуры.

Образцы изготавливались и испытывались в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов ПолтНТУ на прессе гидравлическом ПГ-125.

Все образцы имели похожий характер трещинообразования (рис. 3). При уровне нагрузки $(0,5–0,6)\nu_u$ образовывались начальные, едва заметные трещины в растянутой зоне под углом $10^\circ–20^\circ$ к вертикали. Поверхность разрушения определялась при уровне $(0,8–0,9)\nu_u$, очерчивалась по кривой, близкой к вертикали, и состояла из сжатых и растянутых участков.

Увеличение армирования приводило к росту размеров зон сжатия, в которых по результатам обработки показаний тензорезисторов зафиксирована локализация пластической деформации. Полные деформации бетона в сжатых зонах достигали уровня $\varepsilon_c = (100–300) \cdot 10^{-5}$, причем большие значения имели место в образцах с расположением рабочей арматуры в двух уровнях по высоте. Разнесение арматуры привело к значительному увеличению пластических деформаций как легкого (рис. 4), так и тяжелого бетона повышенной прочности [17].

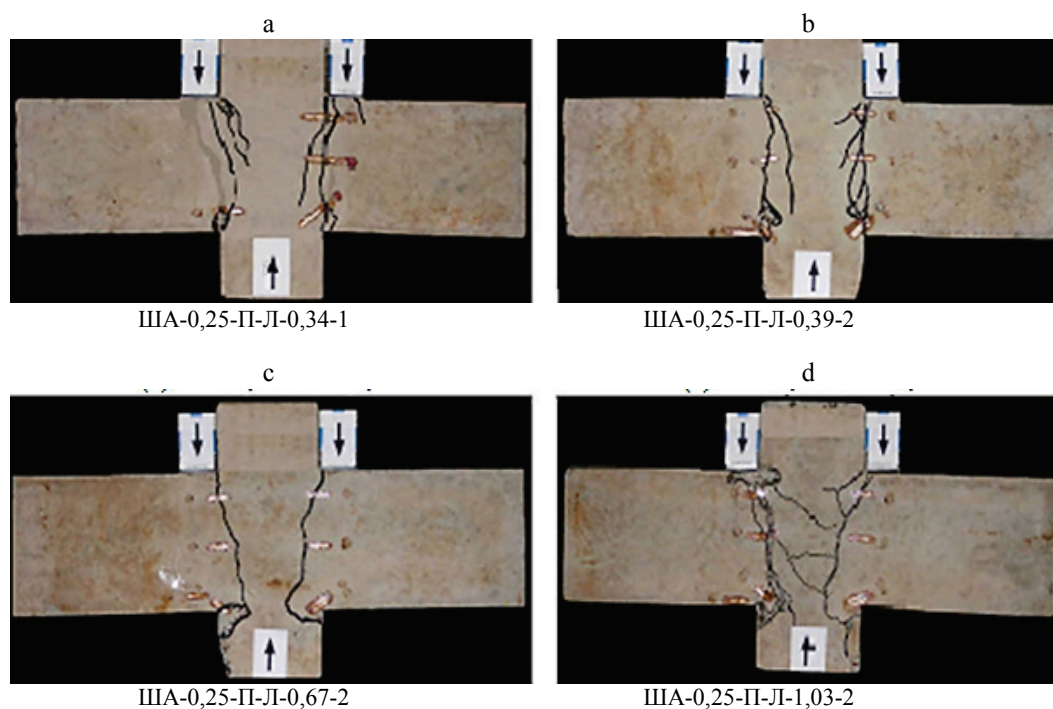


Рис. 3. Характер разрушения образцов с одно- (а) и двухуровневым (b–d) армированием

Fig. 3. Fracture behavior of specimens with single- (a) and two-level (b–d) reinforcement

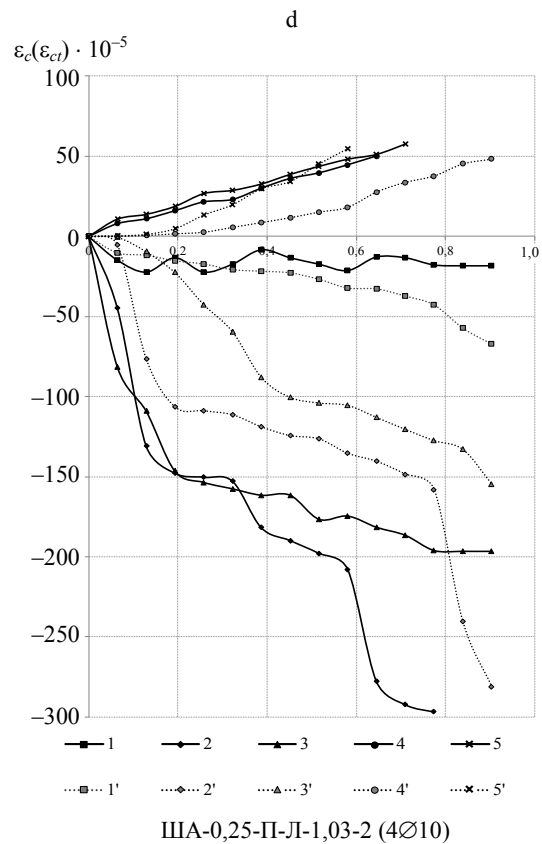
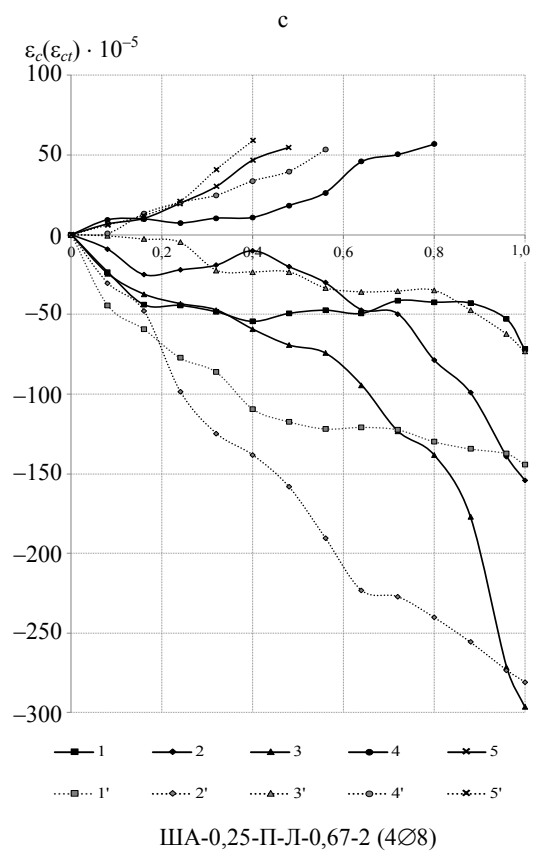
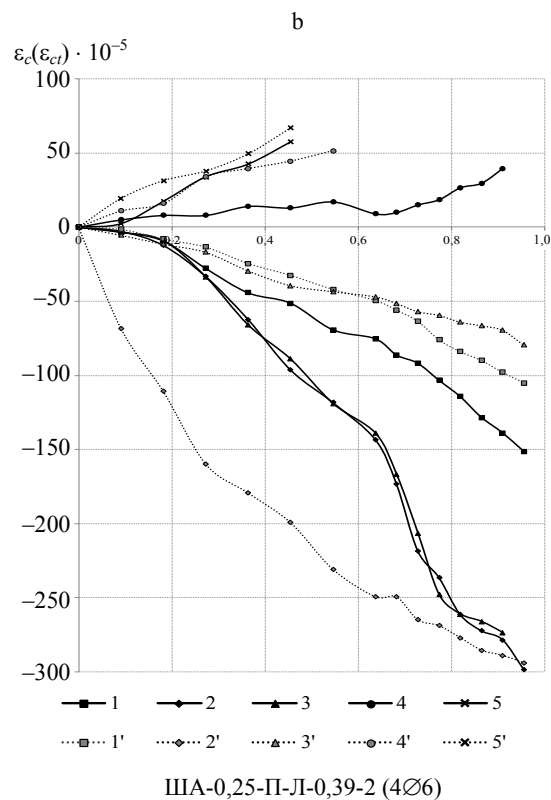
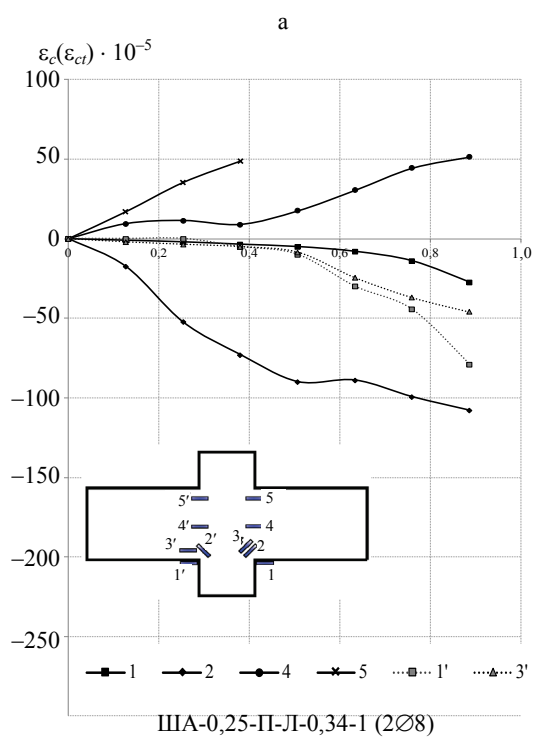


Рис. 4. Зависимость $\varepsilon_c(\varepsilon_{ct}) - \nu/\nu_u$ для образцов с одно- (а) и двухъярусным (б-д) армированием

Fig. 4. Relationship $\varepsilon_c(\varepsilon_{ct}) - \nu/\nu_u$ for specimens with single- (a) and two-level (b-d) reinforcement

Включение арматурных стержней в работу происходило до появления первых трещин. При двухъярусном расположении арматуры стержни верхнего ряда включались в работу на более ранних стадиях нагружения, чем в аналогичных образцах, армированных посередине сечения. После образования трещин фиксировался интенсивный рост деформаций арматуры. В образцах с четырьмя стержнями, в расположенной у верхней (растянутой) грани шпонки арматуре установлен более интенсивный рост деформаций, чем в стержнях, которые находятся посередине или в нижней (сжатой) части образца.

Опытные образцы разрушались вблизи вертикальной плоскости среза. Разрушение сопровождалось интенсивным ростом деформаций и смещением боковых частей образцов относительно центральной.

Данные о параметрах и предельной нагрузке опытных образцов приведены в табл. 2.

Напряжения в арматуре, пересекающей плоскость сдвига, на стадии разрушения достигали предела текучести, следовательно, армирование до $\rho_w = 1\%$ можно считать эффективным.

С увеличением процента армирования в пределах от 0,34 до 1,03 прочность образцов возрастала до двух раз.

Наблюдаемая в экспериментах картина разрушения шпонок подтверждает принятые при расчетах кинематические схемы, а сравнительный анализ опытных и теоретических значений предельной нагрузки указывает на их сходимость.

Конструктивное решение узла соединения плит перекрытий со стенами

Предложен контактно-платформенный шпоночный стык панельных стен с вынесенными за их грани зонами опирания круглопустотных плит (рис. 5). Шпонки образуются при замоноличивании тяжелым бетоном участков пустот на торцах плит.

Особенности конструктивного решения соединения по сравнению с предложенным в [13] вариантом состоят в использовании арматурных каркасов в виде полых цилиндров и корректировке глубины шпонок по результатам выполненного авторами расчета несущей способности.

Таблица 2

Характеристики опытных образцов
Characteristics of test specimens

Шифр образца	f_c/f_{ct} , МПа	Поперечное армирование	ρ_w , %	Предел текучести арматуры f_y , МПа	Предельная нагрузка N_u , кН	Относительное сопротивление срезу $f_{sh,s}^k/f_c$
ША-0,25-П-Л-0,34-1	10/1,19	2Ø8	0,34	260	158	0,26
ША-0,25-П-Л-0,39-2		4Ø6	0,39	280	220	0,36
ША-0,25-П-Л-0,76-1		2Ø12	0,76	250	258	0,42
ША-0,25-П-Л-0,67-2		4Ø8	0,67	260	262	0,43
ША-0,25-П-Л-1,03-1		2Ø14	1,03	240	310	0,51
ША-0,25-П-Л-1,03-2		4Ø10	1,03	255	320	0,53
2ША-0,25-П-Л-0,34-1	23,54/1,51	2Ø8	0,34	260	260	0,17
2ША-0,25-П-Л-0,39-2		4Ø6	0,39	280	320	0,23
2ША-0,25-П-Л-0,76-1		2Ø12	0,76	250	400	0,28
2ША-0,25-П-Л-0,67-2		4Ø8	0,67	260	431	0,29
2ША-0,25-П-Л-1,03-1		2Ø14	1,03	240	429	0,28
2ША-0,25-П-Л-1,03-2		4Ø10	1,03	255	470	0,31
ША-0,25-П-ВП-0,34-1	56,9/2,65	2Ø8	0,34	260	480	0,15
ША-0,25-П-ВП-039-2		4Ø6	0,39	260	550	0,17
ША-0,25-П-ВП-0,34-1		2Ø8	0,34	280	600	0,17
ША-0,25-П-ВП-0,39-2		4Ø6	0,39	280	590	0,18

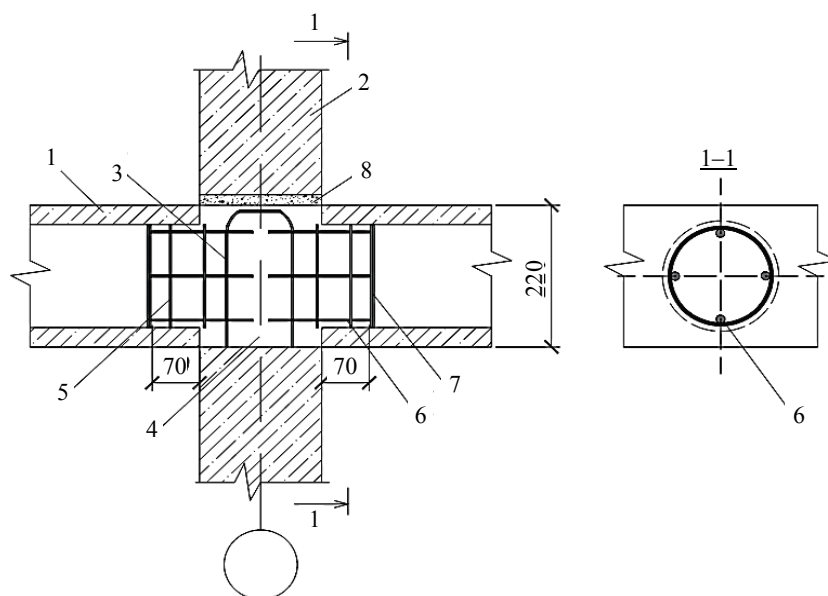


Рис. 5. Контактно-платформенный стык сборных стен с вынесенными за площадь стены зонами опирания многопустотных плит: 1 – многопустотная плита; 2 – стеновая панель; 3 – арматурный выпуск из стеновой панели; 4 – бетон замоноличивания; 5 – шпонка; 6 – арматурный каркас шпонки; 7 – заглушка; 8 – цементно-песчаный раствор

Fig. 5. Contact-platform joint of prefabricated walls with supporting zones of hollow-core slabs which are carried out beyond wall space: 1 – hollow-core slab; 2 – wall panel; 3 – dowel from wall panel; 4 – grouting concrete; 5 – key; 6 – reinforced key frame; 7 – end cap; 8 – sand grout

Оценка влияния круглого поперечного сечения шпонки на ее несущую способность осуществляется путем учета характера распределения усилий при передаче нагрузки и эллиптической формы поверхности разрушения, которые обосновывают введение понижающего коэффициента $k = 0,9$ [18].

К зданиям, возводимым на потенциально сейсмически активных территориях, предъявляются требования обеспечения сейсмостойкости. В связи с этим узлы соединений несущих элементов конструктивных систем должны воспринимать как вертикальные, так и горизонтальные усилия, что обеспечивается армированием шпонок цилиндрическими каркасами с расположением арматуры в двух плоскостях.

Исходные данные для расчета: плита длиной 7,2 м и шириной 1,2 м имеет 6 пустот, площадь круглого поперечного сечения и глубина шпонки $A_{sh}^k = 2 \cdot 10^4 \text{ мм}^2$ и $l_k = 70 \text{ мм}$; бетон класса прочности на сжатие C20/25 ($f_{cd} = 14,5 \text{ МПа}$; $f_{ctd} = 1,0 \text{ МПа}$); рабочая арматура шпонки 4Ø6A240C ($f_{yd} = 229 \text{ МПа}$; $\rho_w = 0,57 \%$). Расчет проводится методом Ньютона.

В результате получено: сопротивление срезу шпонки эквивалентного квадратного попе-

речного сечения $f_{sh,s}^k = 3,1 \text{ МПа}$ ($f_{sh,s}^k / f_{cd} = 0,214$), которое при расчете по европейским нормам [19] составляет 0,115; усилие, воспринимаемое одной шпонкой, $V_{sh}^k = k f_{sh,s}^k A_{sh}^k = 0,9 \cdot 3,1 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot (10^{-3}) = 56 \text{ кН}$; при предельном расчетном значении нагрузки 14 кПа поперечная сила на опоре $V_{Ed} = 59 \text{ кН}$.

Таким образом, для обеспечения несущей способности и надежной работы соединения плит перекрытий со стеновыми панелями необходимо на каждом опорном участке предусмотреть две шпонки. При проектировании плит под большее значение расчетной нагрузки количество армированных шпонок в соединении увеличивается.

ВЫВОДЫ

1. Использование многопустотных панелей в качестве плит перекрытий (покрытий) промышленных крупнопанельных зданий позволит увеличить расстояние между стенами, освободить внутреннее пространство, улучшить планировочное решение помещений, повысить их тепло- и звукозащиту.

2. Для обеспечения совместной работы стеновых панелей с многопустотными плитами перекрытий рекомендуется применять шпоночные соединения, имеющие повышенную несущую способность на срез.

3. Оценивание прочности шпоночных соединений предлагается осуществлять на основе методики расчета несущей способности бетонных и железобетонных элементов при действии срезающих сил, разработанной с использованием вариационного метода в теории пластичности бетона. Методика позволяет учесть специфику напряженно-деформированного состояния шпонок и получила экспериментальное подтверждение.

4. Предложено конструктивное решение узла соединения плит перекрытий со стенами сейсмостойких панельных зданий с круглой формой поперечного сечения шпонок при отношении их размеров и армировании, обеспечивающих повышенную прочность в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

5. Для дальнейшего развития крупнопанельного домостроения перспективным направлением является комплексное применение армированного керамзитобетона для создания облегченных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Унифицированная система сборно-монолитного безригельного каркаса Серия КУБ-2,5: рабочий проект в 9 вып. / Научно-проектно-строительное объединение монолитного домостроения (НСПО «МОНОЛИТ»). М., 1990. Вып. 1-1: Основные положения по расчету, монтажу и компоновке зданий.
2. Каркасная несущая система SARET [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kgasuclan.ru/download/80/242>.
3. Мустафин, И. И. Универсальная несущая сборно-монолитная каркасная система «КАЗАНЬ-XXI век» / И. И. Мустафин. Казань: ООО «Проектно-конструкторская фирма «Каркас», 2005. 21 с.
4. Семченков, А. С. Обоснование регионально-адаптированной индустриальной универсальной строительной системы «Радиусс» / А. С. Семченков // Бетон и железобетон. 2008. № 4. С. 1–6.
5. Новая универсальная каркасная система многоэтажных зданий / А. И. Мордич [и др.] // Бетон и железобетон. 1999. № 1. С. 2–4.
6. Відновлення та розвиток панельного домобудівництва – шлях до масового спорудження доступного та соціального житла в Україні / О. М. Галінський [та інш.] // Новітні технології в будівництві. 2012. Т. 23–24, № 1–2. С. 58–60.
7. Типовые строительные конструкции, изделия и узлы. Сер. Б1.020.1-7. Сборно-монолитная каркасная система МВБ-01 с плоскими перекрытиями для зданий различного назначения: БелНИИС. Минск: Минсктипроект, 1999.
8. Гуров, Е. П. Анализ и предложения по конструктивной надежности и безопасности сборно-монолитных перекрытий в каркасе серии Б1.020.1-7 (в системе «АРКОС») / Е. П. Гуров // Бетон и железобетон. 2012. № 2. С. 6–11.
9. Спосіб улаштування збірно-монолітного залізобетонного перекрыття: пат. на корисну модель 23418: МПК-2011.01 E04G 23/00 / І. І. Куліченко, М. В. Савицький. Опубл. 25.05.2007.
10. Спосіб улаштування збірно-монолітного залізобетонного перекрыття: пат. на корисну модель 23425: МПК-2011.01 E04G 23/00 / В. С. Магала, М. В. Савицький. Опубл. 27.12.2010.
11. Вузол з'єднання плит з ригелем у збірно-монолітних перекрыттях: пат. на корисну модель № 104986: МПК (2006.01) E04B 1/38 / О. О. Довженко, В. В. Погрібний, Ю. В. Чурса. Опубл. 25.02.2016.
12. Варламов, А. А. Анализ экспериментальных данных исследования работы сборно-монолитного перекрытия с новым вариантом шпоночного стыка / А. А. Варламов, О. В. Никитина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2015. Т. 15, № 3. С. 20–25.
13. Блажко, В. П. О применении многопустотных плит безопалубочного формования в панельных и каркасных зданиях / В. П. Блажко // Жилищное строительство. 2015. № 10. С. 7–10.
14. Довженко, О. О. Методика розрахунку шпонкових з'єднань залізобетонних елементів / О. О. Довженко, В. В. Погрібний, Ю. В. Чурса // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. Теорія і практика будівництва. 2013. № 755. С. 111–117.
15. Митрофанов, В. П. Теория идеальной пластичности как элементарная механика псевдопластического предельного состояния бетона: основы, ограничения, практические аспекты, совершенствование / В. П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. Киев: Техника, 2006. Вып. 72. С. 6–26.
16. Довженко, О. О. Міцність шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів: експериментальні дослідження / О. О. Довженко. Полтава: ПолтНТУ ім'я Ю. Кондратюка, 2015. 181 с.
17. Довженко, О. О. Про можливість застосування теорії пластичності до розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону / О. О. Довженко, В. В. Погрібний, О. О. Куриленко // Коммунальное хозяйство городов: научн.-техн. сб. Киев: Техника, 2012. Вып. 105. С. 74–82.
18. Довженко, О. А. Расчет прочности шпоночных соединений элементов перекрытия конструктивной системы «АРКОС» / О. А. Довженко, В. В. Погребной, Ю. В. Чурса // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 70–74.

19. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1-1:2004 (E). Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 225 p.

Поступила 16.06.2017

Подписана в печать 30.08.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Scientific and Design Construction Association for Cast-in-Place Construction "MONOLIT" (1990) *Standardized System of Prefabricated Monolithic Jointless Ossature Wit-hout Girders. Fundamental Principles for Building Calculation, Installation and Arrangement. Series KUB-2.5: Working Design. Is. 1-1*. Moscow (in Russian).
2. *Framed Bearing Structure SARET*. Available at: <http://www.kgasuclan.ru/download/viewdownload/80/242>.
3. Mustafin I. I. (2005) *Universal Bearing Prefabricated Monolithic System "KAZAN-XXI Century"*. Kazan, LLC Design and Research Firm "Karkas". 21 (in Russian).
4. Semchenkov A. S. (2008) Substantiation of Regionally-Adapted Industrial Universal Construction System "Radiuss". *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (4), 1-6 (in Russian).
5. Mordich A. I., Vigdorchik R. I., Belevich V. N., Zalesov A. S. (1999) New Universal Frame System for Multi-Storey Buildings. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (1), 2-4 (in Russian).
6. Galins'kii O. M., Ivanenko V. O., Franiys'kii A. A., Omel'chuk V. P. (2012) Renewal and Development of Panel Housebuilding is the Way to Mass Construction of Affordable and Social Housing in the Ukraine. *Novitny Tekhnologii v Budivnitstvi* [New Technologies in Construction], 23-24 (1-2), 58-60 (in Ukrainian).
7. Belarusian Scientific-Research Institute of Construction (1999) *Unified Construction Structures, Items and Units. Series B1.020.1-7. Prefabricated Monolithic Ossature System MBE-01 with Flat Slab for Buildings of Various Application*. Minsk, Minsktipproyekt Publ. (in Russian).
8. Gurov E. P. (2012) Analysis and Proposals for Structural Reliability and Safety of Prefabricated Monolithic Floor Slab Panels in Ossature of Series B1.020.1-7 (in the System "ARKOS"). *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (2), 6-11 (in Russian).
9. Kulichenko I. I., Savitsky M. V. (2007) Method for Installing Prefabricated Monolithic Reinforced Concrete Slab. Useful Model Patent 23418 (in Ukrainian).
10. Magala V. S., Savitsky M. V. (2010) Method for Installing Prefabricated Monolithic Reinforced Concrete Slab. Useful Model Patent 23425 (in Ukrainian).
11. Dovzhenko O. O., Pogribniy V. V., Tchursa Yu. V. (2016) Connection Joint of Plates with Girder in Prefabricated Monolithic Slabs. Useful Model Patent No 104986 (in Ukrainian).
12. Varlamov A. A., Nikitina O. V. (2015) Analysis of Experimental Data Pertaining to Investigations on Operation of Prefabricated Monolithic Slab with New Variant of Splined Joint. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya "Stroitel'stvo i Arkhitektura" = Bulletin of South Ural State University. Series Construction Engineering and Architecture*, 15 (3), 20-25 (in Russian).
13. Blazhko V. P. (2015) On Application of Hollow Core Slabs while Using Off-Shuttering Remoulding In Panel and Framed Buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Building Construction], (10), 7-10 (in Russian).
14. Dovzhenko O. O., Pogribniy V. V., Tchursa Yu. V. (2013) Methodology for Calculation of Keyed Joints for Reinforced Concrete Elements. *Visnik Natsional'nogo Universitetu "Lvivs'ka Politekhnik"*. *Teoriya i Praktika Budivnitstva* [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Theory and Practices of Construction], (755), 111-117 (in Ukrainian).
15. Mitrofanov V. P. (2006) Theory of Perfect Plasticity as Elementary Mechanics for Pseudoplastic Limit State of Concrete: Fundamentals, Limitations, Practical Aspects, Improvement. *Municipal Economy of Cities. Scientific and Technical Collected Book*. Kiev, Tekhnika Publ., (72), 6-26.
16. Dovzhenko O. O. (2015) *Strength of Keyed Joints in Concrete and Reinforced Concrete Elements: Experimental Investigations*. Poltava, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. 181 (in Ukrainian).
17. Dovzhenko O. O., Pogribniy V. V., Kurilenko O. O. (2012) On possibility to Apply Plasticity Theory for Calculation of Strength for Elements Made of High-Strength Concrete. *Municipal Economy of Cities. Scientific and Technical Collected Book*. Kiev, Tekhnika Publ., (105), 74-82 (in Ukrainian).
18. Dovzhenko O. O., Pogribniy V. V., Tchursa Yu. V. (2017) Calculation of Strength for Keyed Joints in Slab Elements of Structural System "ARKOS". *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, (2), 70-74 (in Russian).
19. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1-1:2004 (E). Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 225.

Received: 16.06.2017

Accepted: 30.08.2017

Published online: 30.03.2018

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-157-164

УДК 666.157.6

Некоторые способы экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов

Инж. А. С. Шибeko¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Предложены и рассмотрены два конструктивных способа экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов с различным газовым заполнением межстекольного пространства. Первый заключается в изготовлении их определенной толщины, которая находится исходя из особенностей конвективного теплообмена в замкнутом контуре. Величина коэффициента теплообмена зависит от свойств заполняющего объем камеры газа (коэффициентов теплопроводности, объемного расширения, кинематической вязкости и температуропроводности), разности температур на границах прослойки и ее толщины. Показано, что при увеличении толщины газового слоя коэффициент конвективного теплообмена сначала уменьшается до определенного значения, а затем, незначительно увеличившись, практически остается постоянным. В связи с этим были определены оптимальные толщины заполняемых прослоек для наиболее распространенных в производстве газов (осушенный воздух, аргон, криптон, ксенон), а также для углекислого газа. Производство стеклопакетов с большей толщиной газовой камеры практически не приведет к увеличению сопротивления теплопередаче, однако повысит расход газа. Второй способ экономии при производстве связан с использованием в качестве заполнителя межстекольного пространства диоксида углерода CO₂, который имеет некоторые преимущества по сравнению с другими газами (малая стоимость из-за распространенности, нетоксичность, прозрачность для видимого света и поглощение тепловых лучей). Расчеты показали, что применение углекислого газа позволит увеличить сопротивление теплопередаче однокамерного стеклопакета на 0,05 м²·К/Вт (при степени черноты внутреннего стекла 0,837) или на 0,16 м²·К/Вт (при коэффициенте эмиссии 0,1) по сравнению со стеклопакетом, камера которого заполнена осушенным воздухом.

Ключевые слова: стеклопакет, сопротивление теплопередаче, газовая прослойка, конвективный теплообмен, теплообмен излучением

Для цитирования: Шибeko, А. С. Некоторые способы экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов / А. С. Шибeko // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 157–164. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-157-164

Some Methods for Saving Heat Energy while Manufacturing Vertical Insulating Glass Units

A. S. Shybeka¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper proposes and considers two constructive methods for saving heat energy while manufacturing vertical insulating glass units with various gas filling of inter-glass space. The first method presupposes manufacturing of insulating glass units having specific thickness which is calculated in accordance with specific features of convective heat exchange in the closed loop circuit. Value of the heat-exchange coefficient depends on gas properties which is filling a chamber capacity (coefficients of thermal conductivity, volumetric expansion, kinematic viscosity, thermometric conductivity), temperature difference on the boundary of interlayer and its thickness. It has been shown that while increasing thickness of gas layer

Адрес для переписки

Шибeko Александр Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-29
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Shybeka Alexander S.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-29
tg_v_fes@bntu.by

convective heat exchange coefficient is initially decreasing up to specific value and then after insignificant increase it practically remains constant. In this connection optimum thicknesses of filled inter-layers for widely-spread gas in production (dry air, argon, krypton, xenon) and for carbon dioxide have determined in the paper. Manufacturing of insulating glass units with large thickness of gas chamber practically does not lead to an increase in resistance to heat transfer but it will increase gas consumption rate. The second industrial economic method is interrelated with application of carbon dioxide CO₂ as a filler of inter-glass space which has some advantages in comparison with other gases (small cost due to abundance, non-toxicity, transparency for visual light and absorption of heat rays). Calculations have shown that application of carbon dioxide will make it possible to increase resistance to heat transfer of one-chamber glass unit by 0.05 m²·K/W (with emissivity factor of internal glass – 0.837) or by 0.16 m²·K/W (with emission factor – 0.1) in comparison with the glass unit where a chamber is filled with dry air.

Keywords: insulating glass unit, resistance to heat transfer, gas interlayer, convective heat exchange, radiant heat transfer

For citation: Shybeka A. S. (2018) Some Methods for Saving Heat Energy while Manufacturing Vertical Insulating Glass Units. *Science and Technique*. 17 (2), 157–164. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-157-164 (in Russian)

В настоящее время на мировом строительном рынке, и в частности на белорусском, среди светопрозрачных заполнений световых проемов (окон, балконных, наружных дверей, светопрозрачных фасадов) доминируют стеклопакеты. Стеклопакетом (рис. 1) называются соединенные между собой с помощью рамки листы стекла, образующие герметичные камеры, заполненные осушенным воздухом или инертными газами (аргон, криптон и др.). Для изготовления стеклопакетов применяются разнообразные виды стекла: листовое, многослойное, солнцезащитное, энергосберегающее с твердым и мягким покрытиями и др.

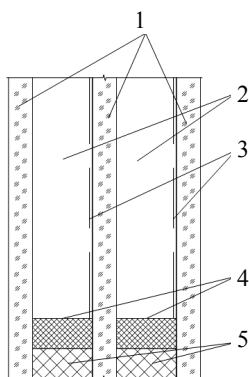


Рис. 1. Конструкция двухкамерного энергосберегающего стеклопакета: 1 – стекло; 2 – газовая прослойка; 3 – рекомендуемое расположение низкоэмиссионного покрытия; 4 – дистанционная рамка; 5 – герметик

Fig. 1. Design of double-chamber energy-saving insulating glass unit: 1 – glass; 2 – gas interlayer; 3 – recommended location of low emission coating; 4 – distance frame; 5 – sealing agent

Политика энергосбережения, проводимая во всем мире, диктует жесткие требования к теплозащитным свойствам наружных ограждающих конструкций. Для заполнений световых

проемов жилых, общественных и административных зданий сопротивление теплопередаче в Республике Беларусь должно составлять не менее 1,0 м²·K/Вт [1], в Российской Федерации – от 0,3 до 0,8 м²·K/Вт (в зависимости от градусо-суток отопительного периода) [2]. Для получения данного значения, наряду с применением новых профильных систем и материалов для непрозрачных частей окна, необходимо использование стеклопакетов, в которых имеются энергосберегающие стекла с низкоэмиссионным «мягким» селективным покрытием (И-стекла), а межстекольные пространства заполняются инертными газами. В настоящее время выпускаются стеклопакеты с толщиной газовой прослойки от 6 до 20 мм.

Сопротивление теплопередаче стеклопакета $R_{\tau}^{ст}$, м²·K/Вт, рассчитывается по выражению [3]

$$R_{\tau}^{ст} = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_{k=1}^m R_k + \frac{1}{\alpha_{н}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{в}$, $\alpha_{н}$ – коэффициент теплообмена у внутренней и наружной поверхностей стеклопакета, Вт/(м²·K); δ_i – толщина каждого из слоев остекления, м; λ_i – коэффициент теплопроводности слоя остекления, Вт/(м·K) (для обычного натрий-кальциевого стекла $\lambda_i = 1,0$ Вт/(м·K)); n – количество стекол; R_k – термическое сопротивление газовых прослоек, м²·K/Вт; m – количество межстекольных пространств.

Так как термическое сопротивление стекол $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ весьма мало, а величины $\alpha_{в}$ и $\alpha_{н}$ постоянны, сопротивление теплопередаче стеклопакета в основном определяется термическим сопротивлением газовых прослоек, для каждой из которых R_k находится как

$$R_k = \frac{1}{\alpha_{k,к} + \alpha_{k,л}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{k,к}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи газовой прослойки, Вт/(м²·К); $\alpha_{k,л}$ – коэффициент лучистой теплоотдачи межстекольного пространства, Вт/(м²·К).

Поскольку большинство газов, используемых при заполнении прослоек, является одно- и двухатомными, т. е. диатермическими для тепловых лучей, то лучистая составляющая теплообмена определяется оптическими свойствами стекол (коэффициентами эмиссии) и не зависит от толщины газовой прослойки.

Таким образом, величина межстекольного пространства влияет только на конвективную составляющую. Значение коэффициента конвективного теплообмена определяется исходя из критерия Нуссельта Nu по выражению [4, 5]

$$\alpha_k = \frac{Nu\lambda}{l}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К); l – характерный размер, м.

Для вертикальных стеклопакетов характерным размером будет служить толщина газовой прослойки δ , м. Число Нуссельта Nu_δ будет зависеть от физических свойств среды и режима течения в прослойке, который определяется значением критерия Рэлея Ra_δ

$$Ra_\delta = \frac{g\beta_r \Delta t \delta^3}{\nu_r a_r}, \quad (4)$$

где β_r – температурный коэффициент объемного расширения, 1/К, при рассмотрении газа прослойки как идеального можно рассчитать как

$$\beta_r = \frac{1}{T_{ср}}, \quad (5)$$

$T_{ср}$ – средняя температура газа в межстекольном пространстве, К; Δt – разность температур на границах прослойки, °С; ν_r , a_r – коэффициент кинематической вязкости, м²/с, и температуропроводности, м²/с, газа прослойки при средней температуре газа в прослойке $T_{ср}$.

Для определения Nu_δ , согласно [3, 6], используется следующее выражение:

$$Nu_\delta = A Ra_\delta^n, \quad (6)$$

где A , n – эмпирические коэффициенты, зависящие от ориентации в пространстве стеклопакета:

– для вертикального остекления $A = 0,035$ и $n = 0,380$;

– для горизонтального остекления при направлении теплового потока снизу вверх $A = 0,16$ и $n = 0,28$;

– для наклонного остекления при направлении теплового потока вверх и угле наклона 45° $A = 0,10$ и $n = 0,31$.

Если значение числа Нуссельта получилось меньше единицы, а также для горизонтального остекления при потоке теплоты сверху вниз принимается $Nu_\delta = 1$.

Таким образом, максимальное значение критерия Рэлея, при котором число Нуссельта будет равно единице, составляет

$$Ra_\delta = A^{-1/n}. \quad (7)$$

Подставив указанные выше данные для вертикального стеклопакета, получим $Ra_\delta^{opt} = 0,035^{-1/0,38} = 6782,7$.

Член ASHRAE (American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers – Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха) Джон Райт предложил иные аппроксимирующие зависимости для определения Nu_δ при различных значениях Ra_δ для вертикальных остеклений [7]:

– для $Ra_\delta \leq 10000$

$$Nu_\delta = 1 + 1,75967 \cdot 10^{-10} Ra_\delta^{2,2984755}; \quad (8)$$

– для $10000 < Ra_\delta \leq 50000$

$$Nu_\delta = 0,028154 Ra_\delta^{0,41399}; \quad (9)$$

– для $Ra_\delta > 50000$

$$Nu_\delta = 0,0673838 Ra_\delta^{1/3}. \quad (10)$$

Согласно данным исследованиям, минимальное значение коэффициента конвективного теплообмена для вертикального стеклопакета достигается при числе Рэлея $Ra_\delta^{opt} = 10000$.

Значения коэффициента конвективного теплообмена α_k , рассчитанные для вертикальной воздушной прослойки при разности температур на границах 25°C и средней температуре в прослойке 0°C , представлены на рис. 2. Ли-

ния 1 соответствует методике СТБ EN 673 [3], линия 2 – согласно аппроксимационным зависимостям Дж. Райта.

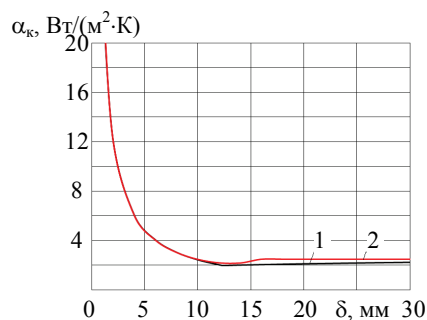


Рис. 2. Расчетные значения коэффициента α_k для вертикального стеклопакета

Fig. 2. Calculated values of coefficient α_k for vertical insulating glass unit

Как видно из графиков рис. 2, до определенного значения толщины они совпадают, а далее возникает локальный минимум, после которого значение коэффициента немного возрастает и становится практически постоянным при увеличении толщины воздушной прослойки. Тол-

щина, при которой наблюдается минимум коэффициента конвективного теплообмена, в дальнейшем будет называться оптимальной $\delta_{\text{опт}}$, м. Ее величину можно найти исходя из (4)

$$\delta_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{Ra_{\delta}^{\text{опт}} \nu_r a_r}{g \beta_r \Delta t}}. \quad (11)$$

Для определения оптимальной толщины примем, что в однокамерном стеклопакете средняя температура в прослойке составляет 0°C (273 K), а разность температур $\Delta t = 25^\circ\text{C}$. Для двухкамерного стеклопакета примем, что средняя температура в первой (внутренней) камере 10°C , во второй (наружной) – минус 10°C , а разность температур в каждой из камер $\Delta t = 15^\circ\text{C}$. Значения оптимальных толщин прослоек, определенные при оптимальных числах Рэлея $Ra_{\delta}^{\text{опт}} = 6782,7$ (согласно СТБ EN 673 [3]) и $Ra_{\delta}^{\text{опт}} = 10000$ (из статьи Дж. Райта), заполненных различными газами, а также соответствующие данным толщинам коэффициенты конвективного теплообмена приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальная толщина газовой прослойки стеклопакетов и соответствующий ей минимальный коэффициент конвективного теплообмена

Optimum thickness of gas interlayer in insulating glass units and corresponding minimum coefficient of convective heat transfer

Газ	$T_{\text{ср}}, \text{ K}$	$\lambda_{\text{г}} \cdot 10^3, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	$c, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\nu_{\text{г}} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$a_{\text{г}} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{опт}}, \text{ мм}$	$\alpha_{\text{к}}^{\min}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$	$\delta_{\text{опт}}, \text{ мм}$	$\alpha_{\text{к}}^{\min}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$
							СТБ EN 673		Дж. Райт	
Однокамерный стеклопакет										
Воздух	273	24,16	1008	13,40	18,77	25	12	2,01	14	2,18
Аргон	273	16,34	519	11,92	17,87	25	12	1,40	13	1,55
Криптон	273	8,70	245	6,31	9,62	25	8	1,13	9	1,44
Ксенон	273	5,12	161	3,65	5,39	25	5	1,02	6	1,08
Углекислый газ	273	14,68	822	6,95	9,09	25	8	1,89	9	2,40
Двухкамерный стеклопакет										
Воздух	283	24,96	1008	14,29	20,10	15	16	1,61	18	2,05
	263	23,36	1008	12,53	17,48	15	14	1,69	16	2,15
Аргон	283	16,84	519	12,74	19,10	15	15	1,15	17	1,46
	263	15,84	519	11,14	16,69	15	13	1,22	15	1,54
Криптон	283	9,00	245	6,74	10,32	15	10	0,93	11	1,04
	263	8,42	245	5,90	8,97	15	9	0,98	10	1,25
Ксенон	283	5,29	161	3,91	5,78	15	7	0,80	8	1,01
	263	4,94	161	3,39	5,01	15	6	0,84	7	1,07
Углекислый газ	283	15,43	833	7,46	9,77	15	10	1,57	11	1,74
	263	13,89	811	6,45	8,40	15	9	1,61	10	2,04
Примечание. Значения теплофизических свойств воздуха, аргона, криптона и ксенона приняты по [3], а углекислого газа определены по [8].										

Как видно из табл. 1, толщины практически совпадают (отличие составляет 1–2 мм). Сравнивая с аналогичными данными из [9], ближе получаются значения, определенные исходя из аппроксимаций Дж. Райта. Кроме того, толщина внутренней камеры в двухкамерном стеклопакете должна быть немного больше наружной. Помимо теплотехнических задач, большая ширина внутренней камеры увеличивает звукоизоляцию стеклопакета (до 3 дБ).

Стоит отметить, что в настоящее время стеклопакеты с углекислым газом на строительном рынке отсутствуют. Однако диоксид углерода имеет такие преимущества по сравнению с другими вариантами заполнителей, как:

- малая стоимость вследствие распространенности (стоимость баллона объемом 40 л с CO_2 составляет 10,0 бел. руб., а аргона – 17,3 бел. руб.);

- то, что он практически безвреден: при концентрации до 0,1 % (или 1,83 г/м³) не вызывает никакого побочного воздействия (в воздухе больших городов концентрация составляет около 0,055 %, или 1,0 г/м³ [10]);

- прозрачность для лучей в видимом диапазоне, но так как двуокись углерода является трехатомным газом, то она способна поглощать тепловое излучение (относится к парниковым газам).

На последнем пункте стоит остановиться подробнее. Коэффициент лучистого теплообмена $\alpha_{\text{л}}$, Вт/(м²·К), для однокамерного стеклопакета, заполненного лучепоглощающей средой, будет определяться по выражению [11]

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\sum q}{T_1 - T_2}, \quad (12)$$

где $\sum q$ – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м², передаваемая от внутреннего стекла 1 с температурой T_1 к наружному стеклу 2, имеющего температуру T_2 , рассчитываемая как сумма непосредственно передаваемого удельного теплового потока $q_{1 \rightarrow 2}$ и мощности теплового потока от газа к стеклу $q_{\text{г} \rightarrow 2}$

$$\sum q = q_{1 \rightarrow 2} + q_{\text{г} \rightarrow 2}. \quad (13)$$

Слагаемые в (13) определяются по следующим выражениям:

$$q_{1 \rightarrow 2} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_{\text{г}})}{1 - (1 - \varepsilon_{\text{г}})^2 (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4); \quad (14)$$

$$q_{\text{г} \rightarrow 2} = \frac{\varepsilon_{\text{г}} \varepsilon_2 [1 + (1 - \varepsilon_{\text{г}})(1 - \varepsilon_1)]}{1 - (1 - \varepsilon_{\text{г}})^2 (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} \sigma_0 (T_{\text{г}}^4 - T_2^4), \quad (15)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степень черноты (коэффициент эмиссии) стекол 1 и 2 соответственно (для обычного натрий-кальциевого стекла без покрытия $\varepsilon = 0,837$ [3]); $\varepsilon_{\text{г}}$ – степень черноты газа, заполняющего прослойку; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана – Больцмана).

Степень черноты углекислого газа может быть определена по выражению

$$\varepsilon_{\text{г}} = \frac{0,35 \cdot 10^{-8} (p_{\text{CO}_2} l)^{1/3}}{\sigma_0 \sqrt{T_{\text{ср}}}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{ср}}$ – средняя температура газа, К; p_{CO_2} – парциальное давление углекислого газа, Па; l – средняя длина пути луча, м (если рассматривать стеклопакет как плоскопараллельный слой бесконечных размеров толщиной δ , то $l = 1,8\delta$).

Так как диоксид углерода, заполняющий камеру стеклопакета, находится под атмосферным давлением и не содержит примесей, то его парциальное давление будет равно барометрическому давлению, т. е. $p_{\text{CO}_2} \approx 10^5$ Па.

Сравнение расчетных коэффициентов теплообмена излучением для двух вариантов расчета для однокамерного стеклопакета (первый – с учетом излучения CO_2 ; второй получен при предположении, что углекислый газ не влияет на тепловое излучение) приведено в табл. 2. При расчете было принято, что средняя температура газа в прослойке составляет 0 °С (273 К), разность температур на поверхностях прослойки $\Delta t = 25$ °С (внутренняя имеет температуру 12,5 °С, наружная – минус 12,5 °С). Степень черноты наружного стекла принята $\varepsilon_2 = 0,837$ в обоих расчетах; внутреннего $\varepsilon_1 = 0,837$ (в первом варианте) и $\varepsilon_1 = 0,100$ (во втором).

Сравнение расчетных коэффициентов лучистого теплообмена
Comparison of calculated coefficients for radiant heat transfer

Толщина газовой прослойки δ , мм	Коэффициент лучистого теплообмена $\alpha_{\text{л}}$, Вт/(м ² ·К)				Величина разности коэффициента лучистого теплообмена			
	С учетом излучения CO ₂	Без учета излучения CO ₂	С учетом излучения CO ₂	Без учета излучения CO ₂	абсолютная, Вт/(м ² ·К)		относительная, %	
	При ϵ_1				При ϵ_1		При ϵ_1	
	0,837		0,100		0,837	0,100	0,837	0,100
1	3,136	3,328	0,332	0,454	0,192	0,122	5,8	26,9
2	3,131	3,328	0,332	0,454	0,197	0,122	5,9	26,9
3	3,128	3,328	0,332	0,454	0,200	0,122	6,0	26,9
4	3,125	3,328	0,332	0,454	0,203	0,122	6,1	26,9
5	3,123	3,328	0,333	0,454	0,205	0,121	6,2	26,7
6	3,121	3,328	0,333	0,454	0,207	0,121	6,2	26,7
7	3,119	3,328	0,333	0,454	0,209	0,121	6,3	26,7
8	3,118	3,328	0,333	0,454	0,210	0,121	6,3	26,7
9	3,116	3,328	0,333	0,454	0,212	0,121	6,4	26,7
10	3,115	3,328	0,333	0,454	0,213	0,121	6,4	26,7
11	3,113	3,328	0,333	0,454	0,215	0,121	6,5	26,7
12	3,112	3,328	0,333	0,454	0,216	0,121	6,5	26,7
13	3,110	3,328	0,333	0,454	0,218	0,121	6,6	26,7
14	3,110	3,328	0,333	0,454	0,218	0,121	6,6	26,7
15	3,109	3,328	0,333	0,454	0,219	0,121	6,6	26,7
16	3,108	3,328	0,333	0,454	0,220	0,121	6,6	26,7
17	3,107	3,328	0,334	0,454	0,221	0,120	6,6	26,4
18	3,106	3,328	0,334	0,454	0,222	0,120	6,7	26,4
19	3,105	3,328	0,334	0,454	0,223	0,120	6,7	26,4
20	3,104	3,328	0,334	0,454	0,224	0,120	6,7	26,4

Анализируя полученные данные, можно сделать следующий вывод: применение углекислого газа в качестве заполнения газовой прослойки стеклопакетов позволит увеличить их сопротивление теплопередаче не только за счет малого коэффициента теплопроводности, но также вследствие собственного излучения диоксида углерода, которое необходимо учитывать при расчетах.

Расчетная зависимость от толщины суммарного коэффициента теплообмена прослойки $\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$, заполненной CO₂, представлена на рис. 3. При оптимальной толщине газовой прослойки 8 мм (табл. 1) достигаются значения: $\alpha = 5,01$ Вт/(м²·К) при $\epsilon_1 = 0,837$ и $\alpha = 2,22$ Вт/(м²·К) при $\epsilon_1 = 0,100$.

Согласно расчетам (табл. 3), для однокамерного стеклопакета с заполнением CO₂ сопротивление теплопередаче может возрасти: при $\epsilon_1 = 0,837$ на 0,05 м²·К/Вт (до 15 %), при $\epsilon_1 = 0,100$ на 0,16 м²·К/Вт (до 28 %) по сравнению

со стеклопакетами, заполненными осушенным воздухом.

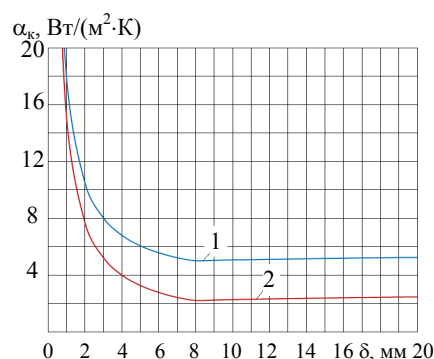


Рис. 3. Расчетные значения суммарного коэффициента теплообмена для вертикального стеклопакета, заполненного углекислым газом: 1 – при степени черноты внутреннего стекла $\epsilon_1 = 0,837$; 2 – при $\epsilon_1 = 0,100$

Fig. 3. Calculated values of total heat transfer coefficient for vertical insulating glass unit filled with carbon dioxide: 1 – at emissivity of inner glass $\epsilon_1 = 0.837$; 2 – at $\epsilon_1 = 0.100$

Таблица 3

Сопrotивление теплопередаче заполненных углекислым газом и осушенным воздухом однокамерных стеклопакетов

Heat transfer resistance of single-chamber insulating glass units filled with carbon dioxide and dried air

Толщина газовой прослойки δ , мм	Сопrotивление теплопередаче R_t , м ² ·К/Вт, при $\epsilon_1 = 0,837$, при заполнении прослойки		ΔR , м ² ·К/Вт	$\Delta R/R_t$, %	Сопrotивление теплопередаче R_t , м ² ·К/Вт, при $\epsilon_1 = 0,100$, при заполнении прослойки		ΔR , м ² ·К/Вт	$\Delta R/R_t$, %
	CO ₂	воздухом			CO ₂	воздухом		
1	0,219	0,199	0,02	10,1	0,359	0,333	0,03	7,8
2	0,258	0,228	0,03	13,2	0,423	0,372	0,05	13,7
3	0,288	0,251	0,04	14,7	0,484	0,410	0,07	18,0
4	0,310	0,270	0,04	14,8	0,543	0,446	0,10	21,7
5	0,328	0,285	0,04	15,1	0,598	0,482	0,12	24,1
6	0,342	0,299	0,04	14,4	0,652	0,516	0,14	26,4
7	0,355	0,310	0,05	14,5	0,704	0,549	0,16	28,2
8	0,363	0,320	0,04	13,4	0,743	0,580	0,16	28,1
9	0,361	0,329	0,03	9,7	0,737	0,611	0,13	20,6
10	0,360	0,337	0,02	6,8	0,731	0,641	0,09	14,0
11	0,360	0,344	0,02	4,7	0,727	0,670	0,06	8,5
12	0,359	0,350	0,01	2,6	0,722	0,698	0,02	3,4
13	0,358	0,352	0,01	1,7	0,718	0,705	0,01	1,8
14	0,357	0,351	0,01	1,7	0,714	0,701	0,01	1,9
15	0,356	0,350	0,01	1,7	0,711	0,698	0,01	1,9
16	0,356	0,350	0,01	1,7	0,707	0,695	0,01	1,7
17	0,355	0,349	0,01	1,7	0,704	0,692	0,01	1,7
18	0,355	0,348	0,01	2,0	0,702	0,690	0,01	1,7
19	0,354	0,348	0,01	1,7	0,699	0,687	0,01	1,7
20	0,354	0,347	0,01	2,0	0,697	0,685	0,01	1,8

Примечание. Толщина стекол принята 4 мм.

ВЫВОДЫ

1. При производстве и проектировании стеклопакетов необходимо стремиться к тому, чтобы толщина газовой прослойки была равна оптимальной, так как при этом достигается максимальное сопротивление теплопередаче стеклопакета. Большая толщина межстекольного пространства не приведет к сколько-нибудь значимому увеличению сопротивления теплопередаче, но увеличит расход газа.

2. Из-за особенностей конвективного теплообмена рационально делать в двухкамерных стеклопакетах внутреннее межстекольное пространство большей толщины, чем наружное.

3. Применение в качестве заполнителя газовой прослойки углекислого газа позволит увеличить сопротивление теплопередаче стеклопакетов по сравнению с заполненными осушенным воздухом при одинаковой толщине газового слоя (для однокамерного стеклопакета – на 0,05–0,16 м²·К/Вт, в зависимости от степени черноты внутреннего стекла).

ЛИТЕРАТУРА

1. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43–2006* (02250). Введ. 01.07.2007. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 47 с.
2. Свод правил СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция: СНиП 23-02–2003. Введ. 01.07.2013. М.: Мин-во регион. развития Рос. Федерации, 2012. 95 с.
3. Стекло в строительстве. Определение коэффициента теплопередачи (значения U). Метод расчета: СТБ EN 673–2014. Введ. 01.03.2015. Минск: Госстандарт, 2015. 15 с.
4. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.
5. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие / С. С. Кутателадзе. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
6. Schild, K. Wärmeschutz / K. Schild, W. M. Willems. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. 326 p.
7. Wright, J. L. A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazing / J. L. Wright // ASHRAE Transactions. 1996. Vol. 102, No 1. P. 940–946.
8. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1972. 720 с.
9. Thermal Performance of Windows, Doors and Shutters. Calculation of Thermal Transmittance. Part 1: General: DIN EN ISO 10077-1:2006; German Version EN ISO 10077-1:2006. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2006. 47 p.
10. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена: СТО НП «АВОК» 2.1–2008. Введ. 01.06.2004. М.: НП «АВОК», 2008. 16 с.
11. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]; под. общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2007. Ч. 1. 606 с.

Поступила 27.06.2017

Подписана в печать 30.08.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Construction Design Standards ТКП 45-2.04-43–2006* (02250). *Construction Heat Engineering*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2015. 47 (in Russian).
2. SNiP (Construction Rules and Regulations) 23-02–2003. Abridgment of Rules and Regulations СП 50.13330.2012. *Building Heat Insulation*. Moscow, Ministry of Regional Development of Russian Federation, 2012. 95 (in Russian).
3. STB [Standards of the Republic of Belarus] EN 673–2014. *Glass in Construction. Determination of Heat Transfer Ratio (value U). Calculation Method*. Minsk, Gosstandart Publ., 2015. 15 (in Russian).
4. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. (1975) *Heat transfer*. 3rd ed. Moscow, Energia Publ. 488 (in Russian).
5. Kutateladze S. S. (1990) *Heat Transfer and Hydrodynamic Resistance. Reference Book*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 367 (in Russian).
6. Schild K., Willems W. M. (2013) *Wärmeschutz*. Wiesbaden, Springer Vieweg. 326 (in German). DOI: 10.1007/978-3-658-02571-7.
7. Wright J. L. (1996) A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazing. *ASHRAE Transactions*, 102 (1), 940–946.
8. Vargaftik N. B. (1972) *Reference Book for Thermal-Physical Properties of Gas and Liquid*. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ. 720 (in Russian).
9. DIN EN ISO 10077-1:2006; German Version EN ISO 10077-1:2006. *Thermal Performance of Windows, Doors and Shutters. Calculation of Thermal Transmittance. Part 1: General*. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2006. 47.
10. Organization Standard. Non-Commercial Partnership “AVOK” 2.1–2008. *Residential and Public Buildings. Air Exchange Standards*. Moscow, Publishing House of Non-Commercial Partnership “AVOK”, 2008. 16 (in Russian).
11. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Akel'ev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerez'ko A. V. (2007) *Heat-and-Mass Transfer. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University. 606 (in Russian).

Received: 27.06.2017

Accepted: 30.08.2017

Published online: 30.03.2018

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-165-172

UDK 617.3

Structural Analysis of the Pelvic Girdle before and after Hip Replacement Procedure

Ja. Zubrzycki¹⁾, R. Karpinski¹⁾, L. Jaworski²⁾, A. M. Ausiyevich³⁾, N. Smidova⁴⁾

¹⁾Lublin University of Technology (Lublin, Poland),

²⁾Poznan University of Technology (Poznań, Poland),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾Technical University of Košice (Kosice, Slovakia)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Abstract. The paper presents results of a preliminary study on a structural analysis of the pelvic girdle, comparing results for the analysis performed before and after the hip replacement procedure with taking into account changes in the mechanical properties of the articular cartilage of the joint. Basic anatomy and biomechanics of the hip joint is introduced. The mechanical analysis of the hip joint model is conducted in each case. Final results of the analysis are presented. The numerical model of the tested objects has been made on the basis of CT and CAD modeling. Hip bone models have been made using specialist software such as Materialise Mimics. The model made in the program has been exported to a data exchange file in order to obtain the editable CAD files. Thus the obtained models have become a starting point for implementation of the numerical model of personalized hip replacement. Numerical models of bone and implant have been performed in Solidworks environment. Mechanical analysis has been carried out while using a finite element analysis. During performing calculations with the help of the finite element analysis other physical quantities such as loads, tensions, restraints or other examples represented in the system while using continuous function have also been discretized. While performing the process of discretization software has been aimed at maximally approximation of discrete and continuous form using approximation methods.

Keywords: hip joint, pelvic, femur, endoprosthesis, finite element analysis

For citation: Zubrzycki Ja., Karpinski R., Jaworski L., Ausiyevich A. M., Smidova N. (2018) Structural Analysis of the Pelvic Girdle before and after Hip Replacement Procedure. *Science and Technique*. 17 (2), 165–172. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-165-172

Структурный анализ таза до и после процедуры замены тазобедренного сустава

Канд. техн. наук Я. Зубжицкий¹⁾, магистр инж. наук Р. Карпиньски¹⁾, инж. Л. Яворски²⁾,
канд. техн. наук, доц. А. М. Авсиевич³⁾, канд. физ.-мат. наук Н. Смидова⁴⁾

¹⁾Люблинский технический университет (Люблин, Польша),

²⁾Познаньский технический университет (Познань, Польша),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾Технический университет в Кошице (Кошице, Словакия)

Реферат. В статье представлены результаты предварительного исследования структурного анализа тазового пояса, сравниваются результаты анализа, проведенного до и после процедуры замены тазобедренного сустава, с учетом

Адрес для переписки

Зубжицкий Ярослав
Люблинский технический университет
ул. Надбыстрицка, 36
20-618 Люблин, Польша
Тел.: +4881 538-45-85
j.zubrzycki@pollub.pl

Address for correspondence

Zubrzycki Jarosław
Lublin University of Technology
36 Nadbystrzycka str.,
20-618 Lublin, Poland
Tel.: +4881 538-45-85
j.zubrzycki@pollub.pl

изменений механических свойств суставного хряща. Вводится базовая анатомия и биомеханика тазобедренного сустава. В каждом случае проводится механический анализ модели тазобедренного сустава. Приводятся окончательные результаты анализа. Численная модель испытуемых объектов сделана на основе компьютерной томографии и CAD-моделирования, модели костного мозга выполнены с использованием специализированного программного обеспечения Materialise Mimics. Модель, сделанная в программе, затем экспортировалась в файл обмена данными, чтобы получить редактируемые файлы CAD. Таким образом, полученные модели стали отправной точкой для внедрения численной модели персонализированной замены тазобедренного сустава. Численные модели кости и имплантата были выполнены в среде SolidWorks. Механический анализ проводился с использованием метода конечных элементов. Во время выполнения расчетов с использованием МКЭ-анализа также дискретизируются другие физические величины – нагрузки, напряжения, ограничения, представленные в системе с использованием непрерывной функции. При выполнении процесса дискретизации программное обеспечение нацелено на максимальное сближение дискретной и континуальной моделей с использованием методов аппроксимации.

Ключевые слова: тазобедренный сустав, таз, бедро, эндопротез, МКЭ-анализ

Для цитирования: Структурный анализ таза до и после процедуры замены тазобедренного сустава / Я. Зубжицки [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 165–172. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-165-172

Introduction

For many years a phenomenon called population ageing, linked with continuing low or negative population growth rate, is being observed. The most tangible repercussion is growing demand for medical services dedicated for elder people. From orthopedics' point of view one of the most frequently performed operations is total hip replacement – the implantation of purposely designed and manufactured prosthesis of the hip joint, replacing structures damaged or destroyed as a result of various accidents or medical conditions.

Anatomy of the hip joint

A joint (or articulation) is a location of contact and movement of bones. A hip joint is a connection between femur and pelvis, with three degrees of freedom in three planes – coronal, median and axial [1]. Its articular surfaces have got the most regular shape compared to other joints in human body [1, 2].

The pelvic skeleton is formed by a pair of hip bones and the sacrum, connecting the pelvis with the spine. Right side of the pelvic skeleton is shown on fig. 1. The hip bone consists of the ilium, ischium, and the pubis, which combined form the cotyloid cavity of the hip joint (or the acetabulum) [2–7].

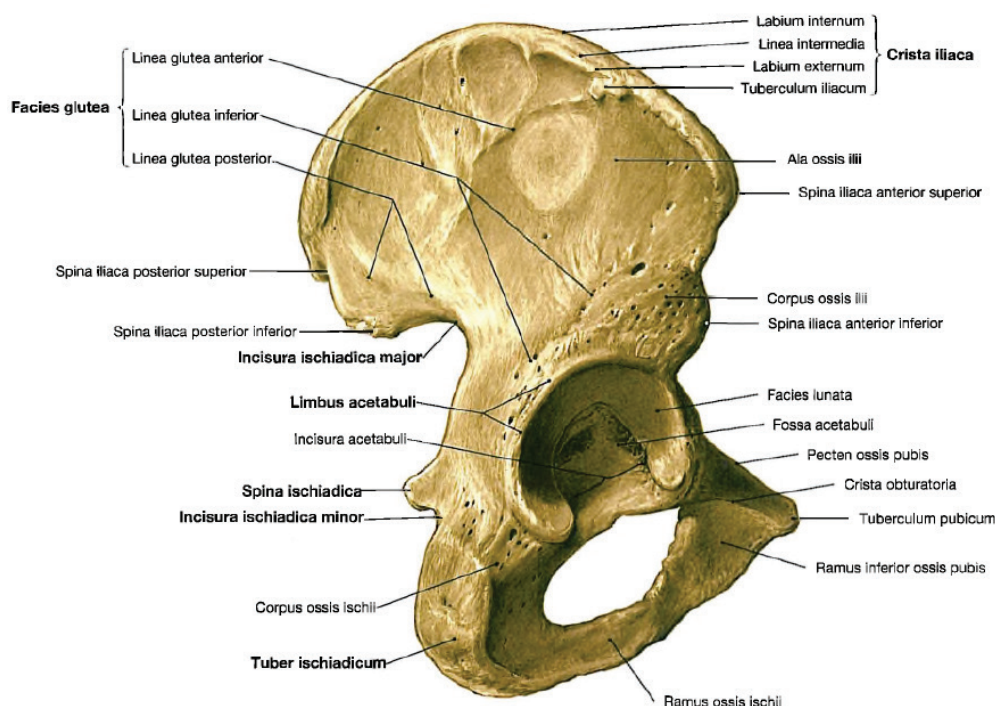


Fig. 1. The pelvic skeleton – right side [5]

The femur consists of the proximal extremity, the shaft and the distal extremity. The proximal extremity bears a large, medialward-directed head that fits into the acetabulum of the pelvic bone. Its size usually depends on gender and with an exception of the fovea capitis femoris, which gives attachment to the ligament of head of femur, is coated with cartilage. The proximal extremity of the femur is shown on fig. 2.

Articular cartilage has an important role in the human musculoskeletal system. It is located on surfaces of joints, where most of the movement of the bones is executed. Cartilage transfers and spreads loads between bones, while preserving ap-

propriate stress distribution on a surface of the joint, reduces friction, absorbs sudden overstrains and protects bones from surface wear. Fully developed cartilage does not contain blood vessels or nerves [6–9].

The articular capsule of the hip joint is strong, dense and after the capsule of the knee joint, the biggest joint capsule in the human body. The capsule, along with the system of ligaments connecting bones and limiting the joint's mobility, is shown on fig. 3 [3, 6, 7].

The anatomy of the hip joint is further discussed by Karpiński et al. in [9].

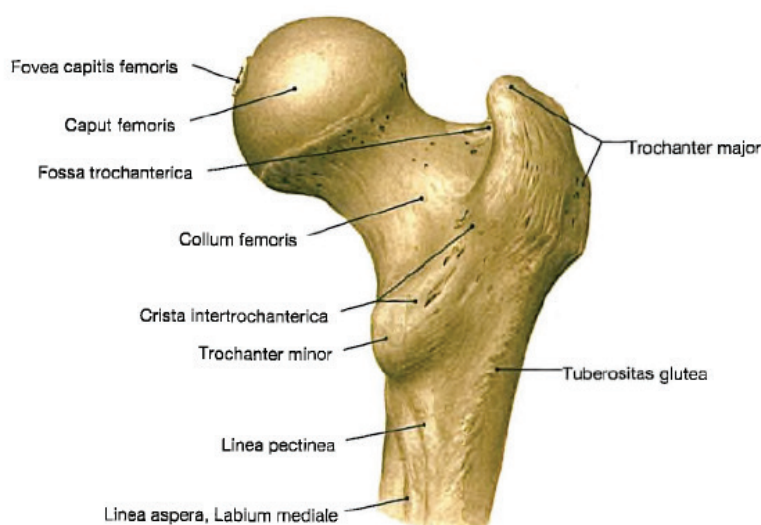


Fig. 2. The proximal extremity of right femur [5]

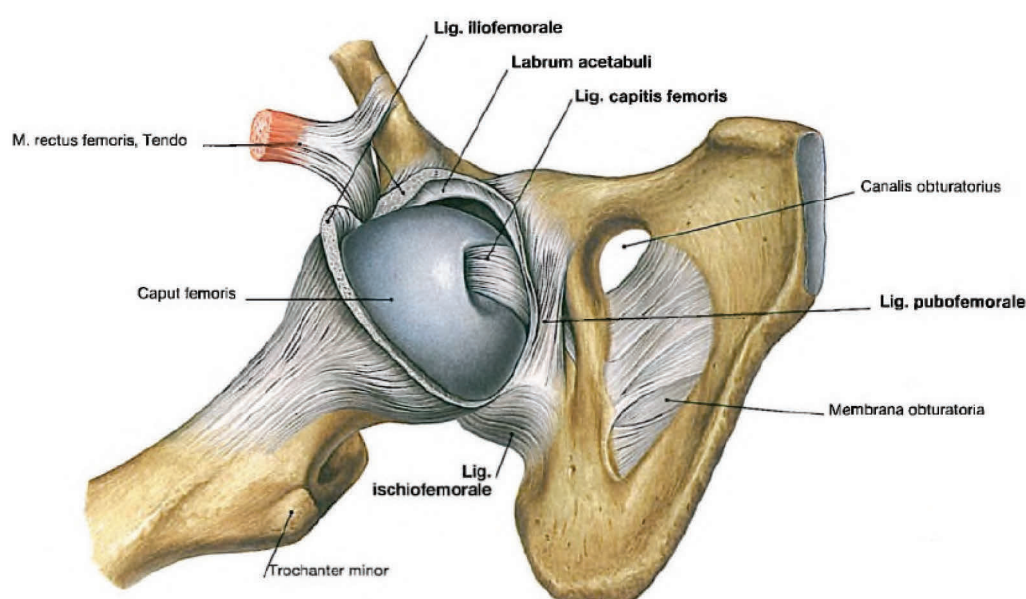


Fig. 3. The system of ligaments with dissected iliofemoral ligament [5]

Biomechanics of the hip joint

The hip joint is one of the most vulnerable to overstraining and degenerations structures in human body. It plays the crucial part in locomotion activities and carrying the loads [1, 6, 7, 10]. The range of movements in the hip joint is shown on fig. 4. These movements are limited by strong ligaments and deep articular cavity. Thanks to the structure of bone tissue and cartilage along with strong muscles and ligaments, it is exquisitely suited for the purpose of transmission of dynamic loads [6, 10].

The biomechanics of the hip joint is further discussed by Karpiński et al. in [9].

Osteoarthritis

Osteoarthritis is a group of various diseases, which despite of having different origin, lead to similar biological, morphological and clinical effects. It can affect the whole joint, mainly the cartilage (in form of chondromalacia). Osteoarthritis is one of the most frequently-occurring pathologies of the locomotion system, especially with elder people. It is often caused by biological and mechanical occurrences, which disturb the process of tissue synthesis and lead to degeneration of said tissues, both in chondrocytes and extracellular matrix as well as in subchondrial part of the bone [9, 11].

Alloplasty of the hip joint

Alloplasty of the hip joints about implantation of elements to the human organism, acting as a substitute for damaged parts of the joint, which leads to restoration of natural functions to these anatomical structures. Farther, the replacement procedure eliminates pathological changes and reduces pain, as well as recreates natural functions of the hip.

Joint replacement procedures, besides having a vast amount and range of endoprosthesis and instrumentarium, require excellent theoretical and practical background of the operating staff as well as operator's great experience. Outcome of the treatment depends on a choice of the implant, precision during operation, patient's age and cooperation in rehabilitation process, and bone tissue's capacity of distributing loads in a proximity of the prosthesis [6, 11, 12].

The design of the endoprosthesis of the hip joint

For the purposes of studies the design and virtual prototype of the bipolar endoprosthesis of the hip joint was made, with such parts as prosthetic shaft inserted into properly prepared thigh bone of a patient, removable head, prosthetic socket and socket inlay, both spherically-shaped (fig. 5). Elements of the prototype designed, and then assembled in the environment of Solid Edge ST8 software, with the use of sequence modeling tools.

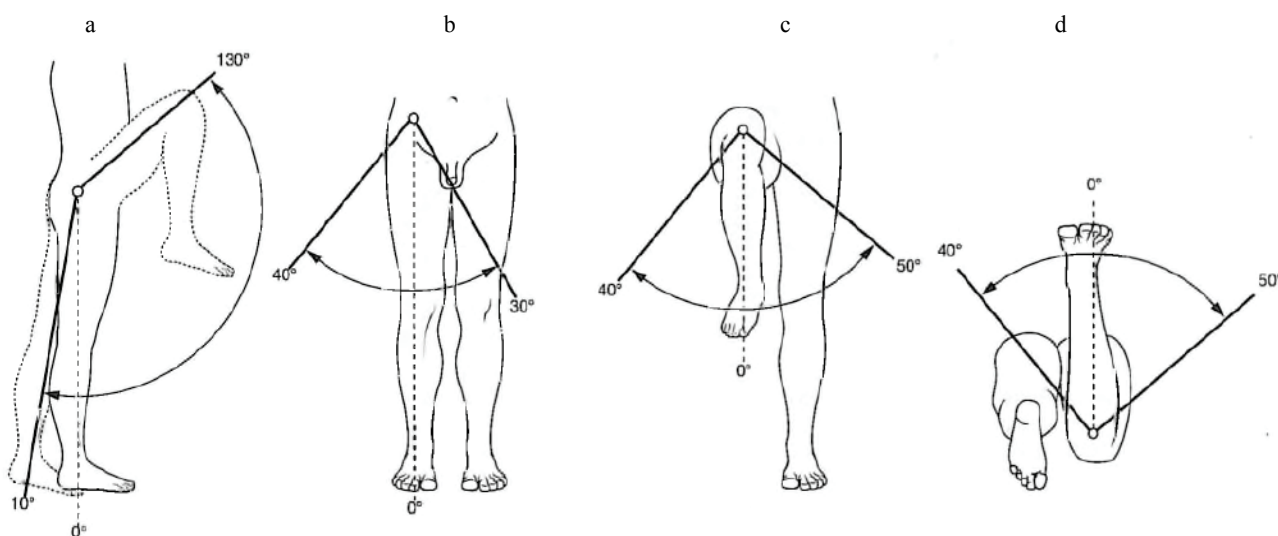


Fig. 4. The range of movements in the hip joint: a – flexion – extension: 10° – 0° – 130° ; b – abduction – adduction: 40° – 0° – 30° ; c, d – lateral rotation – medial rotation: 50° – 0° – 40° [5]

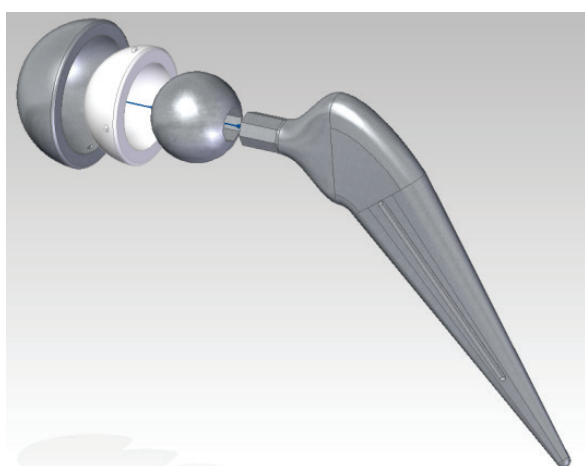


Fig. 5. The model of the endoprosthesis of the hip joint (extruded view) [source: own study]

The structure of the shaft follows the example of the thigh bone, maintaining the value of an angle measured between the body and the neck of the bone, with the value of 125° . It is nog-shaped, tapering in distal direction with 122.5 mm in length (measured from the top of said angle to the end of the shaft), the length of the neck is meanwhile set at 46 mm.

The head in the shape of an orb with 30 mm diameter is mounted on octangular profile of the shaft's head, which makes the head unable to rotate around the neck. Internal diameter of the socket inlay equals the diameter of the head, meanwhile external diameter equals 40 mm. To prevent the socket inlay from slipping out of the prosthetic socket, protrusions are constructed on its external surface matching indentations on internal surface of prosthetic socket, which internal diameter matches the diameter of the external diameter of the socket inlay, with the value of external diameter set on 50 mm.

The prosthetic socket and socket inlay are placed on the properly prepared (via drilling) cotyloid cavity of the pelvic bone, being the articular surface for the hip joint (fig. 6). Both in choosing a place of mounting and in case of determining dimensions mentioned above, informations were distilled from the atlas of the human anatomy [6] and X-ray images of the structure available in on-line database.

Finite element analysis

Finite element analysis (FEA) is one of basic methods of conducting a computer aided enginee-

ring calculations. It is one of the techniques of discretization of geometric systems, i. e. dividing a continuum into a finite amount of subareas.

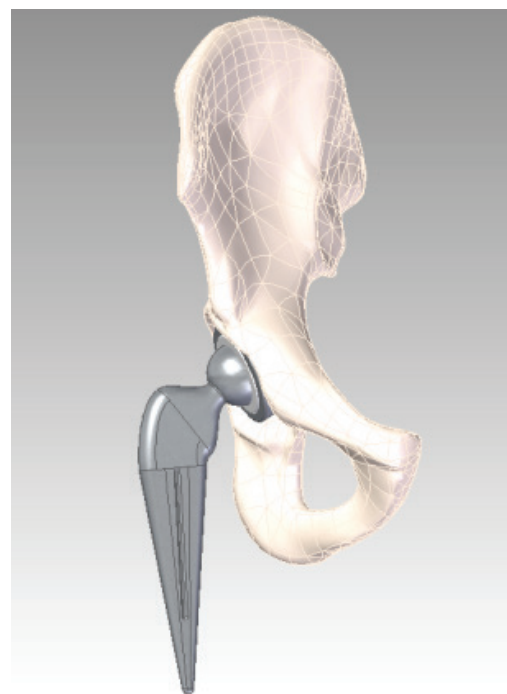


Fig. 6. The pelvic bone with mounted endoprosthesis of the hip joint (front view) [source: own study]

Main principle of FEA is to divide geometric model into finite elements uniting in nodes, which effects in creating discrete geometric model, split in simply shaped subareas, called the finite elements. During performing of calculations with the use of FEA other physical quantities are also being discretized: loads, tensions, restraints or other examples represented in the system with the use of continuous function. While performing the process of discretization software aims at maximally approximation of discrete and continuous form using approximation methods. After converting of the data analysis follows, consisting in uniting individual elements as a whole using equilibrium conditions and displacement compatibilities, which results in receiving a set of algebraic, simultaneous equations, posing as mathematical description of analyzed problem. Afterwards mentioned equations are being solved using values of equilibrium conditions, and their outcome used to compute sought quantities, i. e. tensions. [13–16].

Study of stress distribution in the pelvic bone before and after the procedure of hip replacement

Given model was used to perform a series of preliminary studies with the use of finite element analysis method in the environment of Solidworks Simulation software.

The fixing and loading of model are shown at fig. 7. During preparatory phase it was crucial to fix the model (fig. 7 – green), in order to achieve a stiffness of designed system approximate to the stiffness of the pelvic girdle resulting from its anatomical structure and a connection with the spine in particular. Next, places of force application were established, simulating effects of daily activities performed by the patient.

Before hip replacement, the force was applied perpendicularly to the longitudinal axis of the femur bone (fig. 7 – violet), and after the procedure – on the surface of the endoprosthesis' shaft (fig. 7 – brown). Values of forces have been linked with the equivalent of body weight of the patient, initially being equal to 80 kg or 784.8 N, which com-

prised 100 % of body weight (% BW). Following values were equal to 150 and 200 % BW. Moreover, the factor of cartilage presence was considered to determine its impact on the stress distribution and deformations in the pelvic bone before the replacement procedure.

In order to achieve credible results, materials (of which the element would be made) were assigned to each element with properties presented in tab. 1.

Table 1

Table of materials [5, 6, 17, 18]

Material	Element	Young's modulus, MPa	Poisson's ratio [–]
Titanium alloy Ti-6Al-4V	Prosthetic socket, shaft, head	104800.31	0.31
Cortical bone	Pelvic bone	17400	0.39
	Femur bone	17600	0.30
Polyethylene PE-HD	Socket inlay	1000	0.40
Cartilage	Hip joint articular surface	122	0.35

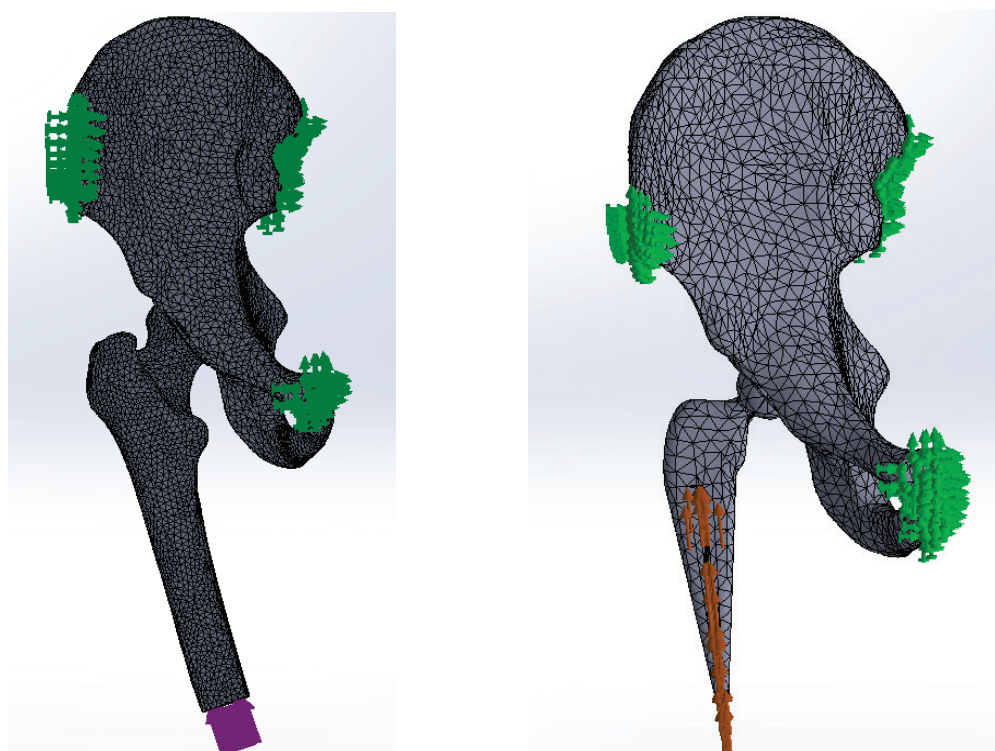


Fig. 7. The model before (left) and after (right) hip replacement procedure

The calculated stress distribution in neck of the natural femur bone and endoprosthesis in hip joint area are shown at fig. 8 and 9. The values of stresses given at tab. 2 and 3 allow to evaluate the presence and condition of cartilage on the stress.

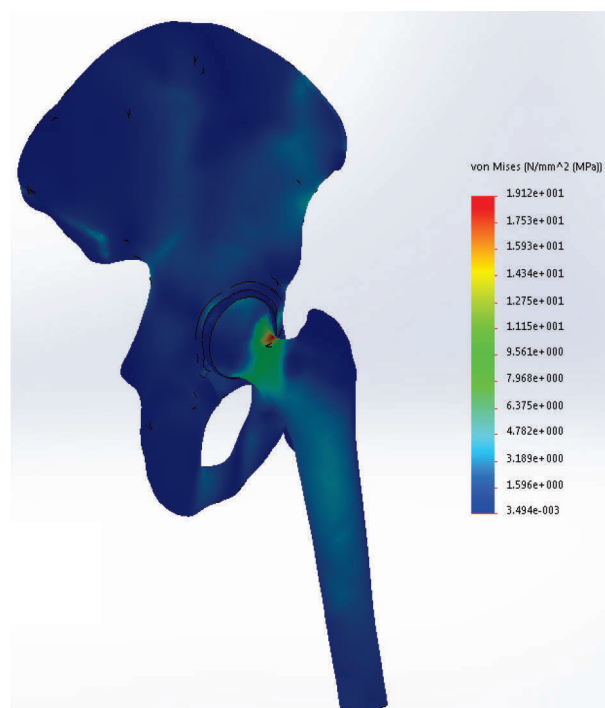


Fig. 8. Visualization of stress distribution in the model of the hip joint

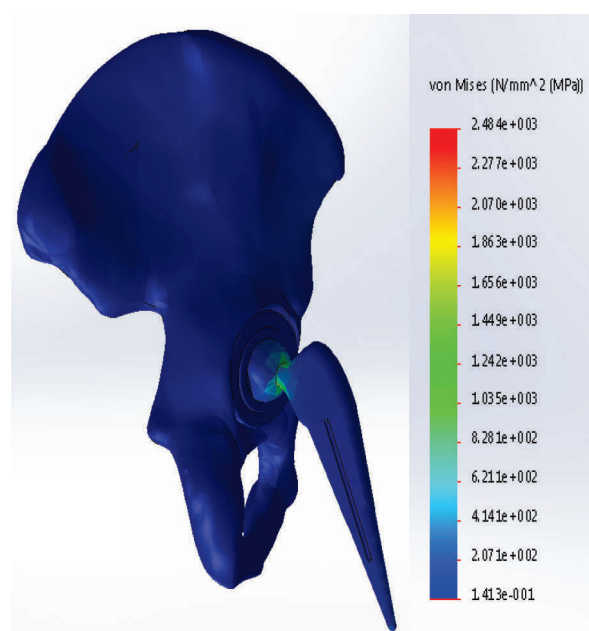


Fig. 9. Visualization of stress distribution in the model after the hip replacement procedure

Table 2

Maximum stress (in MPa) in the model

% BW	Before replacement		After replacement
	Intact cartilage	Destroyed cartilage	
100	1.91E + 01	1.82E + 01	2.48E + 03
150	2.95E + 01	2.74E + 01	4.33E + 03
200	4.04E + 01	3.67E + 01	7.38E + 03

Table 3

Maximum stress (in MPa) in the pelvic

% BW	Before replacement		After replacement
	Intact cartilage	Destroyed cartilage	
100	9.59E + 00	1.00E + 01	4.01E + 02
150	1.46E + 01	1.52E + 01	6.45E + 02
200	2.16E + 01	2.03E + 01	9.46E + 02

Study shows, that the biggest stress accumulates on the neck of the femur or the endoprosthesis, which confirms, that both femur and endoprosthesis are the most vulnerable to fracture in that area. When it comes to pelvis, the lack of cartilage causes slightly more stress on the bone than with healthy cartilage. After hip replacement, the value of stress affecting the pelvic bone rises.

SUMMARY

Preliminary studies with the use of finite elements analysis, resulting in obtaining basic data on changes in pelvic girdle as a result of applied loads before and after hip replacement procedure, are excellent basis for planning future studies on hip joint, both more directed and complicated. On the other hand they can act as an addition to the medical diagnosis, presenting potential benefits of said procedure.

REFERENCES

1. Będziński R. (1997) *Biomechanika Inżynierska*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej (in Poland).
2. Maciejewski R., Torres K. (2007) *Anatomia Czynnościowa – Podręcznik dla Studentów Pielęgniarstwa, Fizjoterapii*.

- pii, Ratownictwa Medycznego, Analityki Medycznej i Dietetyki. Lublin, Wydawnictwo Czelej (in Poland).
3. Bochenek A., Reicher M. (1978) *Anatomia Człowieka*. Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL (in Poland).
4. Ignasiak Z. (2007) *Anatomia Układu Ruchu*. Wrocław, Elsevier Urban Partner. 194 (in Poland).
5. Bochenek A., Reicher M. (1990) *Anatomia Człowieka. Tom I*. Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL (in Poland).
6. Tejszerska D., Świtoński E., Gzik M. (2011) *Biomechanika Narządu Ruchu Człowieka*. Praca Zbiorowa. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego (in Poland).
7. Woźniak W., Jędrzejewski K., Sobotta S. (2012). *Atlas Anatomii Człowieka*. Wrocław, Elsevier Urban Partner (in Poland).
8. Błaszczyk J. W. (2014) *Biomechanika Kliniczna. Podręcznik dla Studentów Medycyny i Fizjoterapii*. Warszawa, Wydawnictwo Lekarskie PZWL (in Poland).
9. Klimiuk P. A., Kuryliszyn-Moskal A. (2012) Osteoarthritis. *Reumatologia = Rheumatology*, 2 (50), 162–165 (in Poland).
10. Karpiński R., Jaworski Ł., Zubrzycki J. (2016) Structural Analysis of Articular Cartilage of the Hip Joint Using Finite Element Method. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10 (31), 240–246. DOI: 10.12913/22998624/64064.
11. Będziński R., Kędzior K., Kiwerski J., Morecki A., Skalski K., Wall A., Wit A. (2004) *Biomechanika i Inżynieria Rehabilitacyjna*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT (in Poland).
12. Gaździk T. S., Będziński R. (ed.) (2011) Endoprotezoplastyka – Teraźniejszość i Przyszłość. *Mechanika Techniczna. Tom XII: Biomechanika*. Warszawa, IPPT PAN, 641–664 (in Poland).
13. Braniewska M., Zubrzycki J., Karpiński R., Olszówka M., Niścior M. (ed.) (2015) Komputerowo Wspomagane Projektowanie i Wytwarzanie implantu Stawu Biodrowego. *Innowacje w Fizjoterapii. Tom. 2*. Lublin, 147–170 (in Poland).
14. Hughes T. J. R. (2000) *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications. 704.
15. Karpiński R., Jaworski Ł., Szabelski J. (2016) The Design and Structural Analysis of the Endoprosthesis of the Hip Joint. *Applied Computer Science*, 12 (1), 87–95.
16. Mańko M., Zubrzycki J., Karpiński R., Olszówka M., Niścior M. (ed.) (2015) Zastosowanie Metod Inżynierii Odwrotnej do Projektowania Sztucznego Krążka Międykręgowego. *Innowacje w Fizjoterapii. Tom. 2*. Lublin, 171–197 (in Poland).
17. Madej T. (2008) *Modelowanie Strefy Ruchowej Endoprotezy Stawu Biodrowego w Aspekcie Biomateriałów*. Ph. D. Thesis. Akademia Górniczo – Hutnicza (in Poland).
18. Zubrzycki J., Smidova N. (2014) Computer-Aided Design of Human Knee Implant. *Applied Mechanics and Materials*, 613, 172–181. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.613.172.

Received: 22.11.2017

Accepted: 30.08.2017

Published online: 30.03.2018