

# НАУКА и ТЕХНИКА



# Science and Technique V. 16, No 2 (2017)

**Международный  
научно-технический журнал**

**International  
Scientific and Technical Journal**

**Серия 2. Строительство  
Серия 4. Энергетические комплексы**

**Series 2. Civil and Industrial Engineering  
Series 4. Energetic Complexes**

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

## CONTENTS

### Строительство

### Civil and Industrial Engineering

**Khroustalev B. M., Leonovich S. N., Yakovlev G. I.,  
Polianskich I. S., Lahayne O., Eberhardsteiner J.,  
Skripkiunas G., Pudov I. A., Karpova E. A.**

Structural Modification of New Formations  
in Cement Matrix Using Carbon  
Nanotube Dispersions and Nanosilica  
(Хрусталеv Б. М., Леонович С. Н.,  
Яковлев Г. И., Полянских И. С., Лахайн О.,  
Эберхардштайнер Й., Скрипкинас Г.,  
Пудов И. А., Карпова Е. А.)  
Структурная модификация новообразований  
в цементной матрице с использованием дисперсии  
углеродных нанотрубок и нанокремнезема) . . . . . 93

**Khroustalev B. M., Leonovich S. N., Yakovlev G. I.,  
Polianskich I. S., Lahayne O., Eberhardsteiner J.,  
Skripkiunas G., Pudov I. A., Karpova E. A.**

Structural Modification of New Formations  
in Cement Matrix Using Carbon  
Nanotube Dispersions and Nanosilica . . . . . 93

**Ляхевич Г. Д., Лиштван И. И., Ляхевич А. Г.,  
Дударчик В. М., Крайко В. М., Звонник С. А.**  
Технология и эффективность использования  
золы бурых углей Лельчицкого месторождения  
в цементе и бетонных смесях. . . . . 104

**Lyahevich G. D., Lishtvan I. I., Lyahevich A. G.,  
Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Zvonnik S. A.**  
Technology and Efficiency in Usage  
of Brown Coal Ash for Cement and Concrete  
Mixtures at the Lelchitsky Deposit . . . . . 104

**Пиір А. Э., Козак О. А., Кунтыш В. Б.**  
Пути снижения нормативных теплопотерь  
в жилых зданиях . . . . . 113

**Piir A. E., Kozak O. A., Kuntyshev V. B.**  
Method for Decrease of Standard Heat Losses  
in Residential Buildings . . . . . 113

**Сизов В. Д., Нестеров Л. В., Копко В. М.**  
Влияние местоположения неперфорированного  
экрана на процесс теплопередачи в наружных  
ограждающих конструкциях зданий . . . . . 119

**Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M.**  
Influence of Non-Perforated Screen Location  
on Heat Transfer Process  
in Building Enclosing Parts. . . . . 119

<b>Борухова Л. В., Шибeko А. С.</b> Определение воздухообмена в помещениях общественных зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций . . . . .	125
<b>Осипов С. Н., Поздняков Д. А.</b> Вероятностная оценка необходимости и вида ремонта здания и его элементов . . . . .	131
<b>Броневицкий А. П.</b> Временное усиление конструкций при реконструкции зданий . . . . .	137
<b>Пшембаев М. К.</b> Физико-химические основы процессов защиты поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий пропиточными составами . . . . .	144
<b>Хасенеvич Л. С.</b> О расчете кольцевых (замкнутых) в плане фундаментов . . . . .	153

**Энергетические комплексы**

<b>Доброго К. В.</b> Модель электрической нагрузки жилищно- коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло . . . . .	160
<b>Мазуренко А. А., Смирнов Е. Т.</b> Исследование магнитного режима трехфазного трансформатора с симметричным магнитопроводом рамной конструкции . . . . .	171

**Главный редактор  
Борис Михайлович Хрусталеv**

**Редакционная коллегия**

- V. V. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*V. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*  
*A. 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),*

<b>Borukhava L. V., Shybeka A. S.</b> Determination of Air Exchange in Public Building Premises Having Large Area of Translucent Structures . . . . .	125
<b>Osipov S. N., Pozdniakov D. A.</b> Probabilistic Assessment of Necessity in Repair and its Type for Building and its Elements . . . . .	131
<b>Bronevizky A. P.</b> Temporary Reinforcement of Structures for Building Reconstruction . . . . .	137
<b>Pshembayev M. K.</b> Physical and Chemical Fundamentals of Protection Processes for Surface Layer of Concrete Road Paving by Impregnating Compositions . . . . .	144
<b>Khasenevich L. S.</b> Calculation of Foundations with Circular (Closed) in-Plane Shapes . . . . .	153

**Energetic Complexes**

<b>Dobrego K. V.</b> Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System while Using Monte-Carlo Method . . . . .	160
<b>Mazurenko A. A., Smirnov E. T.</b> Investigation of Magnetic Mode for 3-Phase Transformer with Symmetrical Magnetic Conductor of Frame Design . . . . .	171

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

Г. А. ПОТАЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
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 (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН 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)

G. A. POTAEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
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 (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of 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 28.03.2017. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 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, 2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-93-103

UDC 691.32:539.3/4.001.57

## Structural Modification of New Formations in Cement Matrix Using Carbon Nanotube Dispersions and Nanosilica

**B. M. Khroustalev<sup>1)</sup>, S. N. Leonovich<sup>1)</sup>, G. I. Yakovlev<sup>2)</sup>, I. S. Polianskich<sup>2)</sup>, O. Lahayne<sup>3)</sup>,  
J. Eberhardsteiner<sup>3)</sup>, G. Skripkiunas<sup>4)</sup>, I. A. Pudov<sup>2)</sup>, E. A. Karpova<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation),

<sup>3)</sup>Vienna University of Technology (Vienna, Austria),

<sup>4)</sup>Vilnius Gediminas Technical University (Vilnius, Lithuania)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Abstract.** Complex nanodispersed systems with multi-walled carbon nanotubes and nanodispersed silica have a significant impact on the processes of hydration, hardening and strength gain of construction composites predetermining their durability. While using a scanning electron microscope with an attachment for X-ray microanalysis and a device for infrared spectral analysis investigations have shown that the main effect of the cement matrix modification in the case of adding complex nanodispersed systems is provided by direct influence of hydration processes with subsequent crystallization of new formations. It has been noted that while adding carbon nanotube dispersion and nanosized silica a binding matrix is structured in the form of an extremely dense shell from crystalline hydrate new formations on the surface of solid phases that provides strong binding matrix in cement concrete. The addition effect of carbon nanotubes has been analyzed and quantitatively assessed through an investigation for every case of one sample with nanotubes and one sample without them with the help of a nanoindenter and scanning electron microscope. It is necessary to solve rather complicated challenging task in order to assess quantitatively the addition effect of CNT on material characteristics at a micromechanical level. At the same time it is possible to investigate surface of a concrete sample with one-micron resolution. In this case it is necessary to prepare samples for nanoindentation with exclusion of all CNT defectable effects that have been shown by a SEM. So in this case more adequate method for assessment must be a picoindenter, which combines a test method for nanoindentation with an optical SEM potential. Such equipment is in the stage of in-situ testing process at the Vienna University of Technology. The investigation is based on the fact that the main modification effect of mineral binding matrix while using incorporated complex nanodispersed systems and nanosilica is ensured by a direct influence of hydration processes and subsequent crystallization of new formations. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis with detection in IR spectra have revealed that adding of multi-walled carbon nanotubes dispersion together with nanodispersed silica provides structuring of rather dense shell of hydrated new formations along cement matrix on the surface of solid phase. The structured interfacial layers form separate cells in the modified cement matrix that ensures a formation of extremely filled system and predetermines structural strengthening of the modified cement matrix due to formation of spatial packaging. Consequently, the main factor increasing characteristics of cement concrete which is modified with carbon nanotubes and nanosilica is a structural modification of calcium hydrosilicates with relation to composition and morphology of new formations.

**Keywords:** nanodispersed system, multi-walled carbon nanotubes, nanosilica, scanning electron microscope, X-ray microanalysis, hydration, cement concrete

**For citation:** Khroustalev B. M., Leonovich S. N., Yakovlev G. I., Polianskich I. S., Lahayne O., Eberhardsteiner J., Skripkiunas G., Pudov I. A., Karpova E. A. (2017) Structural Modification of New Formations in Cement Matrix Using Carbon Nanotube Dispersions and Nanosilica. *Science and Technique*. 16 (2), 93–103. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-93-103

---

### Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-77-52  
rector@bntu.by

### Address for correspondence

Khroustalev Boris M.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-77-52  
rector@bntu.by

## Структурная модификация новообразований в цементной матрице с использованием дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Б. М. Хрусталеv<sup>1)</sup>, доктора техн. наук, профессора С. Н. Леонович<sup>1)</sup>, Г. И. Яковлев<sup>2)</sup>, канд. техн. наук, доц. И. С. Полянских<sup>2)</sup>, канд. наук О. Лахайн<sup>3)</sup>, докт. наук, проф. Й. Эберхардштайнер<sup>3)</sup>, докт. наук, проф. Г. Скрипкина<sup>4)</sup>, канд. техн. наук, доц. И. А. Пудов<sup>2)</sup>, студ. Е. А. Карпова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация),

<sup>3)</sup>Венский технический университет (Вена, Австрия),

<sup>4)</sup>Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса (Вильнюс, Литва)

**Реферат.** Комплексные нанодисперсные системы с многослойными углеродными нанотрубками и нанокремнеземом имеют значительное влияние на процессы гидратации, твердения, набора прочности строительных композитов, предопределяя их долговечность. Исследования с использованием сканирующего электронного микроскопа и X-лучевой микроанализа с обнаружением в инфракрасном спектре показали, что главный эффект модификации в случае добавления комплексных нанодисперсных систем обеспечивается направленным влиянием процессов гидратации с последующей кристаллизацией новообразований. Установлено, что при добавлении дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема формируется структурная матрица в виде чрезвычайно плотной оболочки из кристаллогидратных новообразований на поверхности твердой фазы, что обеспечивает прочную вяжущую матрицу в цементном бетоне. Эффект добавления углеродных нанотрубок анализировался и количественно оценивался исследованием в каждом случае одного образца с нанотрубками и одного без них с помощью наноиндентора и сканирующего электронного микроскопа. Чтобы количественно оценить эффект добавки углеродных нанотрубок на характеристики материала на микромеханическом уровне, необходимо решить сложную задачу. В то же время возможно исследовать поверхность бетонного образца с разрешением в 1 микрон. При этом необходима подготовка образцов для наноиндентирования с исключением всех эффектов дефектности углеродных нанотрубок, показанных сканирующим электронным микроскопом. Вместе с тем более адекватным методом оценивания в данном случае должен быть пикоиндентор, который комбинирует испытательный метод наноиндентирования с оптическим потенциалом сканирующего микроскопа. Такое оборудование находится в стадии полевых испытаний в Венском техническом университете. Исследование основано на том, что главный эффект модифицирования минеральной вяжущей матрицы с использованием включенных комплексных нанодисперсных систем и нанокремнезема обеспечивается непосредственным влиянием процессов гидратации и последующей кристаллизацией новообразований. Сканирующий электронный микроскоп и X-лучевой микроанализ с обнаружением в инфракрасном спектре показали, что введение дисперсии многослойных углеродных нанотрубок совместно с нанокремнеземом обеспечивает построение вдоль цементной матрицы очень плотной оболочки вновь образованных гидратов на поверхности твердой фазы. Структурированные поверхностные слои формируют отдельные ячейки в модифицированной цементной матрице, что обеспечивает формирование предельно наполненной системы и предопределяет структуры модифицированной цементной матрицы благодаря формированию пространственной упаковки. Следовательно, основным фактором, повышающим характеристики цементного бетона, модифицированного углеродными нанотрубками и нанокремнеземом, является структурная модификация гидросиликатов кальция относительно композиции и морфологии новообразований.

**Ключевые слова:** нанодисперсная система, многослойные углеродные нанотрубки, нанокремнезем, сканирующий электронный микроскоп, X-лучевой микроанализ, гидратация, цементный бетон

**Для цитирования:** Структурная модификация новообразований в цементной матрице с использованием дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема / Б. М. Хрусталеv [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 93–103. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-93-103

### Introduction

Carbon nanotubes (CNT) were first synthesized in 1952 (fig. 1) by the members of Institute of Physical chemistry and Electrochemistry of Russian Academy of Sciences, L. V. Radushkevich and V. M. Lukyanovich [1]. The main properties of CNT were systematically described by Sumio Iijima who discovered them in 1991 as

a by-product of fullerene synthesis [2]. The authors of the given study have synthesized carbon nanotubes using an original technology presented in patent [3] the technique of which is described in article [4]. The produced nanostructures were used to modify the structure of non-autoclaved cellular concrete. It was also shown that CNT increase the strength of aerated concrete by 70 %, while the stabilization of the pore structure with

their size and the decrease of the average density of aerated concrete are noted [5]. Further studies [6, 7] found that adding CNT changes not only the structure but also the composition of calcium hydrosilicates (CHS) that form the main values of the properties of dense cement concrete.

Calcium hydrosilicates are the main components of set cement at the nanoscale. The nature of their structure determines the values of strength and durability of cement concrete. There are some works which present the results of the studies of the changes in the morphology of crystalline hydrates based on calcium hydrosilicates due to adding nanodispersed modifiers based on carbon nanosystems to the hardening cement matrix [8–10]. Using a nanodispersed modifier can control the kinetics of the interaction between cement minerals and mixing water, influence the composition and structure of CHS, increase the degree of polycondensation of silicon-oxygen anions of calcium hydrosilicates. Thus, in the process of modification of cement matrix with CNTs one of the main issues is the directed regulation of the processes of polycondensation of silicon-oxygen anions in order to strengthen the borders of the contact areas and provide the increased strength, water- and frost-resistance of concrete.

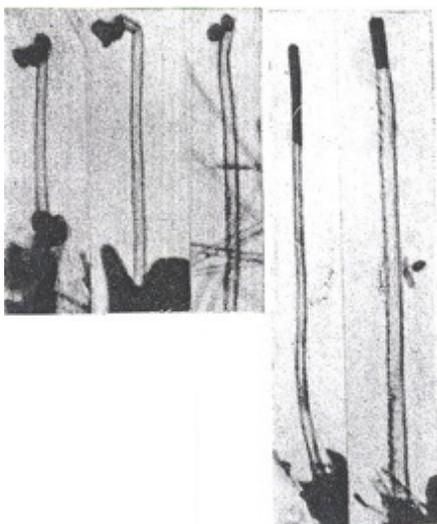


Fig. 1. Carbon nanotubes found in 1952 by the members of Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of Russian Academy of Sciences, L. V. Radushkevich and V. M. Lukyanovich [1]

Calcium hydrosilicates are the main components of set cement at the nanoscale. The nature of their structure determines the values of strength

and durability of cement concrete. There are some works which present the results of the studies of the changes in the morphology of crystalline hydrates based on calcium hydrosilicates due to adding nanodispersed modifiers based on carbon nanosystems to the hardening cement matrix [8–10]. Using a nanodispersed modifier can control the kinetics of the interaction between cement minerals and mixing water, influence the composition and structure of CHS, increase the degree of polycondensation of silicon-oxygen anions of calcium hydrosilicates. Thus, in the process of modification of cement matrix with CNTs one of the main issues is the directed regulation of the processes of polycondensation of silicon-oxygen anions in order to strengthen the borders of the contact areas and provide the increased strength, water- and frost-resistance of concrete.

In the review of the works about the use of CNTs [11–13] it is noted that most researchers limit the role of nanotubes to the nanoreinforcing of the set cement structure considering the microstructures containing carbon nanotubes, which are in physical contact with CHS or located in microcracks. The amount of the modifying nanotubes exceeds 0,05 % of weight of the binder, which is apparently caused by their insufficient dispersing, despite using various dispersing methods and applying surfactants for aqueous dispersions.

A lot of works suggest using two or more nanosystems for the modification of cement concrete, nanosilica being used as the second additive in most cases [14–17], which due to the synergistic effect from being used with CNTs intensifies the processes of CHSs forming, densifying the structure of set cement. At the same time, these systems can significantly change the structure of the interphase boundaries in cement composites due to the crystallization of new CHS formations on the surface of the solid phase with the formation of dense shells that connect the components of cement concrete. This dramatically increases the role of nanosilica which binds calcium hydroxide to form CHS contributing to extra densifying of lowly cohesive new formations.

Thus, adding nanosized particles to the concrete composition enables the control of the processes of hydration and formation of the hardening cement structure at the nanoscale, providing the directed formation of the required macrostructure to achieve the required properties of concrete.

At the same time the nature of self-organization of the cement concrete microstructure is not clear, nanosystems being added, especially CNT that provide the formation of high-strength set cement from the originally lowly cohesive new crystalline hydrate formations.

### Materials and Methods

Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) were used as an aqueous dispersion of Vulvek 100 “Novyy Dom”, LLC (Izhevsk) prepared on the basis of Graphistrength™ Masterbatch CW2-45 premix produced by Arkema Group Co. French company. The premix containing 55 % of carboxymethylcellulose and 45 % of MWCNT was dispersed in a high-speed bead mill mixer.

The binder used was Portland cement of CEM I 42.5N JSC “Nevyansky Cementnik”; the fine aggregate – ditch sand from Selychinskoye deposit (Udmurtia) meeting the requirements of GOST 8736; coarse aggregate – ballast stone from river gravel of 5–20 mm fraction meeting GOST 8267 from Kama deposit.

The amorphous finely-dispersed silica includes a mixture comprising 90 % of microsilica MK-85 (Tula) with an average particle size of 300 nm and 10 % of synthetic nanosilica Nanosilika (Cairo) with an average particle size of 15 nm.

The microstructure of the produced samples was studied with a scanning electron microscope JSM-7600F of JEOL company and Phenom G2 Pure. The analysis of set cement by means of infra-

red spectroscopy was conducted with a FT-IR spectrometer of Spektrum One in the frequency range of 4000–650  $\text{cm}^{-1}$ .

The water resistance of the samples was determined by means of a “wet spot” test on the certified unit, as well as “VIP-1.2” device concerning the air permeability of the concrete samples. The frost-resistance tests were carried out by means of accelerated method using heat-cold chamber KTH-74.

### Results and Discussion

The main task, the solution of which determines further development of technology of cement concrete modification by means of carbon nanotubes, is to produce a stable dispersion that would not be broken down for a long time due to the CNT coagulation. This task is solved by dispersing CNTs in aqueous solutions of surfactants when exposed to ultrasound [9, 18]. Using high-speed bead mill can improve dispersing MWCNT and apply the produced dispersions on an industrial scale [7]. At the same time, in such dispersion the amount of nanotubes does not exceed 20–25 %, the remaining volume of the particles is located in the range of several micrometers (fig. 2a). The additional processing of this dispersion with ultrasound provides dispersing nanotubes to nanometer size (the average particle size is 25 nm). Thus, according to the average particle size (fig. 2b), nanotubes do not only separate, but also are destructed and possibly broken down.

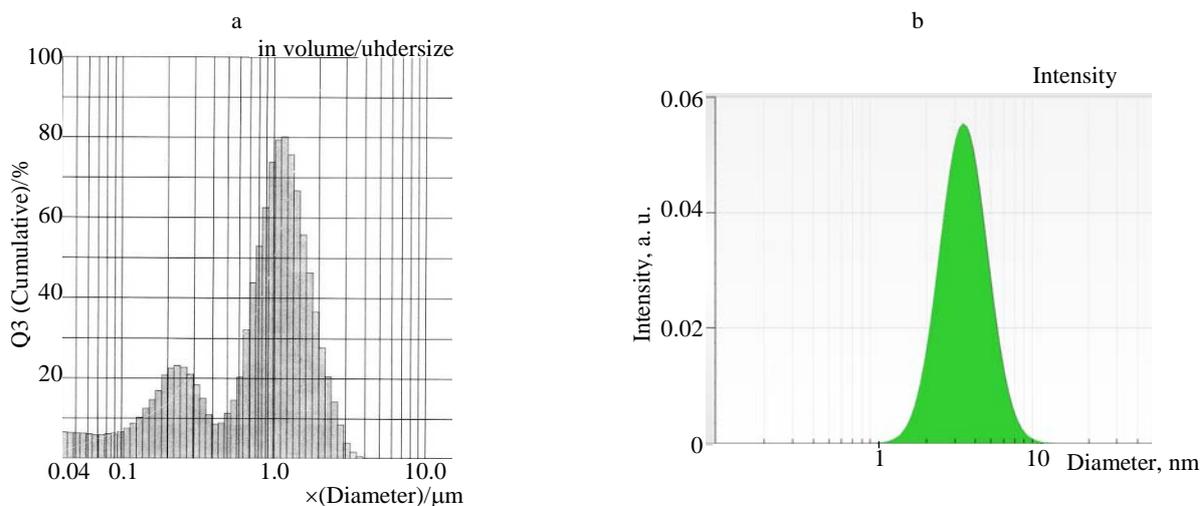


Fig. 2. Distribution of multi-walled carbon nanotubes in aqueous dispersion: a – after processing in a high-speed bead mill; b – after additional ultrasound processing

The analysis of the influence of dispersion on mechanical properties of set cement in the composition of fine concrete shows the increase in strength, which is in direct proportion to the duration of ultrasonic processing of dispersion (fig. 3). The conducted studies show that the concentration of nanotubes in the set cement matrix can be limited to 0.001 % from the weight of Portland cement, and the strength values of the set cement will not yield to the values shown in fig. 3.

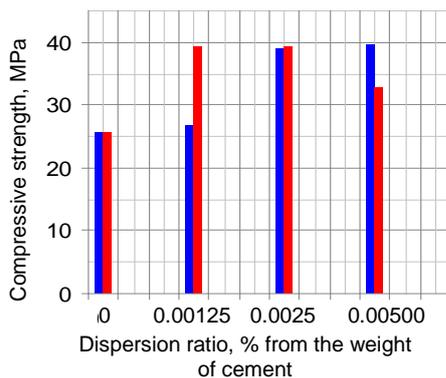


Fig. 3. Compressive strength of cement concrete modified with MWCNT dispersion: ■ – produced with high-speed bead mixer; ■ – after ultrasound processing of the dispersion for 20 min

Taking into account the destruction of multi-walled CNTs with such combined dispersing technology, it is necessary to interpret the strength increase of the cement matrix as in this case the traditional reference to nanoreinforcing of the cement matrix by means of carbon nanotubes is not correct enough. The main effect of the modification of set cement in this case is provided by structuring the new crystalline hydrate formations based on CHS. At the same time due to the contact interactions of the structured boundary layers the spatial frame

cells are formed in the structure of the modified matrix. A large number of point contacts ensure the formation of extremely filled system in which the collective transfer to adhesion in a short-range order leads to the hardening of the structure of the modified binding matrix due to the formation of spatial packing of CHS (fig. 4). This leads to a dense and strong mineral matrix that provides durable composite material for construction purposes.

Therefore, it is necessary to pay attention to the microstructure of the new formations in the set cement matrix and, above all, to the composition and morphology of CHS. In the process of cement setting crystalline hydrates cover the surface of the solid phase in the composition of cement concrete with a thin layer of 3–10 microns of dense new formations (fig. 5a, b) forming high-strength shells that combine the components of concrete in a frame. Carbon nanotubes being denuded, in the case of formation of shrinkage cracks, the nanotube surface is overgrown with calcium hydrosilicates (fig. 5c). In certain cases carbon nanotubes can provide “self-healing” of cracks with new formations, crystallization of which is stimulated with nanotube surface.

To determine the composition of the cement matrix adjacent to the surface of basalt fiber, X-ray microanalysis of new formations was conducted. Its results are presented in fig. 6. Based on the results of X-ray microanalysis, it can be argued that around the basalt fiber there are dense structured shells from the new formations of sheet structure (calcium hydroxide) coated with amorphous calcium hydrosilicates. The presence of carbon in the composition confirms the presence of carbon nanotubes in the studied microvolume.

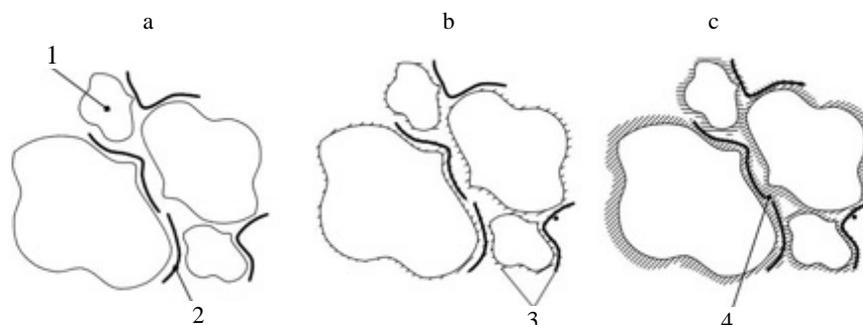


Fig. 4. Scheme of the structuring of the set cement modified with CNTs: a – distribution of CNT in the set cement after tempering; b – structuring the new crystalline hydrate formations based on CHS; c – forming of the special packing from CHS; 1 – particles of cement clinker; 2 – carbon nanotubes; 3 – new formations based on CHS; 4 – structured boundary layers

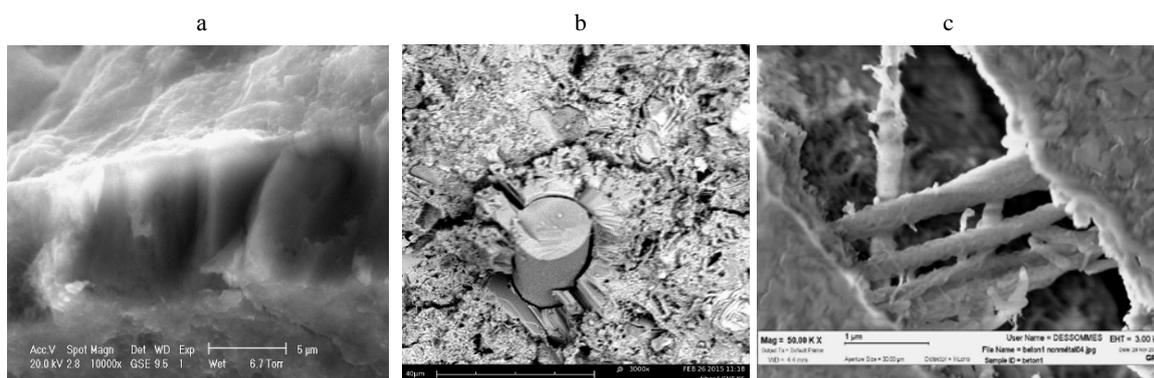


Fig. 5. Microstructure of the cement matrix modified with carbon nanotubes in cement concrete with dense new formations: a – on the surface of quartz sand; b – the surface of basalt fiber [19]; c – carbon nanotubes in a shrinkage crack coated with calcium hydrosilicates

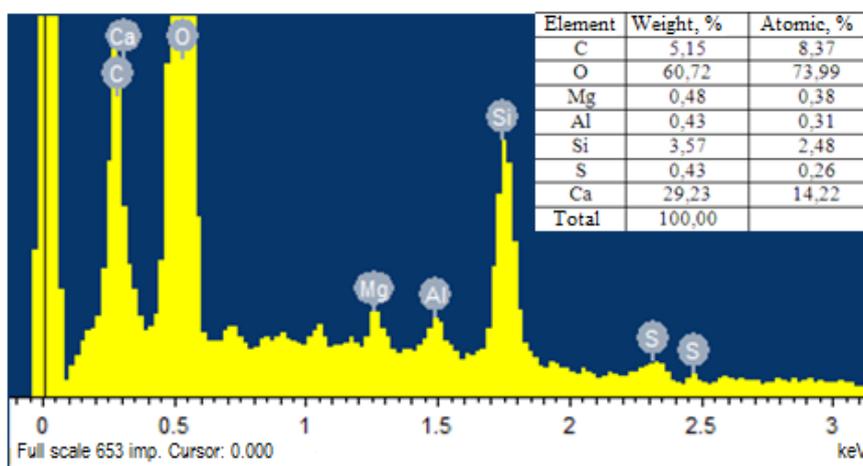


Fig. 6. Results of X-ray microanalysis of new formations on the surface of basalt fiber [19]

Using a complex additive comprising MWCNT dispersion along with nanosilica leads to the densification of the structure of set cement in the space between the structured shells (fig. 7a), new hydrosilicate formations appearing as clusters in the presence

of silica fume (fig. 7b), and additionally densifying the binding matrix in the composition of cement concrete (fig. 7c). Such structure leads to a significant increase in the cement strength in the composition of the modified concrete.

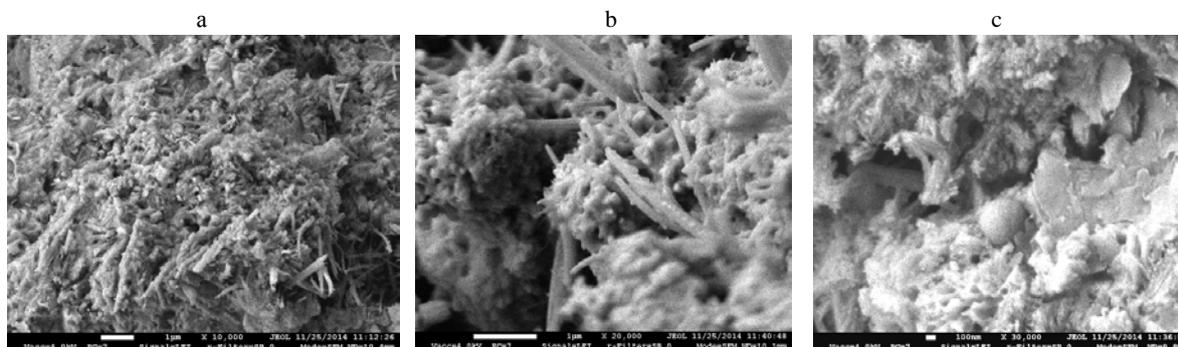


Fig. 7. The microstructure of cement concrete modified with the complex additive (“DC-5” with 8 % of nanosilica): a – densification of crystalline structure with new hydrosilicate formations; b – fragment of microstructure with densifying bunch-like new formations; c – fragment of microstructure with a particle of nanosilica

Infrared spectral analysis of the check sample (fig. 8a) and the samples modified with a complex additive (fig. 8b) confirms the intensification of hydration of Portland cement along with the formation of additional calcium hydrosilicates (increase in the intensity of the absorption lines 1085 and 1089  $\text{cm}^{-1}$ ). The formation of calcium hydrosilicates of different basicity is also confirmed with an additional absorption line of 1033  $\text{cm}^{-1}$ .

Thus, the use of complex additives with multi-walled carbon nanotubes and nanosized silica significantly changes the set cement structure in the modified concrete due to the directed crystallization of new formations based on calcium hydrosilicates, stimulating their crystallization of the surface of solid phase components of concrete. At that, not only the morphology of new formations, but their mineralogical composition changes, as well as the basicity of calcium hydrosilicates, which in its turn determines their strength characteristics [20].

### Experimental Results

To check the actual influence of the CNTs on the characteristics of the concrete, samples

without CNTs (type A) and with CNTs (type B) were subjects to several series of experiments performed at the Institute for Mechanics of Materials and Structures at Vienna University of Technology: They were examined by the help of a nanoindenter and with a scanning electron microscope (SEM).

*Results of nanoindentation on two concrete samples.* For this test series, one sample of type A and B have been used. One each of the two samples an extensive test series was performed with a Hysitron Triboindenter, analogous to test series conducted before on other concrete samples [21, 22]. For each single measurement, the force was increased over 10 s up to a maximum value of approximately 1200  $\mu\text{N}$ , kept constant for 5 s and then again linearly decreased over 10 s. If the force is plotted as a function of the depth, we get curves as in fig. 9.

Actually, the indentation depth  $h$  is a function of the force  $F$ , which is given by the indenter, but usually  $F(h)$  is plotted instead of  $h(F)$ . The elastic material parameters, such as Young's modulus  $E$  and the hardness  $H$  can be calculated based on the curve sector with decreasing force [23].

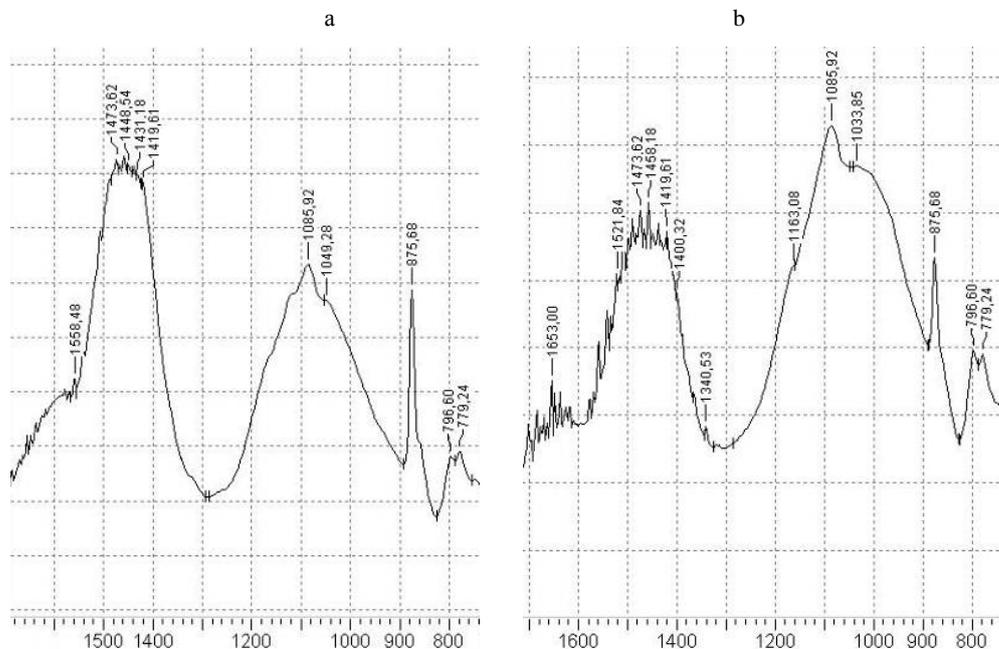


Fig. 8. IR-spectra of the cement matrix in the check sample (a) and the sample modified with a complex additive (b) (MWCNT dispersion with nanosilica)

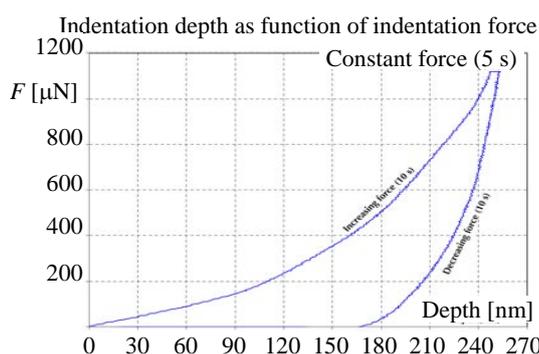


Fig. 9. Force as a function of the indentation depth for one indent on concrete

For performing the indents, first the top side of each sample was polished to get a smooth test surface, which is necessary as a reference for measuring the indentation depth as precise as possible. As can be seen in fig. 10, the remaining height fluctuations in the pictured area were in the range of a few microns. (It was only possible to reduce the roughness to a certain degree, because during the polishing smaller parts of the material, but also parts in the range of 1 mm and more crumbled away from the samples. This way, not only the roughness was increased locally, but also the whole sample became smaller and smaller.)

With every indent, Young's modulus  $E$  as well as the hardness  $H$  of the material is quantified at the respective reading point. An area of  $100 \times 100 \mu\text{m}$  was examined on both samples with a grid of  $40 \times 40$  indentations, resulting in a total sum of 1600 measurement on every sample. (Each of these test series took about 3 days.) Fig. 11a shows the results for sample type A and fig. 11b shows the analogous results for sample type B. In the

same way the hardness can be plotted, but the pattern for this parameter is rather similar to the pattern of the modulus, though the variation of the results is even higher, as demonstrated in tabl. 1.

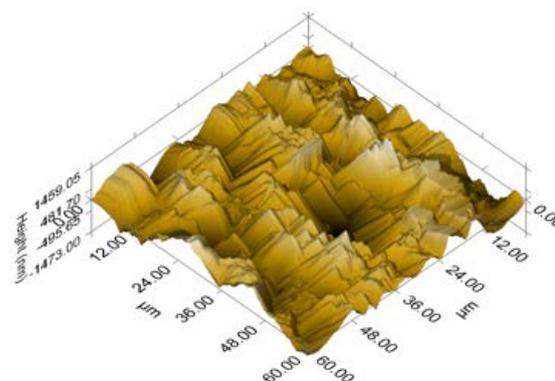


Fig. 10. Scan of an area of  $60 \times 60 \mu\text{m}$  of the polished surface of sample type B, as done with the imaging mode of the nanoindenter

Table 1  
Mean values and standard deviation for Young's modulus and hardness, based on 1600 single measurements for each sample type

	Type A	Type B
Young's modulus $E$ , GPa	$47,80 \pm 31,20$	$56,30 \pm 38,70$
Hardness $H$ , GPa	$2,56 \pm 3,09$	$3,82 \pm 6,04$

While for the modulus, the standard deviation is in the range of 65 % of the mean values, for the hardness the standard deviation even exceeds the mean values, though test areas have been chosen, which appeared relatively homogeneous in the optical microscope attached to the nanoindenter, as shown in fig. 12.

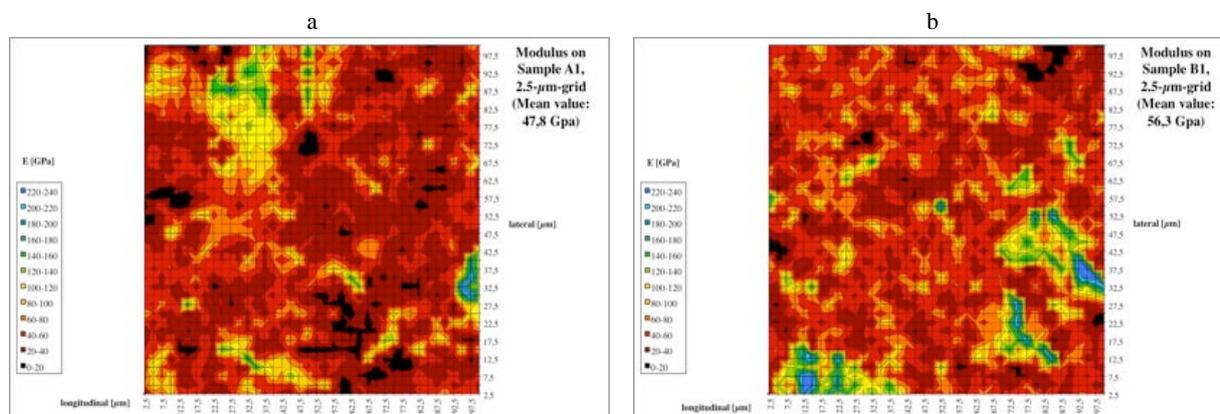


Fig. 11. Young's modulus on sample type A (a) and type B (b), as calculated on the basis of a  $40 \times 40$  grid of indents

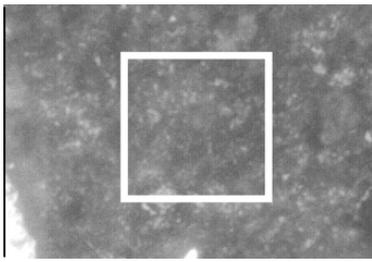


Fig. 12. Image of an optical microscope of the test area for type B (marked by the white square)

The distribution of  $E$ , as given in figs. 11a and 11b, suggests that it is not a mere statistical distribution. Instead there are areas with significantly higher (or lower) modulus, compared to the average. For example, there is a zone in the lower left part of fig. 4, where  $E$  is higher than 100 GPa throughout and reaches maximum values of 250 GPa.

These variations of  $E$  and  $H$  probably result from the spatial distribution of the various phases of the material. This distribution is also reflected in the histograms of Young's modulus, as given in fig. 13.

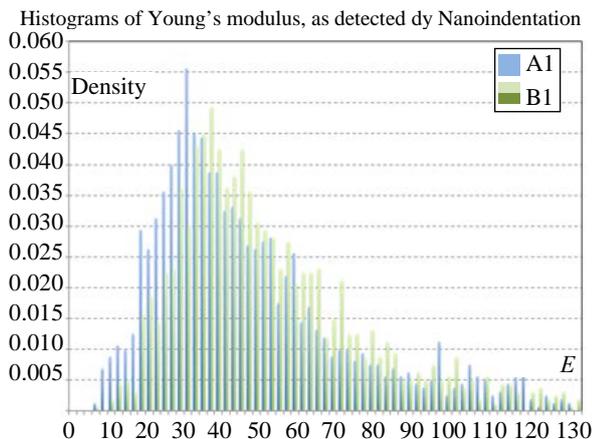


Fig. 13. Histograms of Young's modulus for the test results in fig. 11a and 11b

While there is a distinct global maximum for the distribution at approximately 30 GPa (type A) and 36 GPa (type B), it would be challenging to identify any local maxima and therefore to distinguish the various phases, based on this test series. There is also no systematic pattern in the distribution of  $E$ , and there are no significant structures visible in the optical images of the inspected areas, which clearly reflect the measured distribution of the modulus. Especially it wasn't possible to detect any elongated structures, which might have been caused by nanotubes. One reason for that might be

the distance of 2,5  $\mu\text{m}$  between two indents, which is roughly the tenfold of the presumed diameter of the nanotubes. Other possible reasons will be discussed at the end of this paper.

To check if it is in principle feasible to detect nanotubes with the indenter, one concrete sample of each type has been inspected by the help of a Scanning Electron Microscope.

*Results of microscopic determination of concrete samples.* For this part of the work, an analytical high-resolution FEGSEM of the type FEI Quanta 200 FEGSEM has been used, which is available at the Vienna University of Technology [24]. Again, the two concrete cubes inspected by the SEM were both polished on the top side, but because of the roughness of the material and its tendency to brittle, only a part of the visible surface of the prepared side was effectively polished, while on the rest of the top side there was a relatively rough fracture surface left. These disparities are also visible of the images obtained by the SEM.

In the middle of fig. 14a there is a relatively smooth area, which is obviously the result of the polishing process. (On closer inspection, flimsy scratches are visible, all running in the same direction, which is a typical byproduct of the polishing process.) Contrary to that, the surface in fig. 14b is much rougher and completely irregular. A similar distinction was found for the sample of type B; see fig. 15a and 15b.

The images in fig. 15a to 15b were done with the same magnification ( $\times 1000$ ) and also otherwise with the same parameters. While the polished area on the left half of fig. 15a has a similar appearance to the polished area in fig. 14a, there are elongated structures visible in the unpolished area of fig. 15a as well as in fig. 15b, which are not visible in fig. 14b. With higher magnification ( $\times 10000$ ), these structures can be identified as nanotubes (fig. 16a). While in the unpolished areas the nanotubes are clearly visible, especially in zones of cracks and pores, it seems that they are destroyed by polishing the surface, or that they are covered with attrition material and therefore neither visible in the SEM nor detectable by the nanoindenter.

This process would explain why the mean values of  $E$  and  $H$ , as identified by the test series with the nanoindenter and as listed in tabl. 1, are rather similar for concrete types A and B, since the absolute concentration of Nanotubes in the concrete material is only a fraction of a percent.

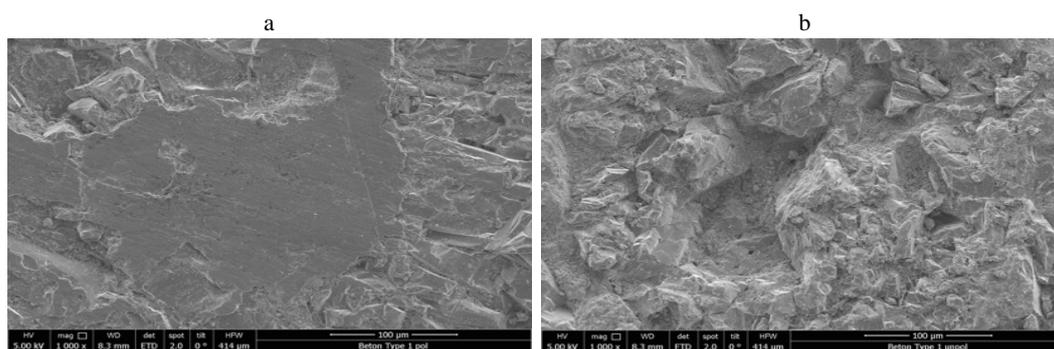


Fig. 14. Polished area of concrete sample type A (a) and Unpolished area of concrete sample type A (b)

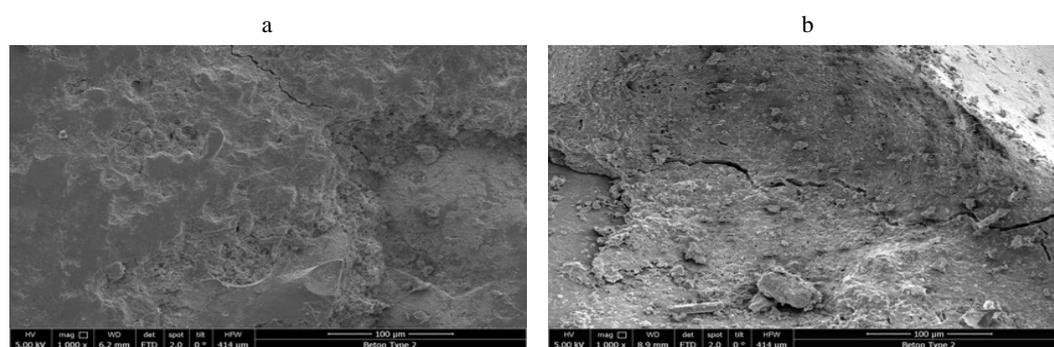


Fig. 15. Polished area of concrete sample type B (a) and unpolished area of concrete sample type B (b)

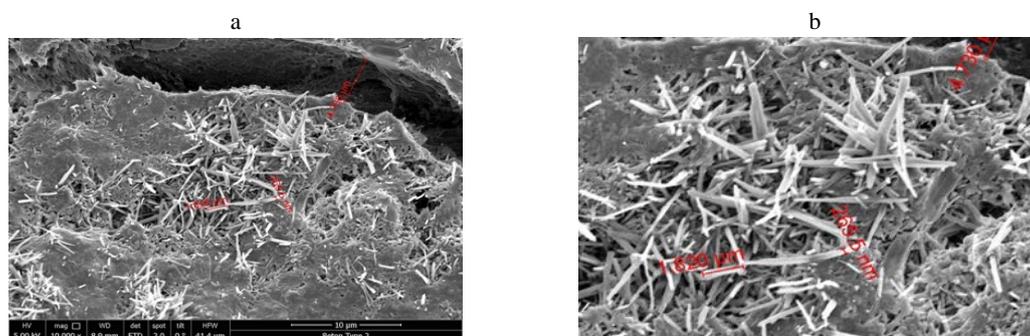


Fig. 16. a – detail of fig. 15b with nanotubes from magnification ( $\times 10000$ );  
b – detail of fig. 15b with nanotubes from magnification ( $\times 20000$ )

## CONCLUSIONS

1. The research has found that the main effect of the modification of mineral binding matrices using complex nanodispersed systems comprising MWCNT and nanosilica is ensured with the directed influence on the hydration processes and the subsequent crystallization of new formations. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis confirmed with IR-spectra have revealed that adding multi-walled carbon nanotubes dispersion together with nanodispersed silica provides the structuring of the binding matrix along with the perfect dense shell of hydrated new formations on the surface of solid phases. The structured inter-

facial layers form the special frame cells in the modified cement matrix which ensures the formation of extremely filled system predetermining the strengthening of the structure of the modified binding matrix due to the formation of the spatial packaging. Consequently, the main factor increasing the characteristics of cement concrete modified with carbon nanotubes and nanosilica is the structural modification of calcium hydrosilicates concerning both the composition and the morphology of new formations.

2. To quantify the effect of the addition of the CNT on the characteristics of the material on a micro-mechanical level proved to be a challenging

task, though. While it is possible to inspect the surface of a concrete sample with a resolution in a range of 1 micron, the necessary process of preparation of the samples for the nanoindentation probably obliterates all detectable effects of the CNTs, as shown by a SEM. Therefore, a more adequate examination method in this case would be a so-called picoindenter, which basically combines the test method of a nanoindenter with the optical potential of a SEM. Such an instrument is right now at the stadium of field testing at the Vienna University of Technology, though, and hopefully will be available at a later date.

## REFERENCES

- Radushkevich L. V., Lukyanovich V. M. (1952) On the Structure of Carbon Produced at Thermal Decomposition of Carbon Monoxide on an Iron Contact. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii* [Journal of Physical Chemistry], 26 (1), 88–95 (in Russian).
- Iijima S. (1991) Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature*, 354 (6348), 56–58. DOI: 10.1038/354056a0.
- Babushkina S. N., Kodolov V. I., Kuznetsov F. P., Nikolaeva O. A., Yakovlev G. I. *Method of Producing Carbon and Metal Containing Nanostructures*. Patent of the Russian No 2169699 (in Russian).
- Kodolov V. I., Shabanova I. N., Makarova L. G., Khokhryakov N. V., Kuznetsov A. P., Nikolaeva O. A., Kerenne J., Yakovlev G. I. (2001) Structure of the Products Simulated Carbonization of Aromatic Hydrocarbons. *Journal of Structural Chemistry*, 42 (2), 215–219. DOI: 10.1023/a:1010562914410.
- Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girniene I. (2006) Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes. *Materials Science*, 12 (2), 147–151.
- Yakovlev G., Pervushin G., Maeva I., Keriene Ja., Pudov I., Shaybadullina A., Buryanov A., Korzhenko A., Senkov S. (2013) Modification of Construction Materials with Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Procedia Engineering*, 57, 407–413. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.053.
- Yakovlev G. I., Pervushin G. N., Polyanskikh I. S., Senkov S. A., Pudov I. A., Mohamed A. E. (2014) Concrete of Increased Durability for Producing Transmission Line Poles. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (5), 92–94 (in Russian).
- Ponomaryov A. N. Nanoconcrete – Conception and Issues (2007). *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (7), 2–4 (in Russian).
- Sobolkina A., Mechtcherine V., Khavrus V., Maier D., Mende M., Ritschel M., Leonhardt A. (2012) Dispersion of Carbon Nanotubes and its Influence on the Mechanical Properties of the Cement Matrix. *J. Cement & Concrete Composites*, 34, 1104–1113. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.07.008.
- Korolyov E. V. (2014) Nanotechnology in Construction Material Science. Analysis of the State and Achievements. Ways of Developments. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (11), 47–79 (in Russian).
- Shama Parveen, Sohe Rana, Rau Fanguero (2013). A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites. *Journal of Nanomaterials*, 2013, 1–19. DOI: 10.1155/2013/710175.
- Saptarshi Sasmal, B. Bhuvaneshwari, Nagesh R. Iyer (2013). Can Carbon Nanotubes Make Wonders in Civil Structural Engineering? *Progress in Nanotechnology and Nanomaterials*, 2 (4), 117–129. DOI:10.5963/pnn0204003.
- Šmilauer V., Hlaváček P., Padevet P. (2012) Micromechanical Analysis of Cement Paste with Carbon Nanotubes. *Acta Polytechnica*, 52 (6), 22–28.
- Mehmet Gesoglu, Erhan Güneyisi, Diler Sabah Asaad, Guler Fakhraddin Muhyaddin (2016). Properties of Low Binder Ultra-High Performance Cementitious Composites: Comparison of Nanosilica and Microsilica. *Construction and Building Materials*, 102, 706–713. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.020.
- Anand Hunashyal1, Nagaraj Banapurmath, Akshay Jain, Sayed Quadri, Ashok Shettar (2014). Experimental Investigation on the Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Nano-SiO<sub>2</sub> Addition on Mechanical Properties of Hardened Cement Paste. *Advances in Materials*, 3 (5), 45–51. DOI: 10.11648/j.am.20140305.13.
- Péter Ludvig, José M. Calixto, Luiz O. Ladeira, Ivan C. P. Gaspar (2011). Using Converter Dust to Produce Low Cost Cementitious Composites by in Situ Carbon Nanotube and Nanofiber Synthesis. *Materials*, 4, 575–584. DOI: 10.3390/ma4030575.
- Sakthieswarana N., Sureshb M. (2015). A Study on Strength Properties for Cement Mortar Added with Carbon Nanotubes and Zeolite. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 4 (6), 12402–12406.
- Jyoti Bharj, Sarabjit Singh, Subhash Chander, Rabinder Singh (2014) Role of Dispersion of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Compressive Strength of Cement. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 8 (2), 340–343.
- Saraykina K. A., Golubev V. A., Yakovlev G. I., Fedorova G. D., Alexandrov G. N., Plekhanova T. A., Dulesova I. G. (2015) Modification of Basalt Concrete with Nanodispersed Systems. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (10), 64–69 (in Russian).
- Karpova E. A., Ali Elsaed Mohamed, Skripkiunas G., Keriene Ja., Kicaite A., Yakovlev G. I., Macijauskas M., Pudov I. A., Aliev E. V., Senkov S. A. (2015) Modification of Cement Concrete by Use of Complex Additives Based on the Polycarboxylate Ether, Carbon Nanotubes and Microsilica. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (2), 40–48 (in Russian).
- Lahayne O., Eberhardsteiner J., Yakovlev G., Leonovich S., Pervushin G. (2013) Nano-Tests on Concrete Samples with and without Nanotubes. *Mekhanika Razrusheniya Betonov, Zhelezobetonov i Drugikh Stroitelnykh Materialov Sbornik Statei po Materialam 7-i Mezhdunarodnoi Nauchnoi Konferentsii. Tom 2* [7<sup>th</sup> International Scientific Conference “Fracture Mechanics of Concrete, Reinforced Concrete and Other Building Materials”. Vol. 2], Voronezh, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, 2013.
- Eberhardsteiner J., Lahayne O. (2014) Nano-Tests on Concrete Samples with and without Nanotubes. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], (1–2), 21–24.
- With an Account on [www.hysitron.com](http://www.hysitron.com), the Manual of the Nanoindenter Can be Downloaded by Using this Link. Available at: <https://support.hysitron.com/downloads/User%20Manuals/TI%20900%20TriboIndenter%20User%20Manual.pdf>.
- Homepage of the USTEM (University Service Facilities for Transmissions Electron Microscopes), Vienna University of Technology, Austria. Available at: [http://www.ustem.tuwien.ac.at/instrumentation/fei\\_quanta\\_200\\_fegsem/EN/](http://www.ustem.tuwien.ac.at/instrumentation/fei_quanta_200_fegsem/EN/).

Received: 22.12.2016

Accepted: 24.02.2017

Published online: 28.03.2017

## Технология и эффективность использования золы бурых углей Лельчицкого месторождения в цементе и бетонных смесях

Докт. техн. наук, проф. Г. Д. Ляхевич<sup>1)</sup>,  
акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. И. И. Лиштван<sup>2)</sup>,  
канд. экон. наук, доц. А. Г. Ляхевич<sup>1)</sup>,  
кандидаты техн. наук В. М. Дударчик<sup>2)</sup>, В. М. Крайко<sup>2)</sup>, асп. С. А. Звонник<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Институт природопользования НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** В современных представлениях о роли высокодисперсных добавок в бетонных смесях отмечается положительное влияние оптимального количества золы от сжигания твердого топлива на структуру и физико-механические характеристики цементных композиций: упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями с образованием кластеров «вяжущее – наполнитель» за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя; снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя; связывание гидроксида кальция аморфизованным кремнеземом пуццолановых наполнителей; повышение пуццоланической активности наполнителя при его тонком измельчении и др. Экспериментальными исследованиями установлено, что использование в сырьевых смесях портландцементного клинкера образцов золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения способствовало увеличению жизнеспособности и активности цемента. Получены образцы бетона с улучшенными физико-механическими свойствами благодаря введению в их состав 2–14 % (от массы цемента) золы от сжигания бурого угля и 1,6–2,1 % натриевой соли продукта конденсации сульфоксида ароматических углеводородов с формальдегидом. Эффективность выполненной работы подтвердилась решением вопросов увеличения жизнеспособности цементного теста, активности цемента, прочности бетона. Не менее важной решаемой проблемой является защита окружающей среды от загрязнений золой от сжигания высокозольных бурых углей.

**Ключевые слова:** технология, эффективность, зола, бурые угли, Лельчицкое месторождение, цемент, бетонные смеси

**Для цитирования:** Технология и эффективность использования золы бурых углей Лельчицкого месторождения в цементе и бетонных смесях / Г. Д. Ляхевич [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 104–112. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-104-112

## Technology and Efficiency in Usage of Brown Coal Ash for Cement and Concrete Mixtures at the Lelchitsky Deposit

G. D. Lyahevich<sup>1)</sup>, I. I. Lishtvan<sup>2)</sup>, A. G. Lyahevich<sup>1)</sup>, V. M. Dudarchik<sup>2)</sup>, V. M. Kraiko<sup>2)</sup>, S. A. Zvonnik<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Institute for Nature Management of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Modern visions on the role of high-dispersity additives in concrete mixtures reflect a positive effect of optimal amount of ash left after combustion of solid fuel on structure and physico-mechanical characteristics of cement compositions: hardening of contact zone between cement stone and aggregates with formation of “binder – aggregate” clusters due to high surface energy of aggregate particles; reduction of total cement stone porosity in concrete while increasing volumetric concen-

### Адрес для переписки

Ляхевич Генрих Деонисьевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 263-64-77  
mit\_ftk@bntu.by

### Address for correspondence

Lyahevich Genrih D.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 263-64-77  
mit\_ftk@bntu.by

tration and aggregate dispersion; binding of calcium hydroxide by amorphized silicon of pozzolanic aggregates; increase in pozzolanic aggregate activity with its fine grinding, etc. Experimental investigations have ascertained that usage of portland cement clinker ash samples left after brown coal burning at the Lelchitsky deposit contributed to an increase of cement working life and activity. Concrete samples have been obtained that have improved physico-mechanical properties owing to introduction the following components in their composition: 2–14 % (of cement mass) of ash left after brown coal burning and 1.6–2.1 % of sodium salt that is a condensation product of sulfur oxidate in aromatic hydrocarbons with formaldehyde. Efficiency of the executed work has been proved by solution of the problems pertaining to an increase of neat cement working life, cement activity, concrete strength. The paper also considers no less important problem concerning protection of the environment from contamination with ash left after burning of high-ash brown coal.

**Keywords:** technology, efficiency, ash, brown coal, Lelchitsky deposit, cement, concrete mixtures

**For citation:** Lyahevich G. D., Lishtvan I. I., Lyahevich A. G., Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Zvonnik S. A. (2017) Technology and Efficiency in Usage of Brown Coal Ash for Cement and Concrete Mixtures at the Lelchitsky Deposit. *Science and Technique*. 16 (2), 104–112. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-104-112 (in Russian)

## Введение

Улучшение физико-механических свойств цементобетона может быть достигнуто путем введения в бетонную смесь различных добавок и прежде всего золы от сжигания твердого топлива. В мире ежегодно образуется более 390 млн т золы, при этом используется ее менее 15 % [1]. Бетонные смеси с золой обладают большей связностью, меньшим водоотделением и расслоением. Бетон имеет при этом большие прочность, плотность, водонепроницаемость, стойкость к сульфатной коррозии, меньшую теплопроводность. Известные технологии производства цементных вяжущих веществ являются весьма трудо- и энергоемкими процессами. Они включают добычу материала из недр земли, его обогащение и многоступенчатую обработку: дробление, помол, сушку, обжиг и снова помол, а также способствуют существенному загрязнению окружающей среды: земли, воды и атмосферы. Все это приводит к высокой стоимости цементных вяжущих и бетонов на их основе.

## Теоретические аспекты влияния золы от сжигания твердого топлива на бетон

Положительному влиянию золы на структурообразование бетона способствует эффект мелких порошков [2–5]. Факторы, которые считаются основными при оценке влияния высокодисперсных наполнителей на свойства цементного камня и бетона, связаны с физическим эффектом (эффектом микронаполнителя) либо с реакциями активных гидравлических составляющих. Эффект микронаполнителя проявляется в том, что мелкие частицы золы имеют более тонкий гранулометрический состав, чем порт-

ландцемент. Пуццолановая активность проявляется при любых способах введения добавок, а микронаполняющий эффект – лишь при росте содержания дисперсных частиц в смеси [6–8]. Но при высокой степени наполнения после достижения его максимума происходит уменьшение прочности бетона, несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня вследствие ухудшения сцепления наполненного цементного камня с заполнителем [9–20]. Увеличение количества наполнителя выше оптимального приводит к разбавлению цементного камня наполнителем, к нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера и уменьшению прочности.

При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Наглядным критерием этого состояния является достижение максимально плотной упаковки частиц в тесте, если частицы наполнителя значительно мельче частиц цемента, или достижение максимального насыщения цемента наполнителем без образования контактов частиц наполнителя между собой, если частицы наполнителя и цемента соизмеримы. Экспериментальные данные [14, 15] на цементном тесте с добавкой 20 % кремнеземистой пыли показали, что кремнеземистая пыль – побочный продукт производства ферросилиция – ускоряет гидратацию портландцемента и шлакопортландцемента уже в первые часы после затворения. Изучено влияние высокодисперсной золы на свойства бетона [16, 17]. Введение в бетон добавки высокодисперсной золы заметно влияет на его свойства. При осадке конуса бетонных смесей, равной 16,5–21,0 см, добавка высокодисперсной золы снижает расход супер-

пластификатора. Исследования выявили также, что добавка высокодисперсной золы способствует повышению сульфатостойкости бетона (при использовании добавки в сочетании с высокоалюминатным цементом). Установлено, что при содержании в бетоне золы в количестве 8 % от массы цемента он отличается высокой, а при содержании золы 12 и 16 % очень высокой сульфатостойкостью.

При изучении морозостойкости образцы бетона с добавкой 8 % микрокремнезема и бетона с добавкой 12 % золы-уноса подвергали воздействию 900 циклов попеременного замораживания-оттаивания. Проведенные испытания не выявили заметного снижения динамического модуля упругости образцов из бетона всех составов. Установлено также, что бетон с добавкой высокодисперсной золы меньше подвержен трещинообразованию в результате развития усадочных деформаций, чем бетон с добавкой микрокремнезема [16–20]. Введение в бетон высокодисперсной золы оказывает положительное влияние на его свойства, в частности снижает его хлоридопроницаемость, что дает возможность значительно повысить долговечность железобетонных элементов в условиях эксплуатации, подвергающихся воздействию хлоридов. Можно считать, что применение в бетоне добавки высокодисперсной золы в количестве 8–12 мас. % придает ему эксплуатационные свойства, которые эквивалентны свойствам бетона с добавкой 8 % микрокремнезема.

### Характеристика золы от сжигания твердого топлива

Строение и состав золы зависят от целого комплекса одновременно действующих факторов: вида и морфологических особенностей сжигаемого топлива; тонкости помола в процессе его подготовки; зольности топлива; химического состава минеральной части топлива; температуры в зоне горения; времени пребывания частиц в этой зоне и др. Одна из существенных характеристик золы как активной минеральной добавки в бетон – ее гидравлическая активность. Традиционными методами она определяется по способности золы поглощать известь из известкового раствора, а также про-

являть вяжущие свойства в сочетании с гидратной известью.

Требования к золам как к активным минеральным добавкам в бетонную смесь обусловлены физико-химическим механизмом их влияния на процессы твердения и структурообразования бетона. Гидравлическая активность зол, как и других веществ пуццоланового типа, в значительной мере обусловлена химическим взаимодействием входящих в них оксидов кремния и алюминия с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе клинкерных минералов, с образованием гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. Гидратации зол способствует их стекловидная фаза, а кристаллическая фаза в этом процессе практически инертна. Химическая активность зол непосредственно связана также с их дисперсностью.

Зола представляет собой преимущественно силикатное стекло, слагающий его аморфный кремнезем химически активен по отношению к  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , выделяющемуся при гидратации цемента (так называемая пуццоланическая активность). Реакция между ними приводит к образованию высокодисперсных гидросиликатов кальция (типа  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) с высокой связующей способностью взамен малопрочного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Кроме пуццоланического эффекта, зола оказывает на бетон и значительное физическое воздействие, которое принято называть эффектом микронаполнителя. В чистом виде он проявляется в повышении прочности при введении в бетон инертных порошков. Его основой можно считать увеличение концентрации дисперсных частиц в цементном тесте, что вызывает снижение пористости теста. Введение золы улучшает зерновой состав цементно-песчаной составляющей, уменьшает расслоение бетонной смеси и повышает однородность бетона. Следует отметить, что «стабилизирующая» роль золы возрастает в связи с тенденцией применения в монолитном строительстве все более подвижных смесей с повышенной склонностью к расслоению.

При увеличении расхода цемента расслоение бетонной смеси снижается, но повышается тепловыделение твердеющего бетона, что может привести к образованию микротрещин уже на ранних стадиях твердения. Сокращение расхода цемента при введении золы снижает тепловыделение и вероятность образования

термических микротрещин, что также улучшает структуру бетона. В массивном бетоне опасность микротрещин существенно возрастает, и положительная роль золы проявляется во всем диапазоне расхода цемента.

Согласно ГОСТ 25818–91, золы-уноса в зависимости от качественных показателей подразделяют на четыре вида:

I – для железобетонных конструкций и изделий из тяжелого и легкого бетонов;

II – для бетонных конструкций и изделий из тяжелого и легкого бетонов, строительных растворов;

III – для изделий и конструкций из ячеистого бетона;

IV – для бетонных и железобетонных изделий и конструкций, работающих в особо тяжелых условиях (гидротехнические сооружения, дороги, аэродромы и др.).

В пределах отдельных видов дополнительно выделяют классы золы для бетонов: А – тяжелого; Б – легкого. Удельная поверхность золы класса А должна быть не менее  $2800 \text{ см}^2/\text{г}$ , а класса Б –  $1500\text{--}4000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Влажность золы сухого отбора – не более 3 %.

### Экспериментальная часть

*Сырьевая смесь для получения портландцементного клинкера*

Исследовались сырьевые смеси для получения портландцементного клинкера, для чего использованы: глинистый, железосодержащий, известняковый компоненты ОАО «Красносельскстройматериалы», зола от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь. Золы от сжигания бурых углей (образцы № 1, 2) Лельчицкого месторождения получены в лабораторных условиях Института экологии НАН Беларуси.

Образец золы № 1 имел следующий химический состав, мас. %:  $\text{SiO}_2$  – 53,00;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 23,00;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 11,40;  $\text{CaO}$  – 6,57;  $\text{MgO}$  – 0,90;  $\text{MnO}$  – 0,12;  $\text{K}_2\text{O}$  – 1,37;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,25;  $\text{TiO}_2$  – 0,82;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,14;  $\text{SO}_3$  – 2,43; потери массы при прокаливании 1,66; влажность 0,39; остаток на сите № 008 – 4,5.

Для определения активности цементного камня, полученного из тонко измельченного клинкера совместно с 2,8 мас. % гипса, использовали кварцевый песок (ГОСТ 6139–78), водо-

проводную воду, которая отвечала требованиям СТБ 1114. Испытания исходных и полученных материалов проводили согласно [21, 22].

### *Технология получения клинкера*

В заданном соотношении компоненты клинкерной сырьевой смеси перемешивали, измельчали и подвергали обжигу в печи при температуре  $1400\text{--}1450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полученный клинкер охлаждали и размалывали совместно с гипсом до удельной поверхности  $3200\text{--}3500 \text{ см}^2/\text{г}$ . Составы сырьевых смесей и активность цементов, полученных с использованием этих смесей, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Составы сырьевой смеси для получения портландцементного клинкера

Composition of raw mixture for obtaining portland cement clinker

№ образца	Компонент в сырьевой смеси, мас. %			
	Глинистый	Железосодержащий	Известняковый	Зола от сжигания бурых углей (образец № 1)
1	1,51	7,59	79,03	11,87
2	1,60	8,70	79,10	10,60
3	1,79	9,37	80,82	8,02
4	2,86	9,83	80,67	6,64
5	4,34	10,46	80,12	5,08
6	6,50	10,80	80,07	2,63
7	8,19	11,85	78,76	1,20

Анализ данных табл. 2 показывает, что введение в сырьевую смесь для получения портландцементного клинкера золы от сжигания бурого угля (образец № 1) в пределах от 2,63 до 10,60 мас. % обеспечивает получение цемента с активностью: предел прочности на осевое сжатие  $53,5\text{--}58,0 \text{ МПа}$  (табл. 2, образцы № 3, 6), предел прочности на растяжение при изгибе  $5,23\text{--}5,75 \text{ МПа}$ . В случае уменьшения (до 1,20 мас. %) или увеличения содержания золы (до 11,87 мас. %) (образцы № 1, 7) качество образцов цемента снижалось. опыты показали, что использование в сырьевых смесях портландцементного клинкера золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения расширяет сырьевую базу для производства цемента с обеспечением его прочностных характеристик, отвечающих современным стандартам.

Таблица 2

**Жизнеспособность и активность цементов, полученных путем совместного помола образцов портландцементного клинкера с 2,8 мас. % гипса**  
**Life cycle and activity of cement obtained while using mixed grinding of portland cement clinker samples with gypsum constituting 2.8 % of clinker mass**

№ образца	Время помола клинкера, мин	Жизнеспособность цементного теста, мин	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
1	35	89	5,18	52,5
2	35	82	5,75	58,0
3	35	76	5,56	56,0
4	35	68	5,42	55,0
5	35	63	5,38	54,5
6	35	54	5,23	53,5
7	40	48	4,26	51,0

*Примечание.* Жизнеспособность цементного теста – его способность продолжительное время сохранять свои первоначальные свойства. Определяется сроком схватывания цементного теста – временной интервал от момента затворения цемента водой до начала твердения (игла прибора Вика не доходит 1–2 мм до пластинки, на которой установлено кольцо, заполненное исследуемым материалом).

Таким образом, разработана и исследована сырьевая смесь для получения портландцементного клинкера, включающая глинистый, железосодержащий, известняковый компоненты и дополнительно содержащая золу от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения, при следующем соотношении компонентов, мас. %: глинистый компонент 1,6–6,5; железосодержащий компонент 8,7–10,8; зола от сжигания бурых углей 1,2–10,6; известняковый компонент – остальное.

### Бетонная смесь

Для решения задачи применения золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения в бетонных смесях были использованы:

– цемент марки М500 ОАО «Красносельскстройматериалы» ПЦ-Д0 с тонкостью помола 93,4 %, истинной плотностью 3,1051 г/см<sup>3</sup>, величиной удельной поверхности 3048 см<sup>2</sup>/г, активностью 50,4 МПа;

– крупный заполнитель – щебень производства ГП «Гранит» (г. п. Микашевичи) с максимальной крупностью зерен 20 мм. Физико-механические свойства щебня: насыпная плотность 1438 кг/м<sup>3</sup>, плотность 2681 кг/м<sup>3</sup>, водо-

поглощение 1,49 мас. %, дробимость 6,4 %, содержание глинистых и пылеватых частиц 0,75 мас. %, влажность 0,58 мас. %;

– песок кварцевый для строительных работ, ГОСТ 6139–78, с модулем крупности  $M_k = 2,03$ ;

– для затворения бетонных смесей применялась водопроводная вода, которая отвечала требованиям СТБ 1114;

– зола от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения (табл. 1, образец золы № 2) имела следующий химический состав, мас. %: SiO<sub>2</sub> – 57,31; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 33,86; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,77; CaO – 3,46; MgO – 0,19; MnO – 0,04; TiO<sub>2</sub> – 0,83; SO<sub>3</sub> – 0,54. Потери при прокаливании 1,02; влажность 0,57; остаток на сите № 008 – 2,6;

– суперпластификатор – натриевая соль продукта конденсации сульфоксида ароматических углеводородов с формальдегидом (НСПКСАУсФ-1). Он имел следующие качественные показатели: массовая доля сухих веществ 62,3 %, плотность при 20 °С 1,2756 г/см, показатель активности водородных ионов 8,12. Добавка НСПКСАУсФ-1 позволяет существенно повысить удобоукладываемость бетонных смесей.

Водонепроницаемость образцов определяли по ГОСТ 12730.5–84, прочность – по ГОСТ 10180–90 на гидравлическом прессе.

*Технология приготовления бетонной смеси и испытание образцов бетона*

Бетонную смесь готовили следующим образом: цемент, золу от сжигания бурых углей (табл. 1, образец № 2) и суперпластификатор подвергали домолу в мельнице с получением высокодисперсной массы, которую вводили в работающую мешалку, сюда же доливали расчетное количество воды, загружали мелкий и крупный заполнители, содержимое перемешивали в течение 1–2 мин. Затем полученную бетонную смесь выгружали и подвергали испытаниям. Испытания проводили согласно [21, 22].

Составы бетонных смесей и физико-механические показатели бетонов, полученных из этих смесей, приведены в табл. 3, 4. Анализ данных табл. 3, 4 показывает, что при увеличении содержания в бетонной смеси золы от сжигания бурых углей в количестве от 2 до 12 мас. % (табл. 3, составы № 1–6) предел прочности бетона на осевое сжатие 53,6–65,4 МПа, а для контрольного состава 50,7 МПа, т. е. этот показатель в 1,1–1,3 раза больше, чем для контрольного образца. Марка по водонепроницаемости для бетонов, полученных по составам № 2–7, была выше, чем у контрольного образца.

**Составы бетонных смесей**  
**Composition of concrete mixtures**

№ состава	Состав бетонной смеси, мас. %				Добавка, % от массы цемента	
	Щебень	Песок	Цемент ПЦ500	Вода	Зола от сжигания бурых углей (табл. 1, образец № 2)	Суперпластификатор НСПКСАУсФ-1
Контрольный	46,9	15,9	24,8	12,4	–	–
1	50,6	15,9	24,8	8,7	2	1,6
2	50,6	15,9	24,8	8,7	4	1,6
3	50,6	15,9	24,8	8,7	6	1,8
4	50,6	15,9	24,8	8,7	8	1,8
5	50,6	15,9	24,8	8,7	10	1,8
6	50,6	15,9	24,8	8,7	12	1,9
7	50,6	15,9	24,8	8,7	14	2,1

Таблица 4

**Физико-механические показатели бетонов, содержащих золу от сжигания бурого угля Лельчицкого месторождения**

**Physical and mechanical indices of concrete containing ash left after brown coal burning at the Lelchitsky deposit**

№ состава	Физико-механический показатель бетона		
	Осадка конуса ОК, см	Предел прочности бетона на осевое сжатие, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
Контрольный	5,7	50,7	W4
1	6,8	53,6	W4
2	7,4	54,8	W6
3	10,3	56,9	W6
4	10,8	59,7	W8
5	16,5	65,1	W10
6	17,1	65,4	W12
7	20,7	52,8	W14

Зола положительно влияет на структурообразование цементного камня благодаря эффекту мелких порошков, расширяющих свободное пространство, в котором осаждаются продукты гидратации. Микронаполняющий эффект проявляется при увеличении объемной концентрации тонкодисперсного наполнителя, приводящей к снижению пористости цементного камня в бетоне. В присутствии тонкодисперсного наполнителя – золы от сжигания бурого угля (табл. 3, образец № 2) – происходит упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителем в бетонах. В нормальных порт-

ландцементных бетонах зона контакта обычно менее плотная, чем массивное тесто, и включает большое количество пластинчатых кристаллов гидроксида кальция, у которых продольная ось перпендикулярна поверхности заполнителя. Следовательно, она более подвержена образованию микротрещин при растягивающих усилиях, возникающих при изменениях обычных условий температуры и влажности.

Контактная зона из-за своей структуры является наиболее слабым звеном в бетоне и поэтому оказывает большое влияние на его прочность. Введение золы в значительной степени снижает капиллярную пористость контактной зоны за счет резкого уменьшения общего содержания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В то же время рост содержания гидросиликата кальция в непосредственной близости от поверхности заполнителя положительно сказывается на свойствах контактной зоны. В связи с этим отмечается положительное влияние на микроструктуру контактной зоны при введении сравнительно небольшого количества золы от сжигания бурых углей (табл. 3, образец № 2) с высокой степенью дисперсности и реакционной способности.

При содержании золы 14 мас. % (табл. 3, образец № 7) предел прочности бетона на осевое сжатие снизился до 52,8 МПа. Это можно объяснить тем, что при высокой степени наполнения после достижения его максимума происходит уменьшение прочности бетонов, несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня вследствие ухудше-

ния сцепления наполненного цементного камня с наполнителем. Увеличение количества наполнителя более оптимального приводит к разбавлению цементного камня наполнителем, нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера и уменьшению прочности.

При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Наглядным критерием этого состояния является достижение максимально плотной упаковки частиц в тесте, если частицы золы значительно мельче частиц цемента. В смешанной системе цемента с высокодисперсным материалом важно, чтобы частицы ультрадисперсного материала не обволакивали поверхность новых фаз и не препятствовали образованию контактов срастания между кристаллогидратами. Это условие может быть соблюдено при оптимизации объемной концентрации дисперсного материала в смешанной системе с учетом гидравлической активности наполнителя. Для инертного наполнителя оптимальной дозировкой может быть объем, сопоставимый с объемом капиллярных пор и необходимый для заполнения соответствующих пустот, а также уплотнения структуры.

Эффект заполнения пустот является физическим фактором и наблюдается независимо от гидравлической активности дисперсного материала. Однако увеличение дозировки сверх объема указанных пор в зависимости от гидравлической активности может привести к противоположным результатам. Полученные данные показывают, что при повышенном объеме содержания инертного микронаполнителя эффект заполнения пустот и уплотнения структуры не может компенсировать негативного воздействия микронаполнителя на контакты срастания, поэтому прочность снижается. В то же время марка бетона по водонепроницаемости повысилась до W14 (табл. 4) в результате повышения плотности и соответственно уменьшения пористости образцов бетона благодаря повышенному объемному содержанию инертного микронаполнителя – эффекта заполнения пустот и уплотнения структуры. Таким образом, введение в бетонную смесь золы от сжига-

ния высокозольных бурых углей Лельчицкого месторождения Беларуси совместно с суперпластификатором НСПКСАУсФ-1 обеспечивает улучшение физико-механических показателей образцов бетона (табл. 4).

#### **Практическая значимость, экономическая и экологическая эффективность использования зол от сжигания бурого угля**

Практическая значимость проведенной работы достигнута благодаря:

- разработке составов сырьевых смесей для получения клинкера, содержащих золу от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь;
- технологии получения цементов на основе этих сырьевых смесей, установлению оптимального количества золы, обеспечивающего улучшенные показатели качества цемента;
- разработке составов и технологии приготовления бетонных смесей, содержащих золу от сжигания бурых углей, при этом смеси с золой обладали большей связностью, меньшими водоотделением и расслоением;
- изготовлению образцов бетона, отличающихся повышенными физико-механическими показателями, прежде всего пределом прочности бетона на осевое сжатие, водонепроницаемостью.

Экономическая и экологическая эффективность выполненной работы достигнута благодаря использованию золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь. Благодаря этому расширяется сырьевая база для получения качественных вяжущих, бетонов. Не менее важными решаемыми экономическими и экологическими задачами являются исключение расходов на вывоз и захоронение трудно утилизируемых отходов зол от сжигания высокозольного бурого угля, а также защита окружающей среды от загрязнений.

#### **ВЫВОДЫ**

1. На основании анализа современных представлений о роли высокодисперсных добавок в бетонных смесях можно утверждать о положительном влиянии золы от сжигания твердого топлива на структуру и физико-механические

характеристики цементных композиций: упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями с образованием кластеров «вяжущее – наполнитель» за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя; снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя, связывание гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  кристаллогидратной связки аморфизированным кремнеземом пуццолановых наполнителей; повышение пуццоланической активности наполнителя при его тонком измельчении и др.

2. Положительному влиянию золы на структурообразование бетона способствует эффект мелких порошков, расширяющих свободное пространство, в котором осаждаются продукты гидратации. Микронаполняющий эффект проявляется при увеличении объемной концентрации тонкодисперсного наполнителя, приводящей к снижению пористости цементного камня в бетоне. При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Эффект заполнения пустот является физическим фактором и наблюдается независимо от гидравлической активности золы. Однако увеличение дозировки минерального наполнителя сверх объема пор и трещин может привести к снижению качественных показателей бетона.

3. Экспериментальными исследованиями установлено, что использование в сырьевых смесях портландцементного клинкера золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь способствовало увеличению жизнеспособности и активности цемента.

4. Получены образцы бетона с улучшенными физико-механическими свойствами благодаря применению 2–14 % (от массы цемента) золы от сжигания бурых углей и 1,6–2,1 % суперпластификатора – натриевой соли продукта конденсации сульфоксида ароматических углеводородов с формальдегидом.

5. Эффективность выполненной работы подтвердилась решением вопросов увеличения жизнеспособности цементного камня, активности цемента, прочности и водонепроницаемости бетона, расширения сырьевой базы для по-

лучения цемента, бетона для мостовых конструкций. Важнейшей решенной проблемой является защита окружающей среды от загрязнений золой от сжигания высокозольных бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Геополимербетон с золой уноса [Электронный ресурс] // Строительный мир. Режим доступа: <http://www.stroinauka.ru/dl9dr5492m2.html>. Дата доступа: 11.01.2006.
2. Волженский, А. В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / А. В. Волженский, И. А. Иванов, Б. Н. Виноградов. М.: Стройиздат, 1984. 247 с.
3. Рыбьев, И. А. Создание строительных материалов с заданными свойствами / И. А. Рыбьев, А. А. Жданов // Известия вузов. Строительство. 2003. № 3. С. 45–48.
4. Баженов, Ю. М. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин // Известия вузов. Строительство. 1996. № 7. С. 55–58.
5. Власов, В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками / В. К. Власов // Бетон и железобетон. 1993. № 4. С. 10–12.
6. Власов, В. К. Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя / В. К. Власов // Бетон и железобетон. 1988. № 10. С. 9–11.
7. Высоцкий, С. А. Минеральные добавки для бетонов / С. А. Высоцкий // Бетон и железобетон. 1994. № 2. С. 7–10.
8. Bastian, S. Wodoszczelnosc Betonow z Popiolow Lotnych / S. Bastian // Przegląd Budowlany. 1971. No 6. P. 319–329.
9. Berry, E. E. Fly Ash for Use in Concrete – a Critical Review / E. E. Berry, V. M. Malhotra // ACI Journal. 1980. Vol. 77, No 2. P. 59–73.
10. Composite Cementless Binder from Mechanical Active Industrial Wastes Text / Yu. M. Bazhenov [et al.] // Proceedings of the 5 International Symposium on the Cement and Concrete Shanghai, China, 2002, Oct. 28–Nov. 1. P. 832–840.
11. Feng, Nai-Qian. High-Strength and Flowing Concrete with a Zeolitic Mineral Admixture / Nai-Qian Feng, Li Gui-Zhi, Zang Xuan-Wu // Cements, Concrete and Aggregates. 1990. Vol. 12, No 2. P. 61–69.
12. Larbi, J. A. The Chemistry of the Pole Fluid of Silica Fume-Blended Cement Systems / J. A. Larbi, J. M. Bijen // Cem. and Concr. Res. 1990. Vol. 20, No 4. P. 506–516.
13. Malhotra, V. M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice and Case Histories / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. Ottawa, Canada: Printed by Marguardt Printing Ltd., 2002. P. 101.
14. Matsufuji, Y. Прочностные характеристики растворов, содержащих сверхтонкие частицы / Y. Matsufuji, H. Kohhata, S. Harada // Semento Konkurito Ronbunshu = CAJ Proc. Cem. and Concr. 1991. No 45. P. 264–269.

15. Sarkar Shondeep, L. Microstructure of a Very Low Water/Cement Silica Fume Concrete / L. Sarkar Shendeep // *Microscope*. 1990. Vol. 38, No 2. P. 141–152.
16. Xu, Ziyi. Research on Super Fine Fly Ash and its Activity / Ziyi Xu, Liu Linzhy // *Proc. Beijing Int. Symp. Cem. and Concr.*, Beijing, May 14–17, 1985. 1985. Vol. 1. P. 493–507.
17. Бабков, В. В. Аспекты формирования высокопрочных и долговечных цементных связок в технологии бетонов / В. В. Бабков, И. Ш. Каримов, П. Г. Комохов // *Известия вузов. Строительство*. 1996. № 4. С. 41–48.
18. Зоткин, А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне / А. Г. Зоткин // *Бетон и железобетон*. 1994. № 3. С. 7–9.
19. Каприелов, С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С. С. Каприелов // *Бетон и железобетон*. 1995. № 6. С. 16–20.
20. Красный, И. М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей / И. М. Красный // *Бетон и железобетон*. 1987. № 5. С. 10–11.
21. Леонович, И. И. Испытание дорожно-строительных материалов / И. И. Леонович, В. А. Стрижевский, К. Ф. Шумчик. Минск: Высш. шк., 1991. 233 с.
22. Горшков, В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. М.: Высш. шк., 1981. 335 с.
8. Bastian S. (1971) Wodoszczelnosc Betonow z Popiolow Lotnych. *Przeglad Budowlany*, (6), 319–329 (in Polish).
9. Berry E. E., Malhotra V. M. (1980) Fly Ash for Use in Concrete – a Critical Review. *Journal of the American Concrete Institute*, 77 (2), 59–73.
10. Bazhenov Yu. M., Magdejev U. Kh, Pavlenko S. I., Kulagin N. M., Aksenov A. V., Tkachenko V. V., Dobretsov N. L., Lyakhov N. Z., Avvakumov, E. G. (2002) Composite Cementless Binder from Mechanical Active Industrial Wastes Text. *Proceedings of the 5 International Symposium on the Cement and Concrete Shanghai, China, Oct. 28.–Nov. 1*, 832–840.
11. Feng Nai-Qian, Li Gui-Zhi, Zang Xuan-Wu (1990) High-Strength and Flowing Concrete with a Zeoitic Mineral Admixture. *Cements, Concrete and Aggregates*, 12 (2), 61–69. DOI: 10.1520/CCA10273J.
12. Larbi J. A., Bijen J. M. (1990) The Chemistry of the Pole Fluid of Silica Fume-Blended Cement Systems. *Cement and Concrete Research*, 20 (4), 506–516. DOI:10.1016/0008-8846(90)90095-F.
13. Malhotra V. M., Mehta P. K. (2002) High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice and Case Histories. Ottawa, Canada: Printed by Marguardt Printing Ltd. 101.
14. Matsufuji Y., Kohhata H., Harada S. (1991) Strength Characteristics of Solutions Containing Superfineparticles. *Semento Konkurito Ronbunshu = CAJ Proc. Cem. and Concr.*, 45, 264–269.

Поступила 24.03.2016

Подписана в печать 27.05.2016

Опубликована онлайн 28.03.2017

#### REFERENCES

1. Geopolymer Concrete with Pulverized Fuel Ash. *Stroitelny Mir* [Construction World]. Available at: <http://www.stroinauka.ru/dl9dr5492m2.html>. (Accessed 11 January 2006) (in Russian).
2. Volzhensky A. V., Ivanov I. A., Vinogradov B. N. (1984) *Application of Ash and Furnace Clinker for Production of Construction Materials*. Moscow, Stroyizdat. 247 (in Russian).
3. Rybiev I. A., Zhdanov A. A. (2003) Development of Construction Materials with Prescribed Properties. *Izvestia Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Education Institutions. Construction], (3), 45–48 (in Russian).
4. Bazhenov Yu. M., Alimov L. A., Voronin V. V. (1996) Development of Theory for Formation of Structure and Properties of Concrete with Technogenic Waste. *Izvestia Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Education Institutions. Construction], (7), 55–58 (in Russian).
5. Vlasov V. K. (1993) Regularities on Optimization of Composition for Concrete with Disperse Mineral Additives. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (4), 10–12 (in Russian).
6. Vlasov V. K. (1988) Mechanism for Improving Concrete Strength While Introducing Micro-Filler. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (10), 9–11 (in Russian).
7. Vysotsky S. A. (1994) Mineral Additives for Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (2), 7–10 (in Russian).
15. Sarkar Shondeep L. (1990) Microstructure of a Very Low Water/Cement Silica Fume Concrete. *Microscope*, 38 (2), 141–152.
16. Xu Ziyi, Liu Linzhy (1985) Research on Super Fine Fly Ash and its Activity. *Proc. Beijing Int. Symp. Cem. and Concr.*, Beijing, May 14–17, 1, 493–507.
17. Babkov V. V., Karimov I. Sh., Komokhov P. G. (1996) Aspects for Formation of Highly-Strong and Durable Cement Binding Material in Concrete Technology. *Izvestia Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Education Institutions. Construction], (4), 41–48 (in Russian).
18. Zotkin A. G. (1994) Micro-Filling Effect of Mineral Additives in Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (3), 7–9 (in Russian).
19. Kaprielov S. S. (1995) General Regularities in Formation Cement Stone Structure and Concrete with Additive of Ultra-Disperse Materials. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (6), 16–20 (in Russian).
20. Krasny I. M. (1987) On Mechanism for Improving Concrete Strength while Introducing Micro-Fillers. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (5), 10–11 (in Russian).
21. Leonovich I. I., Strizhevsky V. A., Shumchik K. F. (1991) *Testing of Road-Construction Materials*. Minsk, Vysshaya Shkola. 233 (in Russian).
22. Gorshkov V. S., Timashev V. V., Saveliev V. G. (1981) *Methods for Physical and Chemical Analysis of Binders*. Moscow, Vysshaya Shkola. 335 (in Russian).

Received: 24.03.2016

Accepted: 27.05.2016

Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-113-118

УДК 69.658.26

## Пути снижения нормативных теплопотерь в жилых зданиях

Докт. техн. наук, проф. А. Э. Пиир<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. О. А. Козак<sup>1)</sup>,  
докт. техн. наук, проф. В. Б. Кунтыш<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Разработана упрощенная методика расчета нормативного коэффициента теплопередачи жилого здания. Выполнены исследования по влиянию на суммарные теплопотери размеров здания уровня теплоизоляции наружных ограждений и доли регенерации теплоты в системе вентиляции. Рассмотрены здания простой геометрической формы («спичечный коробок») с числом этажей 1; 2; 4; 8; 16, жилой площадью от 100 до 25600 м<sup>2</sup> при уровне теплового сопротивления стен 1; 3 и 5 м<sup>2</sup>·°C/Вт и доле регенерации теплоты вентиляционного потока воздуха 0; 0,5 и 0,66. Результаты исследования показали, что при увеличении габаритов здания происходит резкая трансформация размеров и структуры наружных ограждений: доля площади перекрытий сокращается в три раза; доля площади стен увеличивается в два раза. В шесть раз уменьшается доля площади поверхности наружной оболочки здания по сравнению с ее отапливаемой площадью. Отнесенный к отапливаемой площади средний коэффициент теплопередачи здания становится меньше в три раза. Показано, что для дальнейшего снижения нормативных теплопотерь жилых зданий наиболее эффективными путями являются: рекуперация теплоты в системе вентиляции (и тем глубже, чем выше уровень теплозащиты и холоднее климат зоны сооружения здания); укрупнение размеров зданий за счет уменьшения их числа; сверхнормативное повышение теплозащиты малоквартирных зданий и коттеджей; кубическая форма двух-, трехэтажных зданий для Крайнего Севера.

**Ключевые слова:** рекуперация теплоты, теплопотери, жилые здания

**Для цитирования:** Пиир, А. Э. Пути снижения нормативных теплопотерь в жилых зданиях / А. Э. Пиир, О. А. Козак, В. Б. Кунтыш // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 113–118. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-113-118

## Method for Decrease of Standard Heat Losses in Residential Buildings

A. E. Piir<sup>1)</sup>, O. A. Kozak<sup>1)</sup>, V. B. Kuntysch<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** A simplified method for calculation of standard coefficient for heat transfer in a residential building has been developed in the paper. Investigations have been carried out with the purpose to determine influence of building size, level of thermal insulation in external enclosures and share of heat regeneration in ventilation system on total heat losses. The paper considers buildings of a simple geometrical form ("matchbox") with number of floors 1, 2, 4, 8, 16 and living area from 100 up to 25600 m<sup>2</sup> at the level of thermal resistance of walls 1; 3 and 5 m<sup>2</sup>·°C/W and share of heat regeneration in ventilation air stream of 0; 0.5 and 0.66. The investigation results have shown that while increasing building size then there is a sudden transformation of dimensions and structure in external enclosures: share of overlapping area is reduced by 3-fold and share

---

### Адрес для переписки

Козак Оксана А.  
Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М. В. Ломоносова  
набережная Северной Двины, 17,  
163002, г. Архангельск, Российская Федерация  
Тел.: +7 8182 21-61-75  
oksana\_kozak\_2012@mail.ru

### Address for correspondence

Kozak Oksana A.  
Northern (Arctic) Federal University  
named after M. V. Lomonosov  
17 Naberezhnaya Severnoy Dviny,  
163002, Arkhangelsk, Russian Federation  
Tel.: +7 8182 21-61-75  
oksana\_kozak\_2012@mail.ru

of wall area is increased by 2-fold. Surface area of building external envelope is reduced by 6-fold in comparison with its heated area. An average coefficient of building heat transfer assigned to heated area is decreased by 3-fold. It has been shown that the most efficient methods for further decrease of standard heat losses for residential buildings are the following: heat recovery in the ventilation system: it is deeper if heat protection rate is higher and climate of a building construction zone is colder; enlargement of building size through decrease of their number; limit-exceeding increase in heat protection of small apartment buildings and cottages; cubic form of 2–3-floor buildings for Far North.

**Keywords:** heat recovery, heat losses, residential buildings

**For citation:** Piir A. E., Kozak O. A., Kuntysh V. B. (2017) Method for Decrease of Standard Heat Losses in Residential Buildings. *Science and Technique*. 16 (2), 113–118. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-113-118 (in Russian)

Россия является самой холодной из обитаемых стран земного шара. По этой причине 93 % ее жителей населяют лишь 33 % территории: Европейскую часть, Юг Сибири и Дальнего Востока. Как известно, 3/4 жизни люди проводят внутри помещений, где для создания здоровых и комфортных условий приходится тратить топливо. 50 % жилого фонда России построено до 1970 г., 45 % жилья – односемейные дома.

До 1995 г. нормативный уровень теплозащиты жилых и общественных зданий России обеспечивал лишь соблюдение санитарных требований внутри отапливаемых помещений при минимальном тепловом сопротивлении наружных ограждений ( $R_{ст} = 0,9–1,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ) [1, 2]. Годовой расход теплоты на одного жителя для отопления и вентиляции жилых и общественных зданий  $q$  в зависимости от зоны проживания составлял от 2,35 до 4,40 Гкал/(год·чел.) [3], а в общем по стране  $500 \cdot 10^6$  Гкал, или 70 млн т у. т. В Европейской части России на отопление жилых и производственных зданий энергоресурсов затрачивается в несколько раз больше, чем

в странах, расположенных на одинаковой широте – Финляндии, Швеции, Германии.

Для сокращения расходов топлива СНиП [4] потребовал увеличить теплозащиту наружных ограждений жилых зданий в 2,5–4 и более раз в зависимости от «хладоемкости» отопительного периода  $D_d$  и ограничил расчетные теплопотери жилых зданий величиной 120–80 Вт/м<sup>2</sup> [5]. Это позволило снизить суммарную расчетную тепловую нагрузку отопления и вентиляции, например, для пятиэтажного жилого здания на 80 квартир, в южном исполнении – на 37 %, в северном исполнении – на 55 % (табл. 1).

Поскольку проблема экономии топлива в жилищно-коммунальном хозяйстве остается по-прежнему актуальной [6], рассмотрим общие теплотехнические закономерности, описывающие теплопотери здания, и попытаемся установить наиболее рациональные пути их сокращения. Жилые здания отличаются разнообразием размеров, геометрических форм, архитектурных стилей и материалов, использованных для сооружения.

Таблица 1

Тепловые показатели характерных климатических зон России [4]  
Heat indices of relevant climate zones in Russia [4]

Климатическая зона России	Доля населения стран в климатической зоне $N$ , %	Продолжительность отопительного периода $n_o$ , ч/год	Расчетная температура воздуха для системы отопления $t_{ро}$ , °C	Годовой расход теплоты на одного жителя $q$ , Гкал/чел.	Число градусо-суток отопительного периода $D_d \cdot 10^{-3}$ , °C·сут.	Сопротивление теплопередаче стен $R_{ст}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт	Снижение нагрузки отопления благодаря усилению теплозащиты $\Delta Q$ , %
Сибирь и Дальний Восток	15	> 6000	< -35	> 4,4	8–16	4,2–7	55
Север Европейской части	10	5500	-30	4	6	3,6	49
Средняя полоса	30	5000	-25	3,4	4	2,9	44
Юг Европейской части	45	4000	-15	2,35	3	2,4	37

Процесс утечки теплоты из отапливаемых помещений в окружающую среду через стены, окна и наружные покрытия/перекрытия описывается формулами теплопередачи [7]

$$Q = \Delta t(\Sigma A_i/R_i) = K_{cp}\Delta t A_{нар}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – перепад температуры воздуха внутри и снаружи здания, °C;  $A_i$ ,  $R_i$  – площадь поверхности строительных элементов наружного ограждения здания, м<sup>2</sup>, и их сопротивление теплопередаче, м<sup>2</sup>·°C/Вт;  $A_{нар} = \Sigma A_i$  – площадь поверхности наружной оболочки здания, м<sup>2</sup>;  $K_{cp}$  – средний коэффициент теплопередачи через наружную оболочку здания, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Формула (1) используется для расчета теплототеря здания по его строительным данным и вычисления среднего коэффициента теплопередачи, который служит показателем теплового совершенства оболочки и соответствия теплозащиты здания нормативным требованиям. Как показано в [8], уравнение (1) может быть использовано для упрощенного расчета нормативных теплототеря здания в предпроектной стадии, когда известны лишь габариты здания по наружному обмеру (длина, ширина, высота) и уровень теплозащиты.

Установлено, что средний безразмерный нормативный коэффициент теплопередачи жилых зданий простой прямоугольной формы («спичечный коробок») высотой от 1 до 16 этажей в зависимости от уровня теплозащиты согласно СНиП 23-02-2003 описывается формулой

$$\begin{aligned} \bar{K}_{cp} &= K_{cp}R_{ст} = \bar{K}_{ст} + \bar{K}_{пп} + \bar{K}_{оз} = \\ &= a_{ст}(1 - \omega) + 0,714a_{пп} + 6,25\omega a_{ст}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\bar{K}_{ст}$ ,  $\bar{K}_{пп}$ ,  $\bar{K}_{оз}$  – безразмерные коэффициенты теплопередачи стен, покрытий/перекрытий, оконных закрытий,  $\bar{K}_i = K_i/R_i$ ;  $a_{ст} = A_{ст}/A_{нар}$  – доля площади стен в общей площади наружных ограждений;  $a_{пп} = A_{пп}/A_{нар}$  – доля покрытий/перекрытий в общей площади наружных ограждений;  $\omega = A_{ок}/A_{ст}$  – доля площади остекления фасадов здания.

Конкретную величину сопротивления теплопередаче стен жилого здания выбирают в зависимости от «хладоемкости» отопительного периода года  $D_d$ , °C·сут., [9]

$$R_{ст} = 0,35D_d \cdot 10^{-3} + 1,4. \quad (3)$$

Исследуем влияние геометрических размеров здания на его теплотехнические показатели. Рассмотрим ряд зданий простой прямоугольной формы с числом квартир от 1 до 256, числом этажей  $z = 1, 2, 4, 8, 16$ . Кубатура зданий  $V = B \times L \times H$  (м<sup>3</sup>) растет с шагом в четыре раза, причем для повышения плотности жилой застройки увеличение высоты  $H$  опережает рост длины здания  $L$ .

Геометрические показатели зданий описывают формулы:

– площадь отапливаемых помещений

$$A_o = BLz = V/h; \quad (4)$$

– площадь наружных ограждений

$$A_{нар} = A_{ст} + A_{пп} = 2(LB + BH + HL); \quad (5)$$

– величина охлаждающих здание поверхностей на единицу отапливаемой площади

$$\varphi = A_{нар}/A_o = 2h(L^{-1} + B^{-1} + H^{-1}); \quad (6)$$

– доля площади перекрытий и стен в площади наружных ограждений

$$a_{пп} = A_{пп}/A_{нар} = (1 + H/L + H/B)^{-1}; \quad (7)$$

$$a_{ст} = 1 - a_{пп},$$

где  $z = H/h$  – число этажей здания высотой по  $h$ .

Результаты расчета геометрических показателей жилых домов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Изменение геометрических характеристик жилого дома при увеличении его размеров**  
**Changes in geometric characteristics of residential building while increasing its size**

Характеристика здания	Число этажей				
	1	2	4	8	16
$A_o$ , м <sup>2</sup>	100	400	1600	6400	25600
Высота $H$ , м	3	6	12	24	48
Ширина $B$ , м	8	10	12	14	16
Длина $L$ , м	12,5	20	33	57	100
$\varphi = A_{нар}/A_o$	3,23	1,92	1,18	0,78	0,54
$a_{пп} = A_{пп}/A_{нар}$	0,619	0,521	0,424	0,319	0,222
$a_{ст} = A_{ст}/A_{нар}$	0,381	0,474	0,576	0,681	0,778
$a_{ок} = A_{ок}/A_o$	0,030	0,047	0,070	0,096	0,120
$A_{ок}/A_o = \omega$	0,080	0,100	0,120	0,140	0,160
$s = A_{ст}/A_{пп}$	0,61	0,9	1,36	2,13	3,57

Полученные данные свидетельствуют о резкой трансформации геометрических характеристик жилых зданий при увеличении размеров: доля площади перекрытий  $a_{пп}$  сокращается в три раза – с 0,62 до 0,22, а доля площади стен  $a_{ст}$  увеличивается в два раза – с 0,38 до 0,78. Величина относительной площади остекления  $a_{ок}$  увеличивается в четыре раза – с 0,03 до 0,12. Вместе с тем резко сокращается относительная величина охлаждающих здание наружных поверхностей  $\phi$  – с 3,23 до 0,54. Значительное уменьшение размеров охлаждающей оболочки на единицу отапливаемой площади обеспечивает высокую тепловую эффективность крупных зданий, несмотря на увеличение доли поверхности ограждающих конструкций с более низким теплотехническим качеством. Следует отметить, что использование кубической формы для наиболее энергорасточительных многоквартирных зданий позволяет сократить теплопотери на 10–20 % за счет снижения доли наружной поверхности  $\phi$ .

Укрупнение жилых зданий за счет уменьшения их числа является эффективным способом теплосбережения. Как видно из табл. 2, одно здание с жилой площадью 400 м<sup>2</sup> имеет в шесть раз меньше площадь наружных ограждений, чем четыре здания с жилой площадью по 100 м<sup>2</sup> каждое. Одно четырехэтажное здание площадью 1600 м<sup>2</sup> имеет в восемь раз меньше площадь наружных ограждений, чем четыре двухэтажных здания площадью по 400 м<sup>2</sup>. С учетом возрастания среднего коэффициента теплопередачи теплопотери через ограждения снизятся более чем в пять раз.

Значения среднего коэффициента теплопередачи для указанного ряда жилых зданий (формула (2)) и составляющих его величин  $\bar{K}_{ст}$ ,  $\bar{K}_{пп}$ ,  $\bar{K}_{ок}$  приведены в табл. 3.

Расчеты показывают, что структура теплопотерь в жилых зданиях и их величина резко меняются с увеличением габаритов здания и доли поверхности вертикальных ограждений:

- коэффициент теплопередачи через стены увеличивается в два раза;
- коэффициент теплопередачи через покрытия уменьшается в три раза;

- коэффициент теплопередачи через окна увеличивается в пять раз.

Таблица 3

Изменение структуры и величины теплопотерь сквозь различные ограждения жилого дома  
Changes in structure and value of heat loss through various residential building enclosures

Безразмерный коэффициент теплопередачи	Число этажей				
	1	2	4	8	16
$\bar{K}_{ст}$	0,350	0,474	0,507	0,580	0,650
$\bar{K}_{пп}$	0,442	0,375	0,305	0,230	0,160
$\bar{K}_{ок}$	0,154	0,293	0,430	0,620	0,750
$\bar{K}_{ср} \rightarrow A_{нар}$	0,90 0,80	0,98 0,95	1,24 1,30	1,43 1,34	1,59 1,60
$\bar{K}_{ср} \phi \rightarrow A_o$	2,70	1,90	1,50	1,30	0,90

Средний, отнесенный к наружной поверхности здания коэффициент теплопередачи  $\bar{K}_{ср}$  увеличивается почти в два раза – с 0,90 до 1,59, а отнесенный к отапливаемой площади здания  $\bar{K}_{ср} \phi$  уменьшается в три раза – с 2,7 до 0,9.

Увеличение термического сопротивления наружных ограждений ( $R_{ст} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ) в три и пять раз вызовет пропорциональное снижение среднего коэффициента теплопередачи  $K_{ср} = \bar{K}_{ср} \phi / R_{ст}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C), но лишь частично скажется на суммарных теплопотерях жилого здания, значительную долю которых составляют вентиляционные потери.

Условный вентиляционный коэффициент теплопередачи при норме вентиляционного потока воздуха  $L = 30 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{чел.})$  и заселенности общей площади здания  $f = 20 \text{ м}^2/\text{чел.}$  [10] составляет величину

$$K_{вен} = 0,28 L c_p \rho / f = 0,28 \cdot 30 \cdot 1 \cdot 1,3 / 20 = 0,54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}). \quad (8)$$

Исследуем, как повлияют вентиляционные теплопотери на суммарный коэффициент теплопередачи жилого здания при различных уровнях его теплоизоляции  $R_{ст}$  и коэффициенте регенерации теплоты  $r$  в системе вентиляции:

$$K_{сум} = \bar{K}_{ср} \phi / R_{ст} + 0,54 \cdot (1 - r). \quad (9)$$

**Влияние сопротивления теплопередаче ограждений и рекуперации теплоты  
в системе вентиляции на теплотери жилых зданий**

**Influence of resistance against enclosure heat transfer and heat recuperation  
in ventilation system on heat losses in residential buildings**

Показатель	Число этажей		
	3	5	9
Размер здания $H \times L \times B$ , м	9×40×10	15×60×12	27×30×14
Общая жилая площадь $A_{о}$ , м <sup>2</sup>	1200	3600	10400
Относительная величина площади наружных ограждений $\phi$	1,32	0,96	0,72
Средний безразмерный коэффициент теплопередачи $\bar{K}_{ср}$ , отнесенный к отапливаемой площади здания	1,54	1,29	1,07
Вентиляционный коэффициент теплопередачи $K_{вен}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C), при: $r = 0$ $r = 0,5$ $r = 0,66$	0,54 0,27 0,18	0,54 0,27 0,18	0,54 0,27 0,18
Суммарный коэффициент теплопередачи жилого здания $K_{сум}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C), при: $R_{ст} = 1$ м <sup>2</sup> ·°C/Вт, $r = 0$ $R_{ст} = 3$ м <sup>2</sup> ·°C/Вт, $r = 0$ $R_{ст} = 5$ м <sup>2</sup> ·°C/Вт, $r = 0$ $R_{ст} = 5$ м <sup>2</sup> ·°C/Вт: $r = 0,5$ $r = 0,66$	2,08 1,05 0,85 0,58 0,49	1,83 0,97 0,80 0,53 0,44	1,61 0,90 0,76 0,49 0,40

Результаты расчета суммарного коэффициента теплопередачи жилых зданий с числом этажей 3, 5, 9 при сопротивлении теплопередаче  $R_{ст} = 1; 3$  и  $5$  м<sup>2</sup>·°C/Вт и с долей рекуперации теплоты в системе вентиляции  $r = 0; 0,5$  и  $0,66$  приведены в табл. 4.

Расчеты показали, что увеличение термического сопротивления теплопередаче в три раза по сравнению с исходным значением ( $R_{ст} = 1$  м<sup>2</sup>·°C/Вт), обязательным для зданий, сооруженных до 1995 г., вызывает снижение суммарного коэффициента в два раза для жилых зданий высотой 3, 5 и 9 этажей.

Однако дальнейшее повышение теплозащиты этих строений за счет увеличения сопротивления теплопередаче еще на две позиции – до  $R_{ст} = 5$  м<sup>2</sup>·°C/Вт – вызывает снижение суммарного коэффициента теплопередачи всего на 20 % из-за тормозящего влияния вентиляционного коэффициента теплопередачи.

Если при этом одновременно снизить вентиляционные теплотери в два раза с помощью теплообменника-регенератора, то суммарные теплотери уменьшатся на 45–60 %, т. е. экономия теплоты увеличится в 2–3 раза.

При снижении теплотери от вентиляции в три раза суммарные теплотери здания снова уменьшаются в два раза. Таким образом, повышение теплозащиты ( $R_{ст}$ ) зданий от 3 до 5 м<sup>2</sup>·°C/Вт дает наибольшие эффекты только при одновременном снижении вентиляционных теплотери. Это значит, что рекуперация теплоты вентиляционных потоков является обязательным условием теплосбережения в районах с холодным климатом или для зданий с усиленной теплозащитой.

#### ВЫВОДЫ

Анализ теплотехнических показателей жилых зданий позволяет сделать ряд общих рекомендаций, направленных на снижение нормативных теплотери зданий в 1,5–2,5 раза, особенно для зданий, расположенных в суровых климатических районах России. Экономии теплоты способствуют:

- рекуперация теплоты в системе приточно-вытяжной вентиляции жилых зданий вообще

и особенно для зданий в районах Крайнего Севера;

- укрупнение размеров зданий за счет уменьшения их количества;
- сверхнормативное повышение термического сопротивления наружных ограждений коттеджей и малоквартирных зданий;
- кубическая, цилиндрическая или купольная формы небольших зданий высотой в 2–3 этажа;
- совместное использование указанных способов экономии теплоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Водяные тепловые сети: справ. пособие по проектированию / И. В. Беляйкина [и др.]; под ред. Н. К. Громова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 376 с.
2. Щекин, Р. В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции в гражданском строительстве / Р. В. Щекин, С. М. Корневский, Г. Е. Бем. Киев: Госиздат, 1962. 1020 с.
3. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. 6-е изд. М.: Энергоиздат, 1982. 360 с.
4. Тепловая защита зданий: СНиП 23-02–2003. Госстрой России. М.: ОАО «ЦПП», 2004. 139 с.
5. Ливчак, И. Ф. Обоснование расчета удельных показателей расхода тепла на отопление разноэтажных жилых зданий / И. Ф. Ливчак // АВОК. 2005. № 2. С. 10–16.
6. Ливчак, В. И. Еще один довод в пользу повышения теплозащиты зданий / В. И. Ливчак // Энергосбережение. 2012. № 6. С. 14–20.
7. Малявина, Е. Г. Теплотери здания. Справочное пособие / Е. Г. Малявина. 2-е изд., испр. М.: АВОК-ПРЕСС, 2011. 144 с.
8. Пиир, А. Э. Нормативный коэффициент теплопередачи жилого здания / А. Э. Пиир, О. А. Козак, И. М. Агафонов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 5. С. 69–76.
9. Строительная климатология: СНиП 23-01–99\*: введ. 01.01.2000. М.: ГУП «ЦПП», 2003. 109 с.
10. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена: Стандарт-1–2004. М.: АВОК-ПРЕСС, 2004. 32 с.

Поступила 31.03.2016  
Подписана в печать 21.10.2016  
Опубликована онлайн 28.03.2017

#### REFERENCES

1. Belyaikina I. V., Vitalev V. P., Gromov N. K. (ed.), Igolka L. P., Lyamin A. A., Ostaltsev P. P., Safonov A. P., Skvortsov A. A., Suris M. A., Tagi-zade R. M., Falikov V. S., Shubin E. P. (1988) *Water Heat Supply Network. Reference Book for Designing*. Moscow, Energoatomizdat. 376 (in Russian).
2. Shchekin R. V., Korenevskii S. M., Bem G. E. (1962) *Reference Book for Heat Supply and Ventilation in Civil Engineering*. Kiev, Gosizdat Publ. 1020 (in Russian).
3. Sokolov E. Ya. (1982) *District Heating and Heat Supply Network*. 6<sup>th</sup> ed. Moscow, Energoizdat Publ. 360 (in Russian).
4. SNiP 23-02–2003 [Construction Rules and Regulations] *Thermal Performance of the Buildings*. Moscow, Gosstroy of Russia, 2004. 139 (in Russian).
5. Livchak I. F. (2005) Substantiation of Calculations for Specific Indices of Heat Consumption for heating Various-Storey Residential Buildings. *AVOK* [Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat-Supply and Building Thermal Physics], (2), 10–16 (in Russian).
6. Livchak V. I. (2012) One More Argument for Improvement of Building Thermal Protection. *Energoberezhnie* [Power Saving], (6), 14–20 (in Russian).
7. Malyavina E. G. (2011) *Building Heat Losses. Reference Book*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, AVOK-PRESS Publ. 144 (in Russian).
8. Piiir A. E., Kozak O. A., Agafonov I. M. (2015) Normative Heat-Transfer Coefficient of the Residential Building. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 69–76 (in Russian).
9. SNiP 23-01–99\* [Construction Rules and Regulations]. *Building Climatology*. Moscow, State Unitary Enterprise – Centre for Project Designs, 2003. 109 (in Russian).
10. Standard-1–2004. *Residential and Public Buildings. Air Interchange Standards*. Moscow, AVOK-PRESS Publ. 32 (in Russian).

Received: 31.03.2016  
Accepted: 21.10.2016  
Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-119-124

УДК 621.74/519.2

## Влияние местоположения неперфорированного экрана на процесс теплопередачи в наружных ограждающих конструкциях зданий

Канд. техн. наук, доценты В. Д. Сизов<sup>1)</sup>, Л. В. Нестеров<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, проф. В. М. Копко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** В многослойных ограждающих конструкциях зданий для защиты теплоизоляционного слоя от увлажнения рекомендуется использовать паронепроницаемый слой на внутренней стороне системы утепления, так как относительная влажность внутреннего воздуха обычно выше, чем наружного, и диффузия водяных паров направлена из помещения наружу. При наличии с внешней стороны слоя с большой паропроницаемостью часть влаги может скапливаться в толще конструкции и утеплителя, а разница действительных и максимально возможных парциальных давлений приводит к выпадению конденсата. Для повышения теплозащитных качеств ограждающих конструкций возникает необходимость создания паронепроницаемого защитного экрана. Этому соответствует конструкция панели с паронепроницаемым экраном в виде неперфорированной алюминиевой фольги. Расположение данного экрана у внутреннего слоя панели препятствует проникновению водяных паров из помещения в ограждающую конструкцию и в слой утеплителя. При этом в отдельных слоях ограждающей конструкции в зависимости от их теплофизических характеристик могут возникать зоны конденсации и соответственно увлажнение их. Проведен расчет тепловлажностного режима ограждающих конструкций с расположением паронепроницаемого слоя (неперфорированной алюминиевой фольги) в толще ограждающей конструкции между различными слоями. Анализ графиков тепловлажностных режимов многослойной наружной ограждающей конструкции показывает, что наиболее рациональной является конструкция с расположением неперфорированного экрана – алюминиевой фольги – между внутренним слоем бетона и слоем перфорированного утеплителя. При этом другие экраны между отдельными слоями выполнены перфорированными.

**Ключевые слова:** теплопередача, многослойная ограждающая конструкция, паронепроницаемый слой, тепловлажностный режим, теплозащитные качества

**Для цитирования:** Сизов, В. Д. Влияние местоположения неперфорированного экрана на процесс теплопередачи в наружных ограждающих конструкциях зданий / В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров, В. М. Копко // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 119–124. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-119-124

## Influence of Non-Perforated Screen Location on Heat Transfer Process in Building Enclosing Parts

V. D. Sizov<sup>1)</sup>, L. V. Nesterov<sup>1)</sup>, V. M. Kopko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** It is recommended to have a vapor-proof barrier on the internal side of heat insulation system in multi-layer building enclosing parts in order to ensure protection of a heat-insulation layer against humidification because relative humidity of internal air is generally higher than external one and diffusion of water steam is directed from premises outside. While having

---

**Адрес для переписки**

Копко Виктор Михайлович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-97-29  
tg\_v\_fes@bntu.by

**Address for correspondence**

Kopko Viktor M.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-97-29  
tg\_v\_fes@bntu.by

a barrier with high vapor permeability a part of moisture can be accumulated in the structure and heat insulation core and difference of actual and maximum possible partial pressures leads to condensate formation. In order to improve thermal properties of enclosing parts the necessity arises to create a vapor-proof protection screen. It complies with the design of a panel with a vapor-proof screen in the form of non-perforated aluminium foil. The given screen located at internal panel layer prevents penetration of water vapor from premises into enclosing part and heat insulation layer. In such a case condensation zones and, consequently, their moistening can occur in some layers of enclosing parts according to their thermal and physical characteristics. The paper contains a calculation of thermal and moisture regime of the enclosing parts with vapor-proof layer (non-perforated aluminium foil) located in enclosing part core between various layers. An analysis of thermal and moisture regime diagrams for multi-layer external enclosing part demonstrates that the part of non-perforated screen (aluminium foil) located between internal concrete layer and perforated heat insulation layer is considered the most rational one. At the same time other screens between separate layers are perforated.

**Keywords:** heat transfer, multi-layer enclosing part, vapor-proof layer, thermal and moisture regime, thermal properties

**For citation:** Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M. (2017) Influence of Non-Perforated Screen Location on Heat Transfer Process in Building Enclosing Parts. *Science and Technique*. 16 (2), 119–124. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-119-124 (in Russian)

При использовании трехслойных ограждающих конструкций внутренний конструкционный слой из бетона или другого материала обычно выступает в роли инерционного буфера, который входит в определенный баланс с микроклиматом помещения и берет на себя функцию сглаживания резких изменений относительной влажности в нем. При резком повышении относительной влажности внутренний слой ограждающей конструкции адсорбирует излишнюю влагу и предотвращает превышение величины относительной влажности, более предельно допустимой. При резком снижении относительной влажности в помещении происходит обратный процесс. В этой связи для защиты теплоизоляционного слоя от увлажнения рекомендуется наличие надежного паронепроницаемого слоя на внутренней стороне системы утепления, так как относительная влажность теплого внутреннего воздуха обычно выше, чем наружного холодного и диффузия водяных паров направлена из помещения наружу.

Перфорированные или волокнистые теплоизоляционные материалы не препятствуют движению пара наружу, не позволяя влаге скапливаться в толще утеплителя. При наличии с внешней стороны слоя с большой паропропускаемостью часть влаги может скапливаться в толще конструкции и утеплителя, а разница действительных и максимально возможных парциальных давлений приводит к выпадению конденсата.

Для повышения теплозащитных качеств ограждающих конструкций и улучшения усло-

вий их эксплуатации, особенно в помещениях с повышенной влажностью, возникает необходимость создания конструкции панели, способной предотвратить указанные недостатки. При этом в соответствии с действующими нормативными документами [1–4] не следует допускать накопления влаги в ограждающих конструкциях за годовой период эксплуатации, а также ограничивать попадание влаги в ограждающую конструкцию за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха.

Всем этим предпосылкам отвечает предлагаемая авторами конструкция (заявка на патент а20130830, исх. № 10-196 от 08.07.2013), которая отличается от существующих тем, что в многослойной стеновой панели (включающей наружный и внутренний бетонные слои, промежуточный слой утеплителя, выполненный из листа с перфорациями, и слой фольги, уложенный на внутреннюю поверхность наружного слоя панели) лист с перфорациями выполнен многослойным. Между его слоями и на внутренней поверхности наружного слоя панели расположены листы перфорированной фольги с упрочняющей сеткой. Кроме того, внутренний бетонный слой отделен от листа с перфорациями слоем алюминиевой фольги. Упрочняющая сетка может быть выполнена из алюминия или полиэтилена, промежуточный слой утеплителя – из модулей ячеистой формы в виде пустотных колец или полусфер.

Наличие нескольких перфорированных слоев алюминиевой фольги между слоями утепли-

теля с перфорациями увеличивает термическое сопротивление последних за счет уменьшения радиационной составляющей при наличии нескольких экранов и в то же время не препятствует удалению парообразной влаги из панели в целом [5–11]. Вместе с тем расположение неперфорированного слоя фольги на внутреннем слое панели препятствует проникновению водяных паров из помещений в слой утеплителя. Конструкция стеновой панели представлена на рис. 1.

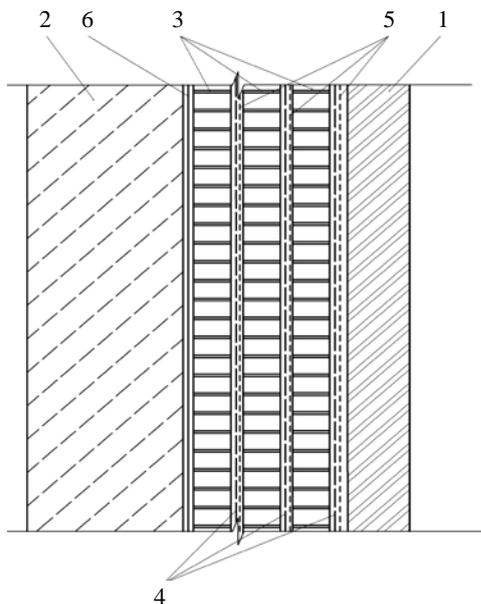


Рис. 1. Конструкция стеновой панели

Fig. 1. Wall panel structure

Многослойная стеновая панель состоит из наружного 1 и внутреннего 2 бетонных слоев, промежуточных слоев утеплителя с перфорациями 3, слоев перфорированной алюминиевой фольги 4 с упрочняющей сеткой 5, слоя алюминиевой фольги 6. Собранные таким образом перфорированные слои утеплителя или светопрозрачных ячеек имеют высокое сопротивление теплопередаче благодаря отражательной способности экранов в виде перфорированной алюминиевой фольги, оптимальным геометрическим размерам каждого слоя утеплителя между слоями фольги с минимальной конвективной составляющей и максимальной паровлагопроницаемостью для предотвращения накопления влаги в теплоизоляционном слое.

Крепление каждого из слоев конструкции осуществляется легкими связями.

Повышение термического сопротивления перфорированных или светопрозрачных ячеек слоев за счет экранирования сделано на основании расчетов [6], которые показывают, что учет уменьшения теплового потока через слой утеплителя за счет экранирования снижает тепловой поток через ограждение в целом. А это приводит к повышению его термического сопротивления.

Улучшение условий эксплуатации при выполнении конструкции наружного ограждения по предлагаемой схеме позволит уменьшить влияние увлажнения слоя утеплителя за счет расположения неперфорированного листа между внутренним слоем бетона и перфорированными листами утеплителя. Преимущество данного конструктивного решения подтверждается расчетом тепловлажностного режима конструкции.

Расчет тепловлажностного режима проводили на параметры наружного воздуха при наиболее неблагоприятных характеристиках – температуре холодного месяца для условий г. Минска (табл. 1–3). Для расчета принимали конструкцию наружного ограждения, состоящую из двух слоев бетона – внутреннего и наружного толщиной 150 и 60 мм соответственно, и слоя микромодулей толщиной 150 мм, состоящих из трех элементов и разделенных перфорированной алюминиевой фольгой (рис. 2–4). Характеристики материалов приняты следующими:

- железобетон:  $\lambda_6 = 2,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ ;

$$\mu = 0,03 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па});$$

- трехслойный микромодуль:

$$\lambda = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}).$$

Алюминиевые экраны в данном случае были перфорированными (для них сопротивление паропрооницанию  $R_n = 11 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{м}$ ). Для алюминиевой фольги без перфорации в научной литературе данных нет, т. е. она считается паронепроницаемой ( $R_n = \infty$ ). Однако на практике при нанесении алюминиевой фольги на микромодуль, при монтаже и иных операциях

с этими элементами возможны повреждения, неплотность при приклеивании отдельных листов. Таким образом, сопротивление па-

ропроницанию снижается. Авторами статьи для неперфорированной фольги принято  $R_{п} = 100 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{м}$ .

Таблица 1

Данные для построения графика влажностного режима наружной стены (все экраны с перфорацией)

Data for construction of diagram on moisture conditions of external wall (all screens with perforation)

Расчетная температура воздуха, °С	Определяемый параметр	Номер плоскости					
		I	II	III	IV	V	VI
$t_n = -6,9$	Температура $t$ , °С	17,3	16,8	9,0	4,2	-6,6	-6,81
	Максимальное парциальное давление $E$ , Па	1975	1913	1148	667	351	344
	Действительное парциальное давление $e$ , Па	1135	900,8	729	557,1	385,7	292

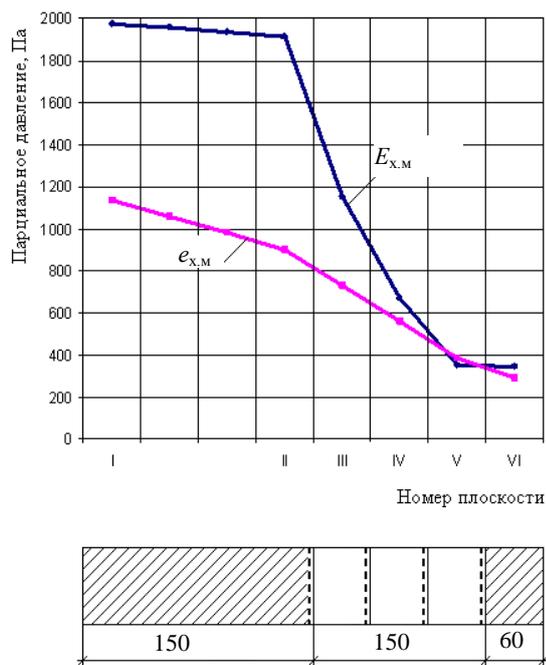


Рис. 2. График влажностного режима наружной стены (все экраны с перфорацией)

Fig. 2. Diagram on moisture conditions of external wall (all screens with perforation)

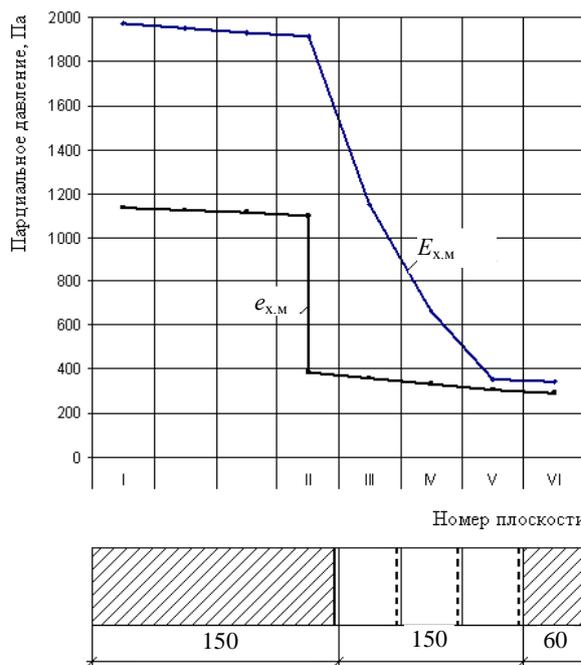


Рис. 3. График влажностного режима наружной стены (первый экран без перфорации, остальные – с перфорацией)

Fig. 3. Diagram on moisture conditions of external wall (first screen without perforation, rest – with perforation)

Как видно из построенных графиков, наиболее рациональным является расположение неперфорированного алюминиевого экрана меж-

ду внутренним слоем бетона и слоем перфорированного утеплителя (рис. 3), в то время как остальные экраны выполнены с перфорацией.

Таблица 2

Данные для построения графика влажностного режима наружной стены  
(первый экран без перфорации, остальные – с перфорацией)

Data for construction of diagram on moisture conditions of external wall  
(first screen without perforation, rest – with perforation)

Расчетная температура воздуха, °С	Определяемый параметр	Номер плоскости					
		I	II	III	IV	V	VI
$t_n = -6,9$	Температура $t$ , °С	17,3	16,8	9,0	4,2	-6,6	-6,81
	Максимальное парциальное давление $E$ , Па	1975	1913	1148	667	351	344
	Действительное парциальное давление $e$ , Па	1135	1099 / 385	359	333,2	306	292

Таблица 3

Данные для построения графика влажностного режима наружной стены  
(первый экран с перфорацией, остальные – без перфорации)

Data for construction of diagram on moisture conditions of external wall  
(first screen with perforation, rest – without perforation)

Расчетная температура воздуха, °С	Определяемый параметр	Номер плоскости					
		I	II	III	IV	V	VI
$t_n = -6,9$	Температура $t$ , °С	17,3	16,8	9,0	4,2	-6,6	-6,81
	Максимальное парциальное давление $E$ , Па	1975	1913	1148	667	351	344
	Действительное парциальное давление $e$ , Па	1135	1121	1112 / 847	837 / 572	562 / 297	292

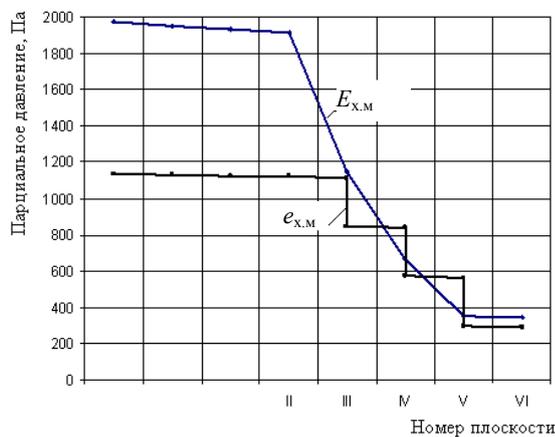


Рис. 4. График влажностного режима наружной стены  
(первый экран с перфорацией, остальные – без перфорации)

Fig. 4. Diagram on moisture conditions of external wall  
(first screen with perforation, rest – without perforation)

## ВЫВОД

Предлагаемая конструкция наружного ограждения с многослойным перфорированным утеплителем, между слоями которого находятся перфорированные слои из алюминиевой фольги, а внутренний бетонный слой отделен от утепляющих слоев неперфорированной фольгой, является наиболее приемлемой для длительной эксплуатации, исходя из влажностного режима работы теплоизоляции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Наружное ограждение здания: пат. № 13547 Респ. Беларусь, МПК Е 2/42 / Б. М. Хрусталева, В. Д. Сизов, В. Д. Акельев, И. М. Золотарева; дата публ. 25.05.2010.
2. Тепловая защита зданий. Теплоэнергетические характеристики: ТКП-45-2.04-196-2010. Введ. 01.09.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 23 с.
3. Тепловая защита зданий: СНиП 23-02-2003. Введ. 01.10.2003. М.: Госстрой России, 2004. 31 с.

4. Строительная теплофизика. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006. Взамен СНБ 2.04.01-97; введ. 01.07.07. Минск: Минстройархитектуры, 2007. 32 с.
5. Сизов, В. Д. Использование теплоизоляционных слоев из микромодулей в новых конструкциях стеновых панелей / В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров, В. М. Копко // Наука и техника. 2014. № 5. С. 54–60.
6. Сизов, В. Д. Влияние отражательной способности экранов на процесс теплопередачи в ограждающих конструкциях / В. Д. Сизов, Л. В. Нестеров, В. М. Копко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 1. С. 46–55.
7. Ключников, А. Д. Теплопередача излучением в огне-технических установках (инженерные решения задач) / А. Д. Ключников, Г. П. Иванцов. М.: Энергия, 1970. 400 с.
8. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений / А. М. Протасевич. Минск: Вышэйш. шк., 2015. 239 с.
9. Elsner, N. Grundlagen der Technischen Termodinamik / N. Elsner. Berlin: Akademie Verlag, 1974. 660 p.
10. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2007. Ч. 1. 607 с.
11. Тепло- и массообмен: в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2009. Ч. 2. 273 с.
2. ТКП-45-2.04-196–2010. Thermal Protection of Buildings. Heat- and Power Characteristics. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2010. 23 (in Russian).
3. SNiP 23-02–2003 [Construction Rules and Regulations]. Thermal Protection of Buildings. Moscow, State Construction Committee of Russia, 2004. 31 (in Russian).
4. ТКП 45-2.04-43–2006. Construction Thermal Physics. Structural Design Code. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2007. 32 (in Russian).
5. Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M. (2014) Usage of Micro-Modular Heat-Insulation Layer in Structures of Wall Panels. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (5), 54–60 (in Russian).
6. Sizov V. D., Nesterov L. V., Kopko V. M. (2016) Effect of the Screens Radiant Reflectance on Thermal Transport Process in the Cladding Structures. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (1), 46–55 (in Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-46-55>.
7. Kluchnikov A. D., Ivantsov G. P. (1970) *Heat Transfer While Using Radiation in Fire Engineering Units (Engineering Solution of Problems)*. Moscow, Energiya Publ. 400 (in Russian).
8. Protasevich A. M. (2015) *Construction Thermal Physics of Claddings and Structures*. Minsk, Vyshaihsaya Shkola Publ. 239 (in Russian).
9. Elsner N. (1974) *Grundlagen der Technischen Termodinamik*. Berlin, Akademie Verlag. 660.
10. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpolskii V. I., Akelev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerezko A. V. (2007) *Heat- and Mass Transfer. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University. 607 (in Russian).
11. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpolskii V. I., Akelev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerezko A. V. (2009) *Heat- and Mass Transfer. Part 2*. Minsk, Belarusian National Technical University. 273 (in Russian).

Поступила 27.06.2016

Подписана в печать 05.09.2016

Опубликована онлайн 28.03.2017

#### REFERENCES

1. Khrustalev B. M., Sizov V. D., Akelev V. D., Zolotareva I. M. (2010) Cladding. Patent Republic of Belarus No 13547 (in Russian).

Received: 27.06.2016

Accepted: 05.09.2016

Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-125-130

УДК 697.92

## Определение воздухообмена в помещениях общественных зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций

Канд. техн. наук, доц. Л. В. Борухова<sup>1)</sup>, инж. А. С. Шибeko<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Рассмотрены причины несоответствия параметров внутреннего воздуха в теплый период года для помещений общественных зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций. Основная причина некомфортной воздушной обстановки – заниженное значение расхода приточного воздуха из-за расчета воздухообмена по кратностям или норме воздухообмена на одного сотрудника, которые являются определяющей величиной только для холодного периода и переходных условий. То есть кратности и норма воздухообмена не учитывают насыщенность современных офисов оборудованием, теплопоступления от которого составляют значительную величину. Проведены анализ и сравнение существующих норм воздухообмена для Республики Беларусь, Российской Федерации, стран Европы и США. Выполнен расчет поступлений теплоты и воздухообмена для помещения общественного здания в теплый период года для ассимиляции избытков явной теплоты при различных ориентациях светопрозрачного фасада; приведена структура теплопоступлений в помещение. Исходя из воздухообмена, определена требуемая норма расхода приточного воздуха на одного сотрудника, произведено сравнение с существующей нормой воздухообмена. Требуемая норма превышает нормативную в среднем в 12 раз. Но данное обстоятельство не говорит о необходимости увеличения нормы во столько раз, так как это повлечет повышение капитальных и эксплуатационных затрат. В связи с этим рассмотрены варианты улучшения микроклимата в помещениях зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций: автоматическое регулирование теплоотдачи отопительных приборов в холодный период года; использование кондиционирования воздуха и увеличение разности температур приточного и удаляемого воздуха в теплый период.

**Ключевые слова:** воздухообмен, теплопоступления, микроклимат, общественные здания, светопрозрачные конструкции

**Для цитирования:** Борухова, Л. В. Определение воздухообмена в помещениях общественных зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций / Л. В. Борухова, А. С. Шибeko // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 125–130. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-125-130

## Determination of Air Exchange in Public Building Premises Having Large Area of Translucent Structures

L. V. Borukhava<sup>1)</sup>, A. S. Shybeka<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper considers reasons of internal air parameter mismatch in warm season of the year for public building premises having large area of translucent structures. The main reason of uncomfortable air environment is an underestimated value of air supply volume due to air exchange calculation according to multiplicity factor or air exchange rate per one person which are determinative values only for cold period and transient conditions. In other words multiplicity factor and air exchange rate do not take into account equipment abundance in modern offices and heat input of the office equipment is rather significant value. The paper contains an analysis and comparison of the existing air exchange rates for the Republic

---

**Адрес для переписки**Борухова Лилия Владимировна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-97-29  
fgv\_fes@bntu.by**Address for correspondence**Borukhava Liliya V.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-97-29  
fgv\_fes@bntu.by

of Belarus, Russian Federation, European countries and USA. Calculation of heat input and air exchange for public building premises during warm season of the year for assimilation of evident heat excess has been made at various orientations of curtain walls. The paper provides structure of heat input into premises. The required rate of air supply volume per one person has been determined on the basis of air exchange and it has been compared with the existing air exchange rate. The required rate averagely exceeds the standard one by 12-fold. But this does not mean that there is necessity to increase the rate in such a way because it entails an increase in capital and operational costs. In this connection the paper reviews variants for improvement of micro-climate in the building premises with large area of translucent structures: automatic regulation of heat transfer in heating appliances during cold period of the year; usage of air conditioning and increase in temperature difference of input and output air during warm period.

**Keywords:** air exchange, heat input, microclimate, public buildings, translucent structures

**For citation:** Borukhava L. V., Shybeka A. S. (2017) Determination of Air Exchange in Public Building Premises Having Large Area of Translucent Structures. *Science and Technique*. 16 (2), 125–130. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-125-130 (in Russian)

При обследовании общественных зданий, особенно с большой площадью светопрозрачных конструкций, зачастую можно наблюдать несоответствие требуемых метеорологических условий в помещениях в теплый период года. Это связано не только с недостатками в эксплуатации систем вентиляции, но и с некоторыми особенностями, которые необходимо учитывать при проектировании систем вентиляции.

Основной причиной несоответствия метеорологических условий являются недостаточные расходы приточного и удаляемого воздуха, из-за чего не вся выделяющаяся в помещениях избыточная теплота ассимилируется. Причиной этому может быть следующее: при определении воздухообмена большинства помещений общественных зданий расчет ведется посредством кратности воздухообмена  $n$ ,  $\text{ч}^{-1}$ , показывающей расход приточного или удаляемого воздуха, который должен поступать или удаляться из помещения в течение часа, отнесен-

ный к внутреннему объему помещения. Зачастую также используют нормативный объем наружного приточного воздуха (норму воздухообмена), который должен подаваться в час для одного сотрудника. Данную величину могут относить к площади пола помещения.

В настоящее время величина кратности воздухообмена для различных помещений общественных зданий нормируется в соответствии с [1]. Значения кратности воздухообмена для рабочих комнат (офисов), использующиеся в практике проектирования Республики Беларусь, а также сравнение с величинами, применяемыми в российской и зарубежной практике, представлены в табл. 1.

Однако приведенная в [1] величина, рассчитанная для холодного периода года, не учитывает возросшую с того времени насыщенность офисов разнообразной оргтехникой: компьютерами, принтерами, копировальными аппаратами и пр.

Таблица 1

Значение нормы воздухообмена для офисов [1–6]  
Value of air exchange rate for offices [1–6]

Наименование документа	Норма воздухообмена		Примечание
	$\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{чел.})$	$\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$	
Общественные здания и помещения административного назначения. Правила проектирования. ТКП 45-3.02-189-2010 (02250) (Республика Беларусь)	20,0	3,3	1. При норме площади на одного сотрудника $6 \text{ м}^2$ . 2. Допускается принимать для расчетов $4 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$
Общественные здания административного назначения. СНиП 31-05-2003 (Российская Федерация)	20,0	3,3	1. При норме площади на одного сотрудника $6 \text{ м}^2$ . 2. Допускается принимать для расчетов $4 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$
Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. СТО НП «АВОК» 2.1-2008 (Российская Федерация)	60,0	10,0	При норме площади на одного сотрудника $6 \text{ м}^2$
Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE Standard 62.1-1999 (США)	36,0	2,6	При норме площади на одного сотрудника $14 \text{ м}^2$
Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE Standard 62.1-2013 (США)	30,6	1,5	При норме площади на одного сотрудника $20 \text{ м}^2$
Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. EN 15251-2007	36,0–43,0	2,9/3,6	При норме площади на одного сотрудника $15 \text{ м}^2$ для больших офисов и $10 \text{ м}^2$ – для персональных офисов

Значения теплопоступлений от некоторого офисного оборудования приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, теплопоступления от офисного оборудования довольно значительны, и их необходимо учитывать в тепловом балансе помещения.

Вторая причина – норма воздухообмена – не учитывает теплопоступления от солнечной радиации через заполнение световых проемов, которые для общественных зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций значительны. Средние за световой день теплопоступления через световой проем с однокамерным энергосберегающим стеклопакетом в пятикамерном ПВХ-переплете размерами 1×1 м приведены в табл. 3.

В-третьих, в норме воздухообмена не учтен тепловой поток, поступающий от искусственного освещения, которое зачастую продолжает работать и в теплый период года.

В целях установления реального значения нормы воздухообмена был произведен расчет теплопоступлений в помещение офиса размерами 12,5×8 м (площадь 100 м<sup>2</sup>) и высотой 3 м, расположенного в городе Минске, при различных вариантах ориентации остекления. В офисе работают 16 сотрудников, причем каждый имеет персональный компьютер (число сотрудников определено исходя из нормы площади на

одного сотрудника (6 м<sup>2</sup>/чел.) в соответствии с табл. Б.3 [8]). Кроме того, имеются офисный копировальный аппарат и лазерный принтер. Вместо наружной стены устроен светопрозрачный фасад из системных профилей, выполненных из алюминия, с заполнением двухкамерным энергосберегающим стеклопакетом (сопротивление теплопередаче фасада  $R_{\text{П}} = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ) размерами 3×1 м. Конструкция межэтажного перекрытия – уложенный на железобетонную многопустотную плиту (толщина 220 мм) дубовый паркет толщиной 25 мм. Перегородки – оштукатуренная кирпичная кладка толщиной в полкирпича. Искусственное освещение в теплый период не работает.

Суммарные теплопоступления  $\Sigma Q$ , Вт, определяли по выражению

$$\Sigma Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{об}} + Q_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{л}}$  – теплопоступления от персонала, Вт, зависящие от количества работников, категории работ и температуры в помещении [9];  $Q_{\text{об}}$  – теплопоступления от офисного оборудования, Вт, с учетом средневзвешенного по площади помещения коэффициента неравномерности 0,46 [7];  $Q_{\text{п}}$  – теплопоступления от солнечной радиации через заполнение светопрозрачного фасада, Вт [9–11].

Таблица 2

Расчетные теплопоступления от некоторого офисного оборудования [7]

Calculated heat input from some office equipment [7]

Наименование офисного оборудования	Расчетное теплопоступление $Q_{\text{об}}$ , Вт
Компьютер (с монитором)	110
Настольный лазерный принтер в режиме работы 1 стр./мин	100
Настольный лазерный принтер в режиме простаивания	35
Малый офисный лазерный принтер в режиме работы 1 стр./мин	160
Малый офисный лазерный принтер в режиме простаивания	70
Настольный копировальный аппарат в режиме работы 1 стр./мин	85
Настольный копировальный аппарат в режиме простаивания	20
Офисный копировальный аппарат в режиме работы 1 стр./мин	400
Офисный копировальный аппарат в режиме простаивания	300
Факс в непрерывном режиме работы	30
Факс в режиме простаивания	15
Сканер в непрерывном режиме работы	25
Сканер в режиме простаивания	15

Таблица 3

Средние за световой день теплопоступления от солнечной радиации

Average value of daylight heat input from solar radiation

Наименование величины	Теплопоступление при ориентации остекления							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Средний за световой день тепловой поток через 1 м <sup>2</sup> площади проема $q_{\text{п}}^{\text{сп}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	-2,44	5,04	19,38	24,05	17,86	22,09	21,04	5,21

Результаты расчета для различных ориентаций светопрозрачного фасада приведены в табл. 4, сравнение доли каждого вида теплопоступлений в суммарных теплопоступлениях – в табл. 5 и на рис. 1.

Из табл. 4, 5 и рис. 1 видно, что теплопоступления от офисного оборудования составляют значительную часть суммарных теплопоступлений, превышая каждый вид теплопоступлений в отдельности. Учет данной величины весьма важен в расчете воздухообмена помещений.

На основании расчета определен требуемый для ассимиляции избытков теплоты воздухообмен  $L_{пр}$ , м<sup>3</sup>/ч, исходя из уравнения теплового баланса

$$L_{пр} = \frac{3,6 \sum Q}{c\rho(t_{уд} - t_{пр})}, \quad (2)$$

где  $c = 1,005$  кДж/(кг·К),  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> – удельная изобарная теплоемкость и плотность воздуха соответственно;  $t_{уд}$ ,  $t_{пр}$  – температура удаляемого и приточного воздуха, °С.

В качестве расчетного принят перепад температур  $t_{уд} - t_{пр} = 3$  °С.

На основании расчета требуемого для ассимиляции избытков теплоты воздухообмена определена требуемая кратность воздухообмена и проведено ее сравнение с нормативной. Результаты нахождения требуемого воздухообмена и сравнение норм воздухообмена приведены в табл. 6 и на рис. 2.

Как видно из табл. 6, требуемая норма воздухообмена для теплого периода в среднем в 12 раз превышает нормативную. Причины этого следующие:

1) нормы воздухообмена рассчитаны для холодного периода года исходя из выделяющихся от одного человека вредностей, поэтому они не учитывают тепловыделения от офисного оборудования, которые, как видно из табл. 5 и рис. 1, весьма значительны (в данном примере 41 %);

2) норма воздухообмена не учитывает теплопоступления от солнечной радиации, которые в теплый период года могут достигать значительной величины в зависимости от площади светопрозрачных конструкций (в данном примере теплопоступления составляют 30 % общих).

Для решения рассматриваемой проблемы в теплый период года необходимо увеличить норму воздухообмена.

Таблица 4

Суммарные теплопоступления в помещение офиса  
Total heat input for office space

Теплопоступление	Величина теплопоступления, Вт, при ориентации фасада							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
От людей $Q_{л}$	1130							
От оборудования $Q_{об}$	1633							
Через заполнение светопрозрачного фасада $Q_{п}$	86	750	1421	1568	1365	1478	1811	1050
Суммарные теплоизбытки $\Sigma Q_{изб}$	2849	3513	4184	4331	4128	4241	4574	3813

Таблица 5

Средние величины теплопоступлений и доля каждого вида из них в суммарных теплопоступлениях  
Average values of heat input and proportion of its each type in total heat input

Теплопоступление	Среднее значение величины теплопоступления, Вт	Доля каждого вида теплопоступления в суммарных теплопоступлениях, %
От людей $Q_{л}$	1130	29
От оборудования $Q_{об}$	1633	41
Через заполнение светопрозрачного фасада $Q_{п}$	1191	30
Суммарные теплоизбытки $\Sigma Q_{изб}$	3954	100



Рис. 1. Структура теплоступлений в помещение

Fig. 1. Structure of heat input into office premises

Таблица 6

Сравнение требуемого и нормативного воздухообмена

Comparison of the required and normative air rates

Наименование показателя	Воздухообмен при ориентации фасада									
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Средняя величина	
Требуемый расход воздуха $L_{тр}$ , м <sup>3</sup> /ч	2835	3495	4165	4310	4105	4220	4550	3795	3935	
Требуемая норма воздухообмена	$L_{уд}^{тр}$ , м <sup>3</sup> /(ч·чел.)	177,2	218,4	260,3	269,4	256,6	263,8	284,4	237,2	245,9
	$L'_{уд}^{тр}$ , м <sup>3</sup> /(ч·м <sup>2</sup> )	28,4	35,0	41,7	43,1	41,1	42,2	45,5	38,0	39,4
Нормативная норма воздухообмена	$L_{уд}^{норм}$ , м <sup>3</sup> /(ч·чел.)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	$L'_{уд}^{норм}$ , м <sup>3</sup> /(ч·м <sup>2</sup> )	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Превышение требуемой нормы над нормативной	На одного сотрудника ( $m = L_{уд}^{тр} / L_{уд}^{норм}$ )	8,9	10,9	13,0	13,5	12,8	13,2	14,2	11,9	12,3
	На 1 м <sup>2</sup> ( $m = L'_{уд}^{тр} / L'_{уд}^{норм}$ )	8,6	10,6	12,6	13,1	12,5	12,8	13,8	11,5	11,9

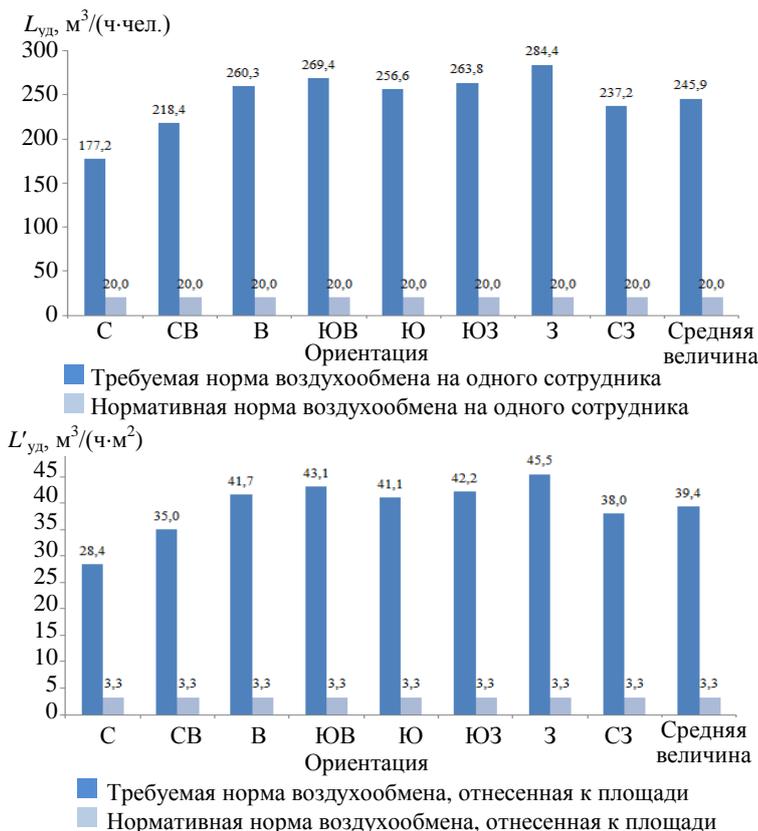


Рис. 2. Сравнение требуемой и нормативной нормы воздухообмена при различной ориентации фасада: а – на одного сотрудника; б – отнесенная к площади помещения

Fig. 2. Comparison of the required and normative norms of air rates at different orientations of the facade: а – per one worker; б – ascribed to the area of the room

Однако из этого не следует, что ее нужно увеличивать в 12 раз, поскольку это чревато значительными затратами на вентиляционное оборудование (увеличение размеров воздуховодов, более мощные вентиляторы и пр.) и, как следствие, затратами электроэнергии. В таком случае необходимо устройство кондиционирования воздуха помещений для ассимиляции избытков теплоты, не ушедшей с приточным воздухом.

В холодный период года норма воздухообмена в помещении может оставаться прежней. Но в данном случае необходимо предусматривать автоматическую регулировку теплоотдачи отопительных приборов в каждом помещении.

Для снижения нормы воздухообмена также можно предусмотреть уменьшение расчетной разности температур приточного и удаляемого воздуха, в результате чего расход приточного воздуха в соответствии с (2) снизится.

Однако уменьшение температуры приточного воздуха может отрицательно сказаться на метеорологических условиях в помещении и возникновением дискомфорта у персонала. Поэтому данный вопрос должен решаться совместно с выбором рациональной схемы распределения воздуха в помещении и расположением в нем воздухораспределителей.

## ВЫВОДЫ

1. Существующая норма воздухообмена для помещений общественных зданий ( $20 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{чел.})$ ) не обеспечивает эффективного воздухообмена для удаления избыточной теплоты в помещении, так как она рассчитана для холодного периода года и не учитывает тепловыделения от офисного оборудования. Требуемый расход воздуха превышает нормативный в среднем в 12 раз.

2. Для холодного периода года кратность может оставаться прежней, однако при проектировании системы отопления необходимо предусмотреть автоматическое регулирование теплоотдачи отопительных приборов.

3. В теплый период года бороться с избыточной теплотой можно двумя способами, причем в любом случае необходимо увеличение кратности воздухообмена (не обязательно в 12 раз, так как это сопряжено с увеличением капитальных и эксплуатационных затрат). Первый способ заключается в применении кондиционирования воздуха для ассимиляции избытков теплоты, второй – в увеличении разности температур удаляемого и приточного воздуха. Реализация второго способа должна решаться с выбором рациональной схемы раздачи приточного воздуха.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Общественные здания и помещения административного назначения. Правила проектирования: ТКП 45-3.02-189-2010 (02250). Введ. 01.01.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 24 с.
2. Общественные здания административного назначения: СНиП 31-05-2003. Введ. 01.09.2003. М.: Госстрой России, 2006. 22 с.
3. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена: СТО НП «АВОК» 2.1-2008. Введ. 01.06.2004. М.: НП «АВОК», 2008. 16 с.
4. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality: ASHRAE Standard 62.1-1999. Atlanta GA: ASHRAE Inc., 1999. 27 p.
5. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality: ASHRAE Standard 62.1-2013. Atlanta GA: ASHRAE Inc., 2013. 52 p.
6. Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics: EN 15251-2007. Date Approved: 26.03.2007. Brussel: CEN, 2007. 50 p.
7. Wilkins, C. Учет в тепловом балансе теплопоступлений от офисного оборудования / С. Wilkins, М. Hosni // АВОК. 2003. № 3. С. 70-79.
8. Требования при работе с видеодисплейными терминалами и электронно-вычислительными машинами: утв. М-вом здравоохранения Республики Беларусь 28.06.2013 № 59. Минск: Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья, 2013. 32 с.
9. Внутренние санитарно-гигиенические устройства: в 3 ч. / В. Н. Богословский [и др.]; под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. М.: Стройиздат, 1992. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1. 319 с.

10. Теплоснабжение и вентиляция / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во АСВ, 2008. 784 с.
11. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещение: Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91 / утв. ордена Трудового Красного Знамени арендным предприятием «Промстройпроект» 01.01.1993. М.: Промстройпроект, 1993. 35 с.

Поступила 23.06.2016

Подписана в печать 26.08.2016

Опубликована онлайн 28.03.2017

## REFERENCES

1. ТКП 45-3.02-189-2010 (02250). *Public Buildings and Premises for the Purpose of Administration. Design Rules*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2011. 24 (in Russian).
2. SNiP 31-05-2003 [Construction Rules and Regulations]. *Public Buildings for the Purpose of Administration*. Moscow, State Construction Committee of Russia, 2006. 22 (in Russian).
3. STO NP "AVOK" 2.1-2008 [Company Standard of Non-Commercial Partnership "Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat-Supply and Building Thermal Physics"]. *Residential and Public Buildings. Standards of Air Interchange*. Moscow, Publishing House AVOK, 2008. 16 (in Russian).
4. ASHRAE Standard 62.1-1999. *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta GA: ASHRAE Inc., 1999. 27.
5. ASHRAE Standard 62.1-2013. *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta GA: ASHRAE Inc., 2013. 52.
6. EN 15251-2007. *Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics*. Brussel, CEN, 2007. 50.
7. Wilkins C., Hosni M. (2003) Thermal Balance Accounting of Heat Inputs from Office Equipment. *AVOK* [Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat-Supply and Building Thermal Physics], (3), P. 70-79 (in Russian).
8. *Requirements for Execution of Works with Video Display Terminals and Electronic Computing Machines*: Approved by Ministry of Health of the Republic of Belarus on 28.06.2013. Minsk: Republican Centre of Hygiene, Epidemiology and Public Health, 2013. 32 (in Russian).
9. Bogoslovskii V. N., Pirumov A. I., Posokhin V. N., Berezina N. I., Dvinyanikov V. V., Egiazarov A. G., Krupnov B. A., Leskov E. A., Fialkovskaya T. A., Shapritskii V. N., Shilkrot E. O., Aleksandrov A. I., Kushelman G. S., Moor L. F., Moshkin V. I., Nevskii V. V., Orlov V. A., Petrov B. S., Pylaev E. N., Pavlov N. N. (ed.), Shiller Yu. I. (ed.) (1992) *Internal Sanitary and Hygienic Devices. Part. 3: Ventilation and Air Conditioning. Book 1*. Moscow, Stroyizdat Publ. 319 (in Russian).
10. Khrustalev B. M., Kuvshinov Yu. Ya., Kopko V. M., Mikhalevich A. A., Dyachek P. I., Pokotilov V. V., Senkevich E. V., Borukhova L. V., Pilyushenko V. P., Bazylenko G. I., Yurkov O. I., Artikhovich V. V., Pshonik M. G. (2008) *Heat Supply and Ventilation. Course and Diploma Design*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, ASV Publ. 784 (in Russian).
11. Guide 2.91 to SNiP 2.04.05-91. [Construction Rules and Regulations]. *Input Calculation of Solar Radiation Heat Into Premises*. Moscow, Promstroyproyekt Publ., 1993. 35 (in Russian).

Received: 23.06.2016

Accepted: 26.08.2016

Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-131-136

УДК 624.9

## Вероятностная оценка необходимости и вида ремонта здания и его элементов

Докт. техн. наук С. Н. Осипов<sup>1)</sup>, Д. А. Поздняков<sup>1)</sup><sup>1)</sup>ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** В нынешних нормативных документах 100%-й износ принимается за крайний предел эксплуатации строительного элемента или конструкции. При использовании вероятностной степени физического износа и определении необходимости ремонта за 100 % следует принимать физическое состояние строительных элементов и конструкций, соответствующее минимально допустимому уровню надежности. В статье приведено описание нового метода определения необходимости и вида ремонта здания и его элементов на базе вероятностной оценки их физического износа, которая сопрягается с остаточной надежностью. Такой метод расчета производится путем определения начального и предельно допустимого значений вероятности отказа или разрушения и плотности распределения вероятности, по которым выбирают масштаб износа по времени, обеспечивающий повышенный удельный рост вероятности отказа или разрушения в начальный обкаточный период эксплуатации элемента. Затем периодически проводится плановая оценка износа элементов здания. В случае превышения планового уровня роста вероятности 0,4–0,5 от критического выполняется средний текущий ремонт, а в случае достижения уровня вероятности 0,8 и более от критического – капитальный ремонт для снижения значения вероятности до близкого к начальному. Текущая плановая оценка физического износа производится по нормативным косвенным признакам, а при превышении интенсивности физического износа планового уровня немедленно переходят к определению прочностных свойств элементов здания приборными физическими методами. Учитывая относительную новизну вероятностной оценки необходимости и вида ремонта здания и его элементов в процессе их эксплуатации, следует выполнить дополнительные теоретические и статистические исследования для включения этого метода в строительную нормативно-техническую документацию.

**Ключевые слова:** строительные конструкции, элементы, надежность, физический износ, вероятностная оценка, ремонт, шкала износа, экспертная оценка

**Для цитирования:** Осипов, С. Н. Вероятностная оценка необходимости и вида ремонта здания и его элементов / С. Н. Осипов, Д. А. Поздняков // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 131–136. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-131-136

## Probabilistic Assessment of Necessity in Repair and its Type for Building and its Elements

S. N. Osipov<sup>1)</sup>, D. A. Pozdniakov<sup>1)</sup><sup>1)</sup>UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The existing normative documents consider 100%-wear as an extreme limit for operation of constructional element or structure. While using probabilistic rate of physical wear and determining the necessity in repair 100%-wear is assumed on the basis of physical state of constructional elements and structures that corresponds to minimum allowable reliability level. The paper contains description of a new method for determination of necessity in repair and its type for building and its elements on the basis of probabilistic assessment of their physical wear which is mated with residual reliability. Such method of calculation is carried out by determination of initial and threshold limit values for failure or destruction probabilities and

### 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

density of probability distribution. According to these values time wear rate is selected and it ensures higher specific growth of failure and destruction probabilities at initial running period of the element operation. Then a planned wear assessment of building elements is carried out on a periodical basis. In the case when the planned rate of probability growth is equal to 0.4–0.5 from the critical value it is necessary to execute a mean current repair and when the probability level reaches value of 0.8 or even more in comparison with a critical one then it is necessary to carry out a capital repair in order to reduce probability value which will be close to the initial one. Such planned assessment of physical wear is made according to regulatory indirect indicators and in the case when intensity of physical wear exceeds the planned level it is necessary to determine strength characteristics of building elements while using instrumental physical methods. Taking into account a relative novelty of probabilistic assessment of necessity in repair and its type for building and its elements during operational period it is recommendable to carry out additional theoretical and statistic investigations in order to include this method in normative technical construction documents.

**Keywords:** construction structures, elements, reliability, physical wear, probabilistic assessment, repair, wear scale, expert assessment

**For citation:** Osipov S. N., Pozdniakov D. A. (2017) Probabilistic Assessment of Necessity in Repair and its Type for Building and its Elements. *Science and Technique*. 16 (2), 131–136. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-131-136 (in Russian)

Оценка необходимости и вида ремонта здания и его отдельных систем и элементов в результате обследования объекта специалистами [1, 2] до сих пор производится по средней величине физического износа, в соответствии с которой здания, достигшие состояния, близкого к ветхому, подлежат капитальному ремонту, а достигшие интенсивного износа – текущему ремонту [3]. Так, в [3, с. 1] само определение «ветхое состояние» соответствует физическому износу здания или его отдельных элементов со стенами из каменных материалов более 70 %, а из дерева и прочих материалов – 65 %. Эти уровни износа являются единственными количественными характеристиками необходимости капитального ремонта.

К главному недостатку такого способа оценки относится существенная неопределенность в оценке степени физического износа в соответствии с [4], где физический износ различных элементов здания оценивается по косвенным признакам (наличие, количество и раскрытие трещин, прогибы и просадки и т. п.) с мало обоснованной точностью  $\pm 10$  %. Кроме того, следует указать на определяемый [4, табл. 5.2] предельный физический износ в 50, 70 и во многих случаях в 80 %. При этом деревянная сборно-щитовая стена считается физически изношенной на 41–50 % при перекосе, выпучивании, отклонении от вертикали, поражении древесной гнилью на площади более 30 %. Значит, такую стену можно считать далекой от ветхого состояния и не нуждающейся в капитальном ремонте.

В последние годы развивается новое направление оценки предельно допустимой и текущей степеней физического износа упругих

и упругопластических строительных элементов и технических устройств [5, 6], которое также описано в [7, 8], где предлагается использование некоторых законов математической статистики (теории вероятностей) в качестве метода оценки физического износа элементов зданий, а также необходимости и видов ремонтов. Задачами разработанного метода оценки необходимости и вида ремонта являются:

- выбор показателя физического износа здания или его элементов;
- определение начального и предельно допустимого значений показателя физического износа;
- определение условий для необходимости проведения текущего ремонта;
- определение условий для необходимости проведения капитального ремонта.

Технический результат, соответствующий указанным задачам, достигается посредством нового метода определения необходимости и вида ремонта здания и его элементов, в соответствии с которым выбирают масштаб износа во времени, обеспечивающий учет повышенного удельного роста вероятности отказа или разрушения в начальный обкаточный период эксплуатации элемента. При этом периодически проводят плановую оценку износа элемента здания и в случае превышения планового уровня роста вероятности износа 0,4–0,5 от критического производят текущий ремонт, а при достижении уровня вероятности 0,8 и более от критического – капитальный ремонт для снижения вероятности до планового уровня или менее в соответствии со сроком эксплуатации.

В качестве базового параметра, являющегося основным в оценке износа элементов здания,

принимается вероятность отказа или разрушения, которая лежит в основе расчета прочностных характеристик и определяет понятие надежности элементов здания. Сущность нового метода для определения величины физического износа элемента здания заключается в использовании вероятности его отказа или разрушения. Это – четкий, универсальный и прямой математический показатель в противовес используемым ныне [4] косвенным признакам (количество и раскрытие трещин, размеры деформаций и т. п.). Такое применение вероятности отказа или разрушения позволяет для выбора вида ремонтов воспользоваться их определениями [3, с. 1]. Так, текущий ремонт зданий и сооружений – это ремонт, который производится с целью предотвращения дальнейшего интенсивного износа, восстановления исправности и устранения повреждений конструкций и инженерного оборудования зданий и сооружений. Капитальный ремонт зданий и сооружений – ремонт, связанный с восстановлением основных физико-технических, эстетических и потребительских качеств зданий и сооружений, утраченных в процессе эксплуатации. В предлагаемом методе рассматривается необходимость восстановления физико-технических качеств как отдельных элементов, так и целых строительных конструкций. Следует отметить, что в новой методике основное внимание уделено только физическому износу, характеризующемуся изменением количественных показателей прочности элемента здания.

Как показано в [4, 9], физический износ слоистых конструкций (срок службы 10–125 лет), систем внутреннего горячего водоснабжения (срок службы 10–20 лет), систем центрального отопления (радиаторы чугунные ~40 лет; стальные стояки и конвекторы – 30 лет; запорная арматура всех видов – 12 лет), систем внутреннего водопровода (различные элементы со сроком службы 10–30 лет), систем внутренней канализации (различные элементы со сроком службы 10–40 лет), систем внутреннего электрооборудования (разные элементы со сроком службы 15–40 лет) имеет S-образный вид в зависимости от времени эксплуатации. Зависимость относительного износа ( $i$ ) в относительном времени ( $T_i/T_{кр}$ ) для слоистых конструкций (совокупность точек), представленная на рис. 1,

почти совпадает с такой же статистической зависимостью при сроке эксплуатации зданий до 60 лет [6, рис. 2.1]. Однако при сроке эксплуатации более 80 лет кривая относительного статистического износа зданий существенно отличается от сводной зависимости для слоистых конструкций. Здесь нужно отметить, что для зданий за единицу относительного времени принят срок эксплуатации 100 лет [10, рис. 2.1]. При выполнении необходимых ремонтно-восстановительных работ (рис. 1, линия 2) среднестатистический износ здания не превышает 40%. При этом ремонтно-восстановительные работы производятся в среднем через 30 лет.

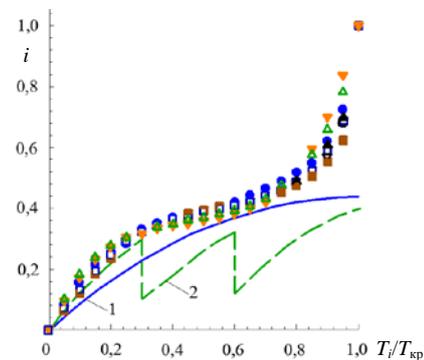


Рис. 1. Зависимость относительного износа слоистых конструкций от относительного времени эксплуатации: 1 – средняя статистическая кривая относительного износа [11, рис. 1.2]; 2 – относительный износ с учетом ремонтов;  $T_i$  – текущее время;  $T_{кр}$  – критическое время эксплуатации

Fig. 1. Dependence of relative wear laminated structures on operational relative time:

- 1 – average statistic curve of relative wear [11, fig. 1.2];  
2 – relative wear with due account of repairs;  
 $T_i$  – current time;  $T_{кр}$  – operational critical time

В [1, с. 11–19] представлены рекомендуемые минимальные (15–20 лет) продолжительности эффективной эксплуатации зданий и их отдельных элементов (10–60 лет) до капитального ремонта (замены), а также приведены сроки минимальной продолжительности эффективной эксплуатации зданий до постановки на текущий ремонт (3–5 лет), которая в среднем примерно в пять раз меньше (рис. 1, кривые 1, 2). Эти зависимости приведены в [11, рис. 1.2] и достаточно хорошо коррелируются с [1]. Однако для отдельных элементов зданий сроки проведения капитальных ремонтов (замены) могут различаться до 10 раз, что вносит определенный хаос в совмещение сроков ремонтов различных элементов.

Как следует из [5], исчерпание предусмотренного лимита повышения вероятности отказа или разрушения элемента здания от начальной до критической обязательно должно компенсироваться каким-то ремонтом, например, капитальным, что отражено на рис. 1 ступенчатой кривой 2. В этом случае предельно допустимый физический износ достигает 30 % (рис. 1, кривая 2), что при оценке надежности в виде  $100\% - 30\% = 70\%$  является неудовлетворительным результатом. Поэтому можно считать, что полный физический износ элемента здания реализуется при достижении 50 % вероятности отказа или разрушения, когда численная характеристика оцениваемого параметра достигает средней величины (математического ожидания) распределения возможных значений параметра. Тогда реальный физический износ элемента составляет 15 %, что соответствует надежности 85 % и расчетной величине оцениваемого параметра, меньше среднего на  $1,04\sigma$  [11, табл. 1], где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

Интенсивность относительного физического износа определяется первой производной  $di/dT_i$  при изменении (нарастании) во времени и для исходных данных (приведенных на рис. 1) в виде совокупности точек представлена на рис. 2. Как видно из этой зависимости, интенсивность относительного физического износа элемента достаточно велика в начале эксплуатации и постепенно уменьшается со временем до  $T_i/T_{кр} = (0,4-0,5)$ , что соответствует окончанию периода обкатки. Затем при  $T_i/T_{кр} > 0,6$  интенсивность физического износа возрастает и при  $T_i/T_{кр} > 0,8$  резко ускоряется до полного разрушения. Аналогичные результаты дают расчеты по физическому износу других элементов зданий [9, 10].

Поэтому для реальной оценки состояния физического износа элемента здания перед проведением очередного текущего ремонта, попадающего в промежуток времени  $T_i/T_{кр} = (0,4-0,5)$ , необходимо использовать детальное обследование в соответствии с требованием п. 8.24 [1], предусматривающим прямые инструментальные измерения физических показателей элементов, способы реализации которых частично приведены в [10, параграф 2.3]. Сравнение полученных физических и статистических показателей свойств элемента с первоначальными позволяет с помощью [12] или численным методом определить увеличение вероятности от-

каза или разрушения, а также необходимый объем и методику ремонтных работ.

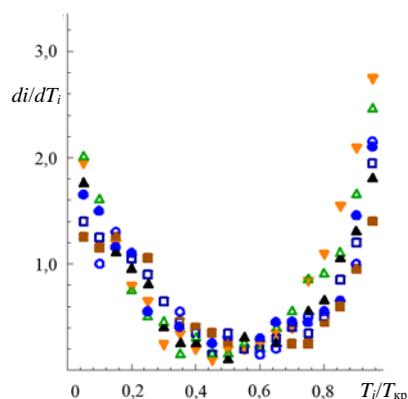


Рис. 2. Зависимость интенсивности относительного физического износа слоистых конструкций от относительного времени эксплуатации

Fig. 2. Dependence of relative physical wear intensity in laminated structures on operational relative time

Учитывая рекомендованную в [1, с. 11] продолжительность эффективной эксплуатации различных зданий до постановки на текущий ремонт, составляющую 0,15–0,25 части времени до постановки на капитальный ремонт, текущий ремонт, попадающий в относительный промежуток времени  $T_i/T_{кр} = (0,4-0,5)$ , можно назвать средним текущим ремонтом, так как он производится примерно в половине времени эксплуатации здания до необходимости проведения капитального ремонта, которая наступает при  $T_i/T_{кр} \geq 0,8$ . Предложенный метод оценки и вида ремонта здания и его элементов несущественно увеличивает расходы на нормативное обследование зданий, но значительно повышает безопасность эксплуатации зданий и уменьшает затраты на ремонт и ликвидацию аварийных ситуаций.

Одной из главных причин преждевременного физического износа и выхода из строя (отказа) строительных элементов и технических устройств является попадание дефектных строительных изделий к потребителю. Один из способов сведения к минимуму дефектных строительных изделий – проведение их технологических испытаний (ТИ). Задача ТИ – провоцирование изделия на отказ вследствие производственных дефектов, а также оценка надежности, что требует длительных сроков.

Еще в 50-е гг. прошлого века сложились три основных метода сокращения периода испытаний на надежность [13, 14]. Однако эти методы

не могут применяться для ускорения ТИ, поскольку для экстраполяции процессов износа необходимо получение устойчивых статистических закономерностей, соответствующих не только приработке изделия, но и основному периоду нормальной эксплуатации.

Некоторые способы сокращения периода испытаний на надежность предлагаются в [15] – это форсирование режимов ускоренных испытаний на надежность путем повышения нагрузки или ужесточения воздействия внешней среды на изделие или их сочетание. Однако здесь важно найти способ перерасчета результатов испытаний, что даже для определения долговечности бетонных и железобетонных изделий является достаточно сложным процессом [16].

В [17] сформулированы некоторые требования к ускоренным ТИ, основанные на опыте проведения как ускоренных технологических испытаний на надежность, так и ТИ различных классов и видов. При этом для получения информации о сочетаниях воздействий и об их влиянии на работоспособность изделий наиболее приемлемым считается метод экспериментальной оптимизации [15].

С начала XXI в. в Западной Европе были приняты стандарты серии ISO 15686 [18] под общим названием «Здания и недвижимое имущество», в которых для планирования сроков службы проектируемого или эксплуатируемого объекта или его отдельных элементов нашел применение факторный метод, основанный на экспертных оценках, т. е. на мнении отдельных специалистов, что плохо поддается оценке надежности особенно в наших экономических условиях. Только в 1980-е гг. появились крупные работы [19, 20] по надежности функционирования зданий, в том числе жилых. Однако основы расчета надежности пока не нашли должного отражения в нормативных документах, за редким исключением [21, 22].

## ВЫВОДЫ

1. Правильная оценка физического износа жилых зданий имеет большое не только техническое (безопасность и условия проживания), но и экономическое значение вследствие значительного объема зданий индустриальной жилой застройки прошлого столетия в городах и высокой стоимости ремонтов.

2. До сих пор оценка степени физического износа зданий чаще всего производится экспертным способом, зависящим от уровня ква-

лификации и морально-психологического состояния человека, что может приводить к нарушению безопасности и нормальных условий проживания людей.

3. В нормативно-технической документации на строительные материалы и изделия Беларуси нет требований и методик определения надежности используемых строительных элементов и конструкций. Только в силу традиций в нормативных документах 100%-й износ принимается за крайний предел эксплуатации строительного элемента или конструкции. При использовании вероятностной оценки степени износа и определении необходимости ремонта за 100 % следует принимать физическое состояние строительных элементов и конструкций, соответствующее минимально допустимому уровню надежности.

4. Текущая плановая оценка физического износа производится по нормативным косвенным признакам. Однако в случае превышения интенсивности физического износа планового уровня прочностные свойства элементов здания определяют приборными физическими методами.

5. Учитывая относительную новизну вероятностной оценки необходимости и вида ремонта здания и его элементов в процессе их эксплуатации, следует провести дополнительные теоретические и статистические исследования для включения этого метода в строительную нормативно-техническую документацию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения: ВСН 58–88 (р). М.: Стройиздат, 1990. 32 с.
2. Здания и сооружения. Основные требования к техническому состоянию и обслуживанию строительных конструкций и инженерных систем, оценке их пригодности к эксплуатации: СНБ 1.04.01–04. Минск: Минстройархитектуры, 2004. 20 с.
3. Ремонт, реконструкция и реставрация жилых и общественных зданий и сооружений: СНБ 1.04.01–02. Минск: Минстройархитектуры, 2003. 17 с.
4. Здания и сооружения. Оценка степени физического износа: ТКП 45-1.04-119–2008 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2009. 44 с.
5. Способ вероятностной оценки физического износа элементов зданий: пат. 018263 Евразийский, МПК E04H 1/00 (2009) / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко; дата публ. 28.06.2013; пат. Респ. Беларусь № 19268, МПК E04H 1/00 / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко; дата публ. 30.06.2013.
6. Способ вероятностной оценки физического износа упругопластического элемента здания: пат. 19268 Евразийский, МПК E04H 1/00 (2011) / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко; дата публ. 26.06.2013.

7. Осипов, С. Н. Об оценке физического износа элементов технических устройств / С. Н. Осипов, Д. А. Поздняков // Наука и техника. 2015. № 2. С. 23–30.
8. Осипов, С. Н. Об оценке физического износа упругопластических элементов зданий / С. Н. Осипов, Д. А. Поздняков // Наука и техника. 2015. № 6. С. 30–36.
9. Правила оценки физического износа жилых зданий: ВСН 53–86 (р). М.: Госгражданстрой, 1988. 72 с.
10. Матвеев, Е. П. Реконструкция жилых зданий / Е. П. Матвеев. М.: ГУП ЦПП, 1999. Ч. 1: Теория, методы и технологии реконструкции жилых зданий. 367 с.
11. Пилипенко, В. М. Комплексная реконструкция индустриальной жилой застройки / В. М. Пилипенко. Минск: Адукацыя і выхаванне, 2007. 280 с.
12. Янко, Я. Математико-статистические таблицы / Я. Янко. М.: Госстатиздат, 1961. 244 с.
13. Шор, Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности / Я. Б. Шор. М.: Сов. радио, 1962. 547 с.
14. Герцбах, И. Б. Модели отказов / И. Б. Герцбах, Х. Б. Кордонский. М.: Сов. радио, 1966. 160 с.
15. Долинская, М. Г. Разработка и стандартизация методов стандартизации технологического прогона промышленных изделий / М. Г. Долинская. М.: ВНИИС, 1980. 180 с.
16. Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов / С. Н. Леонович. Минск: Тыздзень, 1999. 266 с.
17. Долинская, М. Г. Технологические испытания промышленной продукции / М. Г. Долинская, В. А. Таран. М.: Изд-во стандартов, 1985. 104 с.
18. Здания и недвижимое имущество. Планирование срока службы. Ч. 8: Эталонный срок службы зданий и оценки планируемого срока службы: ISO 15686-8:2008. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2013. 59 с.
19. Болотин, В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. М.: Стройиздат, 1982. 352 с.
20. Колотилкин, Б. М. Надежность функционирования жилых зданий / Б. М. Колотилкин. М.: Стройиздат, 1989. 374 с.
21. Цементы. Общие технические условия: ГОСТ 30515–97. Минск: Минстройархитектуры, 1999. 47 с.
22. Цементы общестроительные. Технические условия: ГОСТ 31108–2003. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 42 с.
23. Structures. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2003. 17 (in Russian).
24. ТКР 45-1.04-119–2008 (02250). *Buildings and Structures. Evaluation of Dilapidation Rate*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2009. 44 (in Russian).
25. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2013) Method for Probabilistic Assessment of Dilapidation in Building Elements. Eurasian Patent No 018263 (in Russian).
26. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2013) Method for Probabilistic Assessment of Dilapidation in Elastic-Plastic Element of Building. Eurasian Patent No 19268 (in Russian).
27. Osipov S. N., Pozdnyakov D. A. (2015) On Assessment of Physical Wear in Elements of Technical Devices. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (2), 23–30 (in Russian).
28. Osipov S. N., Pozdnyakov D. A. (2015) On Assessment of Dilapidation in Elasto-Plastic Elements of Buildings. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (6), 30–36 (in Russian).
29. BCH 53–86 (p) [Departmental Building Codes]. *Rules for Assessment of Dilapidation in Residential Buildings*. Moscow, Gosgrazhdanstroy Publ., 1988. 72 (in Russian).
30. Matveev E. P. (1999) *Reconstruction of Residential Buildings. Part 1. Theory, Methods and Technologies for Reconstruction of Residential Buildings*. Moscow, State Unitary Enterprise – Centre for Project Designs. 367 (in Russian).
31. Pilipenko V. M. (2007) *Complex Reconstruction of Industrial Residential Development*. Minsk, Adukatsiya i Vychavanne Publ. 280 (in Russian).
32. Yanko Ya. (1961) *Mathematical and Statistical Tables*. Moscow, Gosstatizdat Publ. 244 (in Russian).
33. Shor Ya. B. (1962) *Statistical Methods for Analysis and Control of Quality and Reliability*. Moscow, Sovetskoye Radio Publ. 547 (in Russian).
34. Gertsbach I. B., Kordonsky Kh. B. (1966) *Models of Failure*. Moscow, Sovetskoye Radio Publ. 160 (in Russian).
35. Dolinskaya M. G. (1980) *Development and Standardization of Methods for Standardization of Technological Runthrough of Industrial Products*. Moscow, All-Russian Scientific-Research Institute of Certification. 180 (in Russian).
36. Leonovich S. N. (1999) *Cracking Resistance and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Elements*. Minsk, Tydzень Publ. 266 (in Russian).
37. Dolinskaya M. G., Taran V. A. (1985) *Technological Tests of Industrial Products*. Moscow, Standarty Publ. 104 (in Russian).
38. ISO 15686-8:2008. *Buildings and Real Estate. Planning of Service Life Period. Part 8. Reference Service Life Period of Buildings and Assessment of Planned Service Life Period*. Minsk: Stroytekhnorm Publ., 2013. 59 (in Russian).
39. Bolotin V. V. (1982) *Methods for Theory of Probability and Reliability Theory While Making Calculation for Structures*. Moscow, Stroyizdat Publ. 352 (in Russian).
40. Kolotilkin B. M. (1989) *Reliability in Performance of Residential Buildings*. Moscow, Stroyizdat Publ. 374 (in Russian).
41. State Standard 30515–97. *Cement. General Technical Specifications*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 1999. 47 (in Russian).
42. State Standard 31108–2003. *Standard Cement. Technical Specifications*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2005. 42 (in Russian).

Поступила 20.01.2016  
Подписана в печать 28.03.2016  
Опубликована онлайн 28.03.2017

## REFERENCES

1. BCH 58–88 (p) [Departmental Building Codes]. *Regulations for Organization and Execution of Reconstruction, Repair and Technical Maintenance of Buildings, Communal Socio-Cultural Facilities*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990. 32 (in Russian)
2. СНБ 1.04.01–04 [Building Code]. *Buildings and Structures. Fundamental Requirements for Technical Condition and Maintenance of Construction Structures and Engineering Systems, Evaluation of their Operational Serviceability*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2004. 20 (in Russian).
3. СНБ 1.04.01–02. [Building Code]. *Repair, Reconstruction and Restoration of Residential and Public Buildings and*

Received: 20.01.2016  
Accepted: 28.03.2016  
Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-137-143

УДК 059.69.7

## Временное усиление конструкций при реконструкции зданий

Канд. техн. наук, доц. А. П. Броневицкий<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Киевский национальный университет строительства и архитектуры (Киев, Украина)© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Освещены особенности производства строительных работ при реконструкции зданий. Для наглядности проанализирован практический опыт выполнения работ по замене несущих конструкций. Акцентируется внимание на особенностях принятия организационно-технологических решений в связи с устройством конструкций временного усиления. Это вызвано необходимостью обеспечения пространственной жесткости и устойчивости примыкающих и существующих строительных конструкций здания. Иными словами, на период замены отдельных строительных конструкций примыкающие остаются без связей, обеспечивающих устойчивость отдельных конструктивов и здания в целом. Такая ситуация может привести к деформациям конструкций или их обрушению. Поэтому работы должны выполняться последовательными захватками, которые обеспечивают неизменяемость примыкающих конструкций. Представлены примеры практического решения замены несущих конструкций перекрытий и участка наружной несущей стены одного из зданий в условиях стесненности. В процессе замены междуэтажного перекрытия выполнены работы по временному усилению железобетонных колонн. Для этого были использованы распорные стальные балки, обеспечивающие устойчивость колонн в плоскости. При частичной разборке стены применен вариант устройства временной вертикальной несущей конструкции в виде портала. Данная конструкция воспринимала нагрузки от перекрытия до полной перекладки участка несущей стены и обустройства иных конструкций согласно проектным решениям. Представленные организационно-технологические решения будут полезны строителям и проектировщикам при разработке проектно-технологической документации реконструкции зданий.

**Ключевые слова:** реконструкция, замена несущих конструкций, усиление конструкций, стесненные условия реконструкции

**Для цитирования:** Броневицкий, А. П. Временное усиление конструкций при реконструкции зданий / А. П. Броневицкий // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 137–143. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-137-143

## Temporary Reinforcement of Structures for Building Reconstruction

А. P. Bronevizky<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

**Abstract.** The paper reports on peculiar features pertaining to execution of construction works during reconstruction of buildings. Practical experience on replacement of load-bearing structures has been analyzed for illustrative purposes. Attention has been concentrated on peculiarities in respect of organizational and technological solutions resulting from installation of temporary reinforcement structures. This is due to the fact that it is necessary to ensure spatial rigidity and stability of adjacent and existing construction structures of the building. In other words, when certain construction structures are replaced for some period of time the adjacent structures are without any support that ensure position stability for individual structural elements and building as a whole. Such a situation may lead to deformation of structures or their failure. In this regard, works must be performed in accordance with work zones that ensure stability in the adjacent structures. The paper presents examples

### Адрес для переписки

Броневицкий Андрей Петрович  
Киевский национальный университет  
строительства и архитектуры  
просп. Воздухофлотский, 31,  
03680, г. Киев, Украина  
Тел.: 8 097 397-30-45  
savyovsky@ukr.net

### Address for correspondence

Bronevizky Andrey P.  
Kyiv National University  
of Construction and Architecture  
31 Vozdukhoflotsky Ave.,  
03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: 8 097 397-30-45  
savyovsky@ukr.net

of practical solutions concerning replacement of load-bearing floor structures and outer portion of a bearing wall in one of the buildings under constraint conditions. In this context when replacing intermediate floor works have been carried to strengthen temporarily reinforced concrete columns. Spacer steel beams providing column stability from plane have been used for this purpose. While making partial dismantling of the wall a variant presupposing installation of temporary vertical bearing structure in the form of a portal has been used in the paper. The given structure has been bearing loads from floor slab up to completion of re-bricking of bearing wall portion and arrangement of other structures in accordance with design solutions. The presented organizational and technological solutions will be useful for builders and designers while making development of design and technological documentation for reconstruction of buildings.

**Keywords:** reconstruction, replacement of bearing structures, reinforcement of structures, constraint reconstruction conditions

**For citation:** Bronevizky A. P. (2017) Temporary Reinforcement of Structures for Building Reconstruction. *Science and Technique*. 16 (2), 137–143. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-137-143 (in Russian)

## Введение

Одна из главных особенностей реконструкции зданий – индивидуальность практически всех объектов. Исключения представляют лишь здания, построенные по типовым сериям массовой застройки советского периода. Однако здания этого периода застройки реконструируются пока в весьма ограниченных объемах. Объекты, которые подлежат реконструкции, имеют свои индивидуальные как эксплуатационные показатели, так и различные степени физического и морального износа. Техническое состояние строительных конструкций зачастую определяет организационно-технологическую схему производства строительных работ. Ветхость отдельных конструкций ограничивает крупнообъемные работы и использование производительной техники. Замена изношенных или недостаточно прочных отдельных элементов может привести к повреждениям и деформациям примыкающих конструкций. Поэтому в практике реконструкции часто выполняется комплекс работ по предварительному, временному усилению конструкций на период замены примыкающих.

В связи с этим перед началом работ по реконструкции объекта следует провести тщательную организационно-техническую подготовку на основе результатов технической диагностики строительных конструкций здания и предполагаемых проектных изменений. Исследованиям данного вопроса посвящены труды ряда ученых, таких как Д. Ф. Гончаренко, В. В. Савйовский, Ю. И. Беляков, С. Н. Леонович, В. Н. Черноиван и многих других [1–10]. Однако особенностям временного усиления конструкций внимания уделяется недостаточно. Поэтому цель исследований автора статьи – выявление и анализ особенностей выполнения

работ по временному усилению конструкций при реконструкции зданий. Наиболее целесообразно это осуществлять на анализе практических примеров реконструкции.

## Практические примеры реконструкции

Частичная замена несущих конструкций зданий – специфический строительный процесс, включающий разборку «старых» конструкций и устройство «новых». Специфика заключается в том, что «выключение» из совместной работы всего остова здания одной из составляющих несущей конструкции в процессе ее замены может привести к потере устойчивости остальных примыкающих к ней элементов. В некоторых случаях замене подлежат сразу несколько конструктивных элементов, что, в свою очередь, усложняет процесс безопасной и рациональной реконструкции объекта. Например, замена горизонтальных конструкций (плит перекрытий) в период разборки может поставить под вопрос устойчивость и геометрическую неизменяемость вертикальных конструкций колонн или стен реконструируемого здания, а замена несущих вертикальных конструкций (несущих стен, колонн) вызвать деформацию горизонтальных конструкций и, возможно, их полное обрушение. Чтобы избежать негативных последствий, необходимо принять комплекс мер, направленных на временное усиление конструкций зданий при частичной замене отдельных элементов.

Процессу замены несущих конструкций предшествует комплекс проектных работ, включающий в себя:

- разработку конструктивных решений, позволяющих сохранить несущую способность вертикальных и горизонтальных несущих кон-

струкций, их устойчивость и геометрическую неизменяемость;

- определение эффективных организационно-технологических решений по демонтажу (разборке) существующих несущих конструкций и возведению новых с учетом временного усиления существующих элементов.

Анализ выполнения работ на одном из объектов в городе Киеве позволил выявить ряд особенностей, которые существенно влияют как на технологический процесс, так и на его технико-экономические показатели. Рассмотрим пример реконструкции трехэтажного здания со сложной формой и размерами в плане 29,3×22,5 м. Время постройки – ориентировочно начало XIX в. В последующие годы здание уже несколько раз подвергалось реконструкции, включающей пристройку части из монолитного железобетона. Конструктивная схема здания – неполный каркас. Несущие конструкции каркаса выполнены из монолитных железобетонных колонн и плит перекрытия. Колонны монолитные круглого и прямоугольного сечения, которые опираются на свайные фундаменты и подпорные стены. Конструктивная жесткость здания и геометрическая неизменяемость конструкций достигаются путем совместной работы наружных несущих кирпичных стен, монолитных железобетонных колонн и горизонтальных дисков жесткости перекрытия.

В соответствии с проектными решениями основные архитектурно-планировочные изменения включали в себя:

- устройство нового монолитного междуэтажного перекрытия (на других высотных отметках) с разборкой старого;
- разборку части несущей кирпичной стены фасада с последующим возведением монолитной железобетонной рамы входной группы.

Учитывая сложную конструктивную схему здания (неполный каркас), возникли опасения разборки перекрытия из-за предполагаемой потери устойчивости колонн, в свою очередь, разборка кирпичной стены исключала возможность опирания на нее перекрытий. Для решения этой проблемы было предложено обеспечить пространственную жесткость здания путем установки металлической конструкции

временного крепления колонн, а также временного крепления незаменяемой части междуэтажного перекрытия. Металлические конструкции колонн позволили раскрепить взамен разобранных перекрытия существующие колонны, уменьшив расчетную длину и увеличив устойчивость. Разработанные организационно-технологические решения были отображены в технологических картах в составе проекта производства работ (ППР) [8, 11, 12].

До начала основных строительных процессов выполнили подготовительные работы: создали безопасные условия выполнения работ (ограждение территории, установка указателей опасной зоны, ограждение проемов, выявление и отключение инженерных сетей); строительную площадку обеспечили средствами пожаротушения; установили грузоподъемный механизм для транспортировки продуктов разборки и строительного мусора; оборудовали участок транспортировки продуктов разборки и подачи строительных материалов; выполнили разметку участков (захваток) перекрытия, которое разбирается.

С целью обеспечения безопасности выполнения работ заменяемое междуэтажное перекрытие этажа здания условно разбили на пять захваток (рис. 1). Работы на захватках выполняли последовательными потоками, что включало несколько технологических процессов:

- установку временных металлических креплений (распорок), обеспечивающих неизменяемость (устойчивость) конструкций стен и колонн (рис. 2);
- разборку участка существующего перекрытия на захватке;
- устройство опорных узлов из арматурных элементов на химических анкерах, опорных элементов под балки.

Особое внимание уделяли технологической последовательности выполнения работ, чтобы избежать повреждений других конструкций при разборке междуэтажного перекрытия, а также повреждений существующих элементов от падения продуктов разборки. Продукты разборки упаковывали и подавали мешками с помощью электрического тельфера (кран «в окно»).

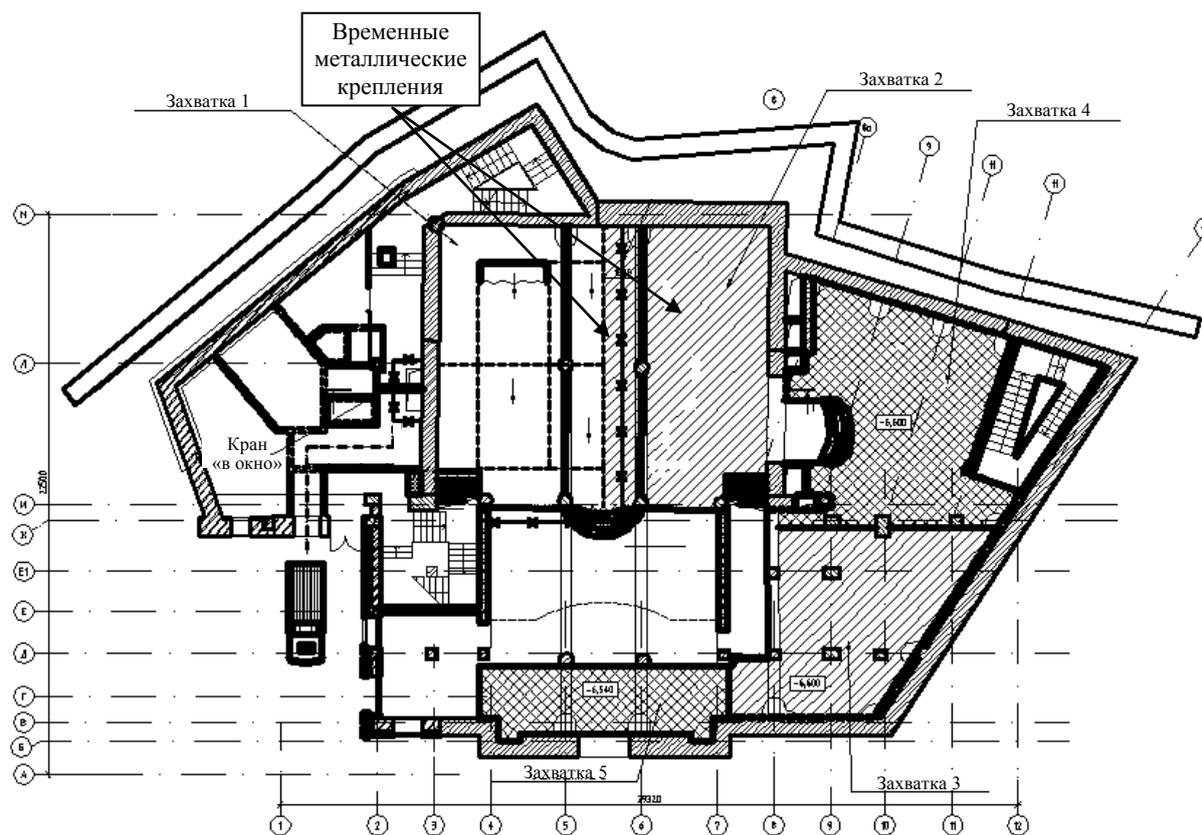


Рис. 1. Схема выполнения работ по разборке междуэтажного монолитного перекрытия с установкой временных элементов усиления

Fig. 1. Diagram on execution of works for demolition of intermediate in-situ floor while installing temporary supporting structures



Рис. 2. Замена конструкций перекрытия после установки временных опор усиления

Fig. 2. Replacement of floor structure after installation of temporary supporting structures

После завершения работ по устройству монолитного железобетонного перекрытия временные конструкции усиления были разобраны. Выполнение указанных работ с помощью разработанного организационно-технологического и конструктивного вариантов позволило вести работы безопасно и планомерно. В процессе частичной разборки несущей стены, которая удерживала часть перекрытия, пришлось устанавливать вертикальную временную конструкцию усиления. Принятое решение дало возможность удержания плиты перекрытия на период разборки и возведения участка наружной кирпичной стены фасада и монолитной железобетонной рамы входной группы.

Аналогично предыдущему примеру в первую очередь были выполнены подготовительные работы. Организационно-технологические решения включали в себя следующие строительные процессы:

- разметку опорных узлов для установки металлоконструкций временного усиления (МКВУ) в местах расположения нижних (отм.  $-7.000$ ) и верхних (отм.  $+0.630$ ) опорных узлов; разметка мест установки (отм.  $-3.200$ ) раскрепляющих распорок;

- обустройство нижнего и верхнего опорных узлов для опирания МКВУ (рис. 3);

- укрупнительную сборку металлических стоек, распорок, крестовых связей, входящих в состав МКВУ (траекторию поворота стоек конструкции регулировали оттяжками с целью беспрепятственной установки);

- установку стоек МКВУ в проектное положение (методом «поворота») и закрепление их в нижнем, а затем в верхнем опорном узле монтажным болтом;

- установку вертикальных и горизонтальных крестовых связей;

- включение в работу установленных элементов МКВУ путем подклинивания;

- разборку монолитного перекрытия (отм.  $-6.540$ ).

После выполнения комплекса работ по устройству МКВУ и разборке монолитного перекрытия (отм.  $-6.540$ ) приступили к разборке несущей кирпичной стены фасада с последующим устройством монолитной железобетонной рамы входной группы. Процесс выполнения работ представлен на рис. 4.

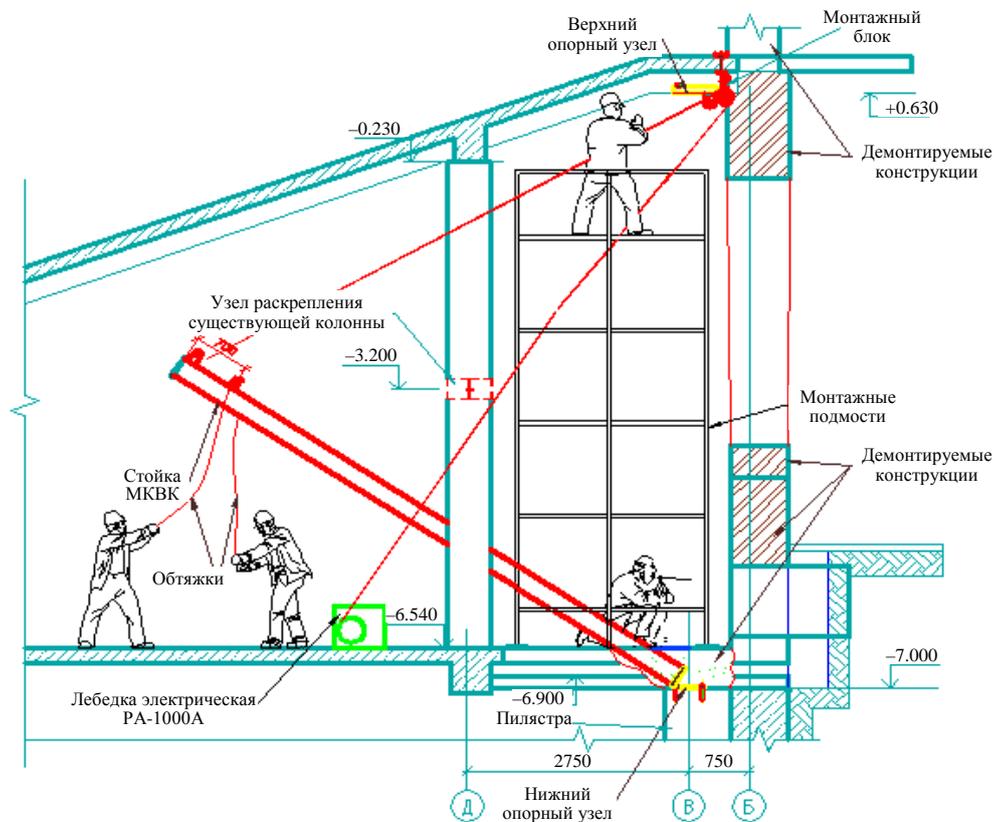


Рис. 3. Схема выполнения работ по установке стоек металлической конструкции временного усиления

Fig. 3. Diagram on execution of works for installation of posts for temporary metal supporting structure



Рис. 4. Устройство металлической конструкции временного усиления перекрытия

Fig. 4. Design of metal structure for temporary flooring support

## ВЫВОДЫ

1. Анализ практического опыта выполнения работ по замене несущих конструкций реконструируемого здания с предварительным временным усилением существующих строительных элементов показывает, что:

- замена несущих конструкций является сложным организационно-технологическим процессом, требующим тщательной подготовки и расчетной проверки принимаемых решений;

- строительные процессы должны быть запроектированы с учетом не только безопасной технологии ведения работ, но и обеспечения прочности и устойчивости разбираемых и существующих строительных конструкций здания;

- технологическое проектирование производства строительных работ при реконструкции зданий требует совместной работы специалистов, принимающих как архитектурно-конструктивные, так и организационно-технологические решения.

2. Представленный опыт будет полезен при разработке организационно-технологических подходов и непосредственном производстве строительных работ по замене несущих конструкций в стесненных условиях, с обязательным учетом фактических условий выполнения работ и принимаемых архитектурно-конструктивных решений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шагин, А. Л. Реконструкция зданий и сооружений / А. Л. Шагин, Ю. В. Бондаренко Д. Ф. Гончаренко. М.: Высш. шк., 1991. 352 с.
2. Шрейбер, К. А. Вариантное проектирование при реконструкции жилых зданий / А. К. Шрейбер. М.: Стройиздат, 1990. 287 с.
3. Савйовский, В. В. Возведение и реконструкция сооружений / В. В. Савйовский. Киев: Лира-К, 2015. 267 с.
4. Савйовский, В. В. Техническая диагностика строительных конструкций зданий / В. В. Савйовский. Харьков: Изд-во «ФОРТ», 2008. 552 с.
5. Соловей, Д. А. Особенности монтажа металлических конструкций каркаса здания в стесненных условиях / Д. А. Соловей, А. П. Броневицкий // Містобудування та територіальне планування. Киев: КНУБА, 2015. Вип. 55. С. 386–391.
6. Савйовский В. Влияние технического состояния строительных конструкций на технико-экономические показатели реконструкции / В. Савйовский, А. Броневицкий, А. Савйовский // Вестник инженерной академии Украины. 2008. Вып. 1. С. 21–22.
7. Черноиван, В. Н. Проект производства работ на демонтаж цеха по производству извести ОАО «Березовский КСИ» / В. Н. Черноиван. Брест: БрГТУ, 2013. 117 с.
8. Савйовский, В. Усиление фундаментов при реконструкции здания / В. Савйовский, А. Савйовский // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture: Polish Academy of Sciences. Lublin, 2013. Vol. 15, No 6. P. 59–66.
9. Беляков, Ю. И. Строительные работы при реконструкции предприятий / Ю. И. Беляков, А. В. Резуник, Н. М. Федосенко. М.: Стройиздат, 1986. 224 с.
10. Леонович, С. Н. Технология реконструкции зданий и сооружений: пособие / С. Н. Леонович, Н. Л. Полей-

ко, Д. Ю. Снежков. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2015. 123 с.

11. ППР на реконструкцію здания в г. Києве... : матеріали ООО «Европейские технологии в строительстве». Київ, 2015.
12. Броневицький, А. П. Прогнозування параметрів ефективності будівельних процесів ревіталізації промислових будівель / А. П. Броневицький, Н. В. Гречко // Науковий вісник будівництва. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2015. Вип. 4 (82). С. 76–81.

Поступила 29.09.2016

Подписана в печать 05.12.2016

Опубликована онлайн 28.03.2017

#### REFERENCES

1. Shagin A. L., Bondarenko Yu. V., Goncharenko D. F. (1991) *Reconstruction of Buildings and Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 352 (in Russian).
2. Shreyber K. A. (1990) *Trial Design for Reconstruction of Residential Buildings*. Moscow, Stroyizdat Publ. 287 (in Russian).
3. Savyovsky V. V. (2015) *Building and Reconstruction of Structures*. Kiev, Lira-K Publ. 267 (in Russian).
4. Savyovsky V. V. (2008) *Technical Diagnostics of Construction Structures in Buildings*. Kharkov, FORT Publ. 552 (in Russian).
5. Solovey D. A., Bronevitsky A. P. (2015) Peculiar Features in Erection of Metallic Structures for Building Frame Installation in Confined Spaces. *Mistobuduvannya ta Teritorialne Planuvannya* [Urban Development and Territory Planning]. Kiev, Kyiv National University of Construction and Architecture, (55), 386–391 (in Russian).
6. Savyovsky V., Bronevitsky A., Savyovsky A. (2008) Influence of Technical State of Construction Structures on Technical and Economical Indices of Reconstruction. *Vestnik Inzhenernoi Akademii Ukrainy* [Bulletin of Engineering Academy of Ukraine], (1), 21–22 (in Russian).
7. Tchernov Ivan V. N. (2013) Project for Execution of Works Pertaining to Demolition of Shop for Lime Production at OJSC “Berezovsky KSI”. Brest, Brest State Technical University. 117 (in Russian).
8. Savyovsky V., Savyovsky A. (2013) Foundation Underpinning During Building Reconstruction. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture: Polish Academy of Sciences*. Lublin, 15 (6), 59–66 (in Russian).
9. Belyakov Yu. I. Rezunik A. V., Fedosenko N. M. (1986) *Construction Works During Reconstruction of Enterprises*. Moscow, Stroyizdat Publ. 224 (in Russian).
10. Leonovich S. N., Poleyko N. L., Snezhkov D. Yu. (2015) *Technology for Reconstruction of Buildings and Structures*. Minsk, Novoe Znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ. 123 (in Russian).
11. “Working Plan for Reconstruction of Building in Kiev...” (Proceedings of LLC “European Technologies in Construction”). Kiev, 2015.
12. Bronevitsky A. P., Grechko N. V. (2015) Forecasting of Efficiency Parameters for Construction Revitalization Processes of Industrial Buildings. *Naukoviy Visnik Budivnitstva* [Scientific Bulletin of Construction]. Kharkov, Kharkov University of Civil Engineering and Architecture, 4 (82), 76–81.

Received: 29.09.2016

Accepted: 05.12.2016

Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-144-152

УДК 625.768.6

## Физико-химические основы процессов защиты поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий пропиточными составами

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Перспективность строительства дорожных бетонных покрытий, начатого в 30-е гг. прошлого века в США, подтверждена долговечностью их эксплуатации. Вместе с тем исследования показывают, что бетонные покрытия по ряду причин склонны к деформации, а это вызывает трудности при ремонте. Особенно интенсивно деформации проявляются после пяти–десяти лет эксплуатации дорог. Практически неизбежны такие явления, как образование микротрещин, шелушение, деформации при промерзании угловых граней бетонных плит, разрушение деформационных швов и т. д. Эти дефекты характеризуются значительным объемом и присутствуют на всех без исключения дорогах. Следует отметить, что многих из перечисленных недостатков можно избежать при условии принятия своевременных мер по упрочнению поверхностного слоя бетонного покрытия методом пропитки составами, содержащими гидрофобизатор и золь кремнезема. В качестве гидрофобизатора использовали выпускаемые промышленностью метилсиликонат калия, олигометилгидридсиликонат, ТЭОС, которые создают на поверхности пор бетона труднорастворимую пленку, препятствующую проникновению воды в бетон. Образующийся в процессе растворения и гидролиза минералов цементного клинкера гидроксид кальция связывается в гидросиликаты содержащимся в пропитанном растворе золем кремнезема. Эти гидросиликаты кальматируют поры бетона и упрочняют его поверхностный слой за счет дополнительной твердой фазы, по химическому составу родственной гидросиликатам кальция, образующимся при твердении цемента.

**Ключевые слова:** поровая структура бетона, проницаемость бетона, пропиточные составы, гидрофобизаторы, нанокремнезем

**Для цитирования:** Пшембаев, М. К. Физико-химические основы процессов защиты поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий пропиточными составами / М. К. Пшембаев // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 144–152. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-144-152

## Physical and Chemical Fundamentals of Protection Processes for Surface Layer of Concrete Road Paving by Impregnating Compositions

М. К. Pshembayev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Construction of concrete road paving which was started in the 30-ies of the last century in the United States has proved its perspectiveness from the viewpoint of service life. In addition to that an analysis of road usage has shown that concrete paving is a deformation tendency due to some reasons and the tendency entails some difficulties in their repair after rather long operation. The deformations appear more intensively after 5-10-year road operational period. The following negative effects are practically unavoidable: micro-crack formation, scaling, deformation due to freezing of angular edges in concrete plates, destruction of deformation joints etc. The defects are characterized by rather large scope and they are present practically on all the roads. It is necessary to note the fact that a great number of the above-mentioned defects can be avoided on the condition that measures on strengthening surface layer of concrete paving will be undertaken in time. The measures presuppose application of impregnating method while using compositions that contain hydrophobisator and silicon dioxide sol.

---

### Адрес для переписки

Пшембаев Мереке Кудайбергенович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-97-28  
ftk75@bntu.by

### Address for correspondence

Pshembayev Mereke K.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-97-28  
ftk75@bntu.by

Industry-produced potassium methyl silicate, oligomethyl hydride silicate, tetraethoxysilane have been used as hydrophobisator and they form not easily soluble film on the surface of concrete pores which prevents penetration of water into concrete. Calcium hydrate being formed in the dissolution and hydrolysis process of cement clinker minerals is bound in hydrosilicates which are contained in the solution impregnated by silicon dioxide sol. These hydrosilicates culminate concrete pores and strengthen its surface layer due to additional hard phase and according to chemical composition it is related to calcium hydrosilicates formed as a result of concrete hardening.

**Keywords:** porous structure of concrete, concrete permeability, impregnating compositions, hydrophobisators, nanosilica

**For citation:** Pshembayev M. K. (2017) Physical and Chemical Fundamentals of Protection Processes for Surface Layer of Concrete Road Paving by Impregnating Compositions. *Science and Technique*. 16 (2), 144–152. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-144-152 (in Russian)

## Введение

Известно, что вода агрессивно влияет на все строительные материалы. Однако вопросы защиты бетонных покрытий от агрессивного действия воды до конца не решены, хотя на рынке появилось огромное количество материалов, посвященных данной проблеме.

Основные характеристики дорожного бетона как пористого строительного материала – относительно высокое водопоглощение и значительный капиллярный подсос воды в условиях поверхностного смачивания дороги. Вода, проникающая в дорожный бетон, снижает его прочностные свойства, поскольку нарушается однородность структуры бетона. Особенно резко падает прочность при циклическом замораживании и оттаивании бетона. Дополнительное снижение прочности наблюдается при кристаллизации в бетоне солей, содержащихся в воде. Все это неизбежно ведет к ускоренному разрушению бетонных покрытий автомобильных дорог.

Повысить прочностные характеристики дорожного бетона можно, используя метод пропитки его поверхностного слоя различными составами. Для рационального применения пропиток необходимо знать поровую структуру бетона. Кроме того, нужно провести анализ различных технологий пропитки. Следует также изучить процесс сушки бетона, поскольку перед пропиткой необходимо освободить поры от находящейся в них влаги.

## Поровая структура бетона

Поровая структура бетона зависит от свойств исходных материалов, технологии изготовления, а его проницаемость определяется не только размерами пор и капилляров, но и условиями эксплуатации. Из многочисленных классификаций структур бетона, предложенных в [1–5], наиболее общей является классификация, выделяющая три основных типа структу-

ры: микроструктуру – структуру цементного камня, мезоструктуру – структуру цементно-песчаного раствора в бетоне, макроструктуру – двухкомпонентную систему (раствор и крупный заполнитель) [5].

Для каждой из перечисленных структур характерны свои особенности, связанные с условиями их образования. Так, микроструктура цементного камня в первом приближении может быть охарактеризована такими структурными составляющими, как кристаллический сросток, тоберморитовый гель, не до конца гидратированные зерна цемента и поровое пространство. Наиболее важными технологическими факторами, влияющими на формирование микроструктуры цементного камня, являются химико-минералогический состав цемента, тонкость его помола, водоцементное отношение и условия твердения. В зависимости от соотношения этих факторов формируется конкретная микроструктура цементного камня, характеризуемая совершенно определенными физико-химическими свойствами [6].

Для мезоструктуры цементно-песчаного раствора кроме перечисленных факторов, определяющих микроструктуру цементного камня, важными управляемыми факторами являются состав раствора, гранулометрический и минералогический составы песка, форма его зерен, характер поверхности частиц и их загрязненность. Соотношения характеристик цементного камня и песка определяют свойства цементно-песчаного раствора. При этом в большинстве случаев влияние отдельных показателей составляющих раствор компонентов – неаддитивное, т. е. изменение определенных свойств компонентов раствора не ведет к пропорциональному изменению соответствующих характеристик раствора в целом как материала. Мезоструктуру цементно-песчаного раствора можно рассматривать и как конгломератную структуру, в которой матрицей является цементный камень. Такая модель, очевидно,

наиболее общая для подобных двухкомпонентных систем, однако теория данных структур разработана еще недостаточно полно и использовать ее в практике для получения материалов с заданными свойствами пока не представляется возможным [6].

Макроструктура бетона имеет много общего с мезоструктурой, так как в этом случае в качестве матрицы может быть рассмотрен цементно-песчаный раствор, в котором распределен крупный заполнитель. Для конгломератных мезо- и макроструктур кроме свойств матрицы и самого заполнителя (мелкого или крупного) большое значение имеет и его распределение.

Одна из важнейших характеристик структуры бетона – параметры его порового пространства. Это связано с тем, что цементный камень, соответственно раствор и бетон, по своей природе капиллярно-пористые материалы.

Система макрокапилляров цементных композитов непрерывна и является межкристаллитным образованием в структуре цементного камня. Фактическое строение макрокапилляров четное цилиндрическое, расчетное строение цилиндрическое с приведенным гидравлическим радиусом. Образование макрокапилляров обусловлено топологическими особенностями формирования гидратной структуры цементного камня:

- кристаллизацией гидратных новообразований вблизи поверхности цементного зерна с созданием микроскопических кластерных образований с упорядоченной структурой и неплотной упаковкой;

- наличием свободной влаги, защемленной между кристаллитными образованиями, не участвующей в гидратации цемента и разуплотняющей упаковку макрокапиллярных гидратных образований;

- неплотностью гидратных микроскопических кластерных образований, которые являются субмикроструктурной фазой, содержащей микрокапиллярную и гелевую пористость, способную адсорбировать или физико-химически связывать свободную влагу [7].

Макрокапилляры обладают одним размерным порядком с кластерными гидратными образованиями цементного камня. Формирование структуры цементного камня в виде кластерных скоплений связано с накоплением продуктов гидратации в виде значительных субмикроструктурных образований размером более

10 мкм. Кристаллизация таких скоплений происходит во времени с поверхности вглубь с длительным сохранением определенного количества незакристаллизованной фазы. С этих позиций микропоры являются внутрикластерным образованием. Фактическое и расчетное строение субмикроструктурных образований – сферолиты с приведенным радиусом. На этом основании предложена сферолитно-решеточная расчетная модель структуры цементного камня [7]. Снижение влагопереноса по макрокапиллярам под действием капиллярных сил или гидростатического давления при уплотнении гидратной структуры связано с повышением вязкости воды в пристеночных слоях при уменьшении гидравлического радиуса макрокапилляров и, как следствие, с увеличением силы трения о стенки капилляров.

Известно, что даже незначительное по объему количество пустот в материалах приводит к резкому изменению их свойств. В то же время объем пор в пропаренном цементном камне колеблется (в зависимости от водоцементного отношения, возраста и других факторов) в среднем от 15 до 50 %. Объем пор в растворах и бетонах, у которых весь объем пустот между зернами заполнен цементным камнем, конечно, меньше (он примерно пропорционален объему цементного камня в этих материалах), но все же достаточно велик. Поэтому все важные для практики свойства бетона в той или иной степени зависят от объема и характера структуры его порового пространства [5].

Образование основного объема пор в бетоне связано в основном с избыточным количеством воды, которое вводится в бетонную смесь для придания ей необходимой подвижности. Объем такой воды зависит от водоцементного отношения, содержания воды и цемента, степени гидратации цемента и других факторов. В пределах колебаний расхода воды от 160 до 240 л/м<sup>3</sup> и цемента от 300 до 600 кг/м<sup>3</sup> объем свободной воды в затвердевшем бетоне в среднем составляет 5–20 % от его общего объема. Поры образуют в цементном камне и бетоне систему сообщающихся капилляров, поэтому их часто называют капиллярными. Размер капиллярных пор колеблется от 0,1–1,0 до 20,0–50,0 мкм и более. В отличие от пор цементного геля, которые характеризуются непрерывностью, капиллярные поры могут иметь прерывистую структуру,

что положительно влияет на снижение проницаемости бетона и повышение его долговечности [6].

В зависимости от условий твердения бетона гелевые, контракционные и капиллярные поры могут быть заполнены либо водой, либо воздухом. Образование в бетоне воздушных пор может быть вызвано несколькими причинами. Так, в бетонной смеси всегда содержится некоторое количество воздуха, который вначале был адсорбирован на поверхности зерен цемента и заполнителей и при перемешивании не был удален вследствие неполного смачивания поверхности зерен, либо при введении специальных (воздухововлекающих) добавок. Эти воздушные поры обычно имеют сферическую форму и размеры 25–500 мкм и более. Объем воздушных пор редко превышает 5 % от объема бетона. Кроме того, в бетонных смесях (особенно жестких) при их уплотнении возможно защемление дополнительного количества воздуха, распределенного в бетоне случайно, поэтому такие пустоты снижают однородность материала и ухудшают его свойства [6].

В результате различных деструктивных процессов возможны разрыхление структуры бетона и образование дополнительного порового пространства, которое обычно заполняется воздухом. К дефектам структуры бетона относятся также седиментационные поры, образуемые в результате наружного и внутреннего водоотделения. При наружном водоотделении часть воды затвердения, обтекая крупный заполнитель, выходит наверх, образуя систему направленных, сообщающихся капиллярных пор. Другая часть воды скапливается под крупным заполнителем, насыщая зоны контакта (внутреннее водоотделение). Седиментационные поры имеют размер 50–100 мкм. Установлено, что чем тоньше прослойка раствора вокруг крупного заполнителя, тем меньше наружное и больше внутреннее водоотделение в бетоне. Согласно [8], седиментационные полости – основные пути проникновения в бетон воды, поскольку в отличие от капилляров в седиментационных порах размером более 50 мкм вода находится в свободном состоянии и может перемещаться под действием силы тяжести или незначительного гидростатического давления. Поэтому седиментационные поры часто играют в бетоне решающую роль в процессах фильтрации, оказывают большое влияние на долговеч-

ность материала и изготовленных из него конструкций.

Кроме указанных выше, возможно появление в бетоне и других дефектов в период его эксплуатации. К ним относятся усадочные, температурные и другие трещины, поры выщелачивания, дефекты, появляющиеся в результате коррозионного воздействия среды, и т. д. Необходимо отметить также, что параметры поровой структуры цементного камня и бетона постоянно изменяются во времени. В частности, по мере гидратации капиллярные поры постепенно замещаются новообразованиями, что ведет к увеличению объема гелевых пор за счет снижения объема капиллярных. При этом уменьшается как общий суммарный объем порового пространства, так и средний размер пор. Одновременно в цементном камне происходит и противоположное действие – процесс «старения», который может вести к увеличению относительного количества крупных капилляров цементного камня.

По форме и взаимному расположению поры и капилляры цементного камня и бетона классифицируют на несколько групп [5]:

- по форме поперечного сечения – ровные трубчатые, бутылкообразные, клиновидные, щелевые и их комбинации;
- по протяженности – прямые, извилистые, петлеобразные;
- по непрерывности – открытые (каналообразующие), тупиковые (открытые с одной стороны), условно закрытые (капилляры, не выявляемые данным методом определения параметров поровой структуры).

Одной из наиболее важных является также классификация пор цементного камня и бетона по их эффективным радиусам. Хотя в настоящее время и нет общепринятой методики деления пор капиллярно-пористых тел по размерам, все же можно отметить, что наиболее полно этот вопрос разработан школами М. М. Дубинина и А. В. Лыкова [9, 10]. По мнению этих ученых, капиллярными называются поры, для которых капиллярный потенциал больше потенциала поля тяжести. В капиллярных порах поверхность жидкости принимает форму, обусловленную силами поверхностного натяжения, и мало искажается за счет силы тяжести. Капиллярные поры делят на микро- и макрокапилляры. Основным критерий при этом делении – отношение пор к явлению капиллярной

конденсации. В результате адсорбции паров воды из воздуха стенки капилляра покрываются слоем влаги толщиной около 0,1 мкм. Если радиус капилляра меньше данной величины, то такой капилляр может быть полностью заполнен жидкостью в результате сорбции ее паров независимо от того, есть ли у капилляра дно или он сквозной. При радиусе пор более 0,1 мкм мениски не смыкаются, и капиллярная конденсация может происходить только в несквозных капиллярах. Таким образом, микрокапилляры с радиусами, меньшими 0,1 мкм, могут заполняться за счет сорбции паров из окружающей среды и образования пленок на стенках. Макрокапилляры с радиусами, большими 0,1 мкм, могут быть заполнены жидкостью только при непосредственном контакте с ней. Кроме того, особенностью макрокапилляров является то, что они не только не сорбируют влагу из влажного воздуха, а наоборот, отдают первоначально находившуюся в них влагу в атмосферу. Поэтому гигроскопичность бетонов и их равновесная влажность зависят в первую очередь от соотношения в них микро- и макрокапилляров.

Важная закономерность явления капиллярной конденсации состоит в том, что оно качественно не связано со смачиваемостью стенок капилляра, т. е. гидрофобные микрокапилляры могут сорбировать влагу из воздуха, а гидрофильные микрокапилляры – отдавать влагу в насыщенную водяными парами атмосферу. Давление насыщенного пара над вогнутой поверхностью жидкости в капилляре меньше, чем над плоской. Для микрокапилляров с радиусами менее 0,1 мкм давление снижается весьма существенно, в то время как для макрокапилляров снижением давления можно пренебречь. М. М. Дубининым [9] при изучении пор в адсорбентах выявлена группа пор размерами 15–20 Å. Такие поры обнаружены и в цементном камне. Увеличение потенциала адсорбции является причиной объемного заполнения этих пор.

Таким образом, бетон обладает порами самого разного размера – от нескольких десятков ангстрем до долей миллиметра. Важную роль при этом играют структурные составляющие цементного камня. Он состоит из различных твердых фаз, представленных преимущественно субмикрочастицами коллоидной степени дисперсности, способными адсорбционно, осмотически и структурно удерживать (связывать) некоторое количество влаги.

В [11] предлагается дифференцировать в твердеющем цементном камне три основные структурные составляющие:

1) кристаллический сросток, образованный сросшимися друг с другом кристаллами гидроалюминатов кальция, гидроксида кальция, а также гидросульфалюмината и гидросульфогидроксида кальция;

2) тоберморитовый гель, в котором дисперсной фазой являются субмикрочастицы гидросиликатов кальция;

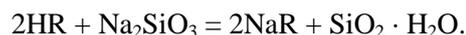
3) не до конца гидратированные зерна цемента.

В тоберморитовом геле дисперсной фазой являются субмикрочастицы гидросиликатов кальция, образующиеся при гидратации силикатных фаз портландцементного клинкера (трехкальциевого и двухкальциевого силикатов). Тоберморитовый гель – основной структурный компонент цементного камня, занимающий примерно 75 % его объема. Наиболее радикальный способ уменьшения количества пор в поверхностном слое бетона – модифицирование этого слоя различными пропиточными составами.

### Пропиточные растворы

Пропиточный раствор для поверхностного слоя бетона получен автором статьи из гидрофобизатора, в качестве которого использовали промышленные формы метилсиликоната калия и гидрозоль  $\text{SiO}_2$ , который получали двумя способами.

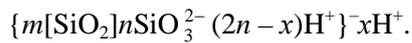
Первый способ [12] заключался в катионировании раствора натриевого жидкого стекла, полученного разбавлением водой исходного промышленного раствора до плотности 1,055 г/см<sup>3</sup>. Для получения золь применяли ионообменную колонку, заполненную катионитовой смолой КУ-2. Ионообменная реакция на катионите описывается уравнением



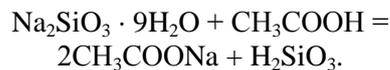
В ходе экспериментов была установлена оптимальная концентрация раствора силиката натрия (6,3–6,5 %). Увеличение данной концентрации раствора  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  более оптимальной приводило к образованию неустойчивого золь кремниевой кислоты и гелеобразованию в катионитовой колонке. При снижении концентрации раствора менее оптимальной происхо-

дило образование разбавленного малотехнологичного золя. При внесении золя как добавки в пропиточный состав использовали золь кремниевой кислоты с плотностью  $1,013 \text{ г/см}^3$  и  $\text{pH} = 4,5-5$ . Полученный золь применяли в количестве 3–5 % от массы пропиточного состава.

Строение мицеллы золя кремниевой кислоты в [12] выражено формулой



Второй способ [13] заключался в использовании метода титрования слаборазбавленного раствора жидкого стекла уксусной кислотой. Полученный золь представлял собой прозрачную со слабой опалесценцией жидкость с плотностью  $1,018 \text{ г/см}^3$  и содержал наночастицы  $\text{SiO}_2$  в количестве 0,23 %. Процесс синтеза описывается уравнением



Формула мицеллы кремнезоля, стабилизированного ацетат-ионом, запишется в виде



Наномодифицирующая добавка золя вводилась в комбинированный пропиточный состав в количестве 10 % (по массе). Составы пропиточных растворов и свойства пропиточного дорожного бетона приведены в табл. 1 [14].

### Механизм гидрофобной защиты

Капиллярный подсос и интенсивность проникновения воды в поры бетона связаны со смачиванием – первой стадией взаимодействия воды с поверхностью бетона. Это явление имеет место при соприкосновении трех фаз – твердого тела, жидкости и газа (воздуха) – с образованием общей линии раздела [15, 16].

Экспериментальные исследования показали, что наибольшим преимуществом обладают растворы, выполненные на основе кремнийорганических соединений [12]. Поверхностная обработка материалов кремнийорганическими соединениями основана на нерастворимости в воде образующихся на поверхности бетона полимерных пленок и на их специфических свойствах. Так, молекула метилсиликоната калия – дифильная. Углеродные радикалы  $\text{CH}_3$ , входящие в состав кремнийорганического соединения, ориентируются в сторону, противоположную поверхности бетона, т. е. в сторону окружающей среды. Кремний кислородные связи  $\text{SiO}$ , наоборот, ориентированы к поверхности бетона. Благодаря такому расположению молекулы гидрофобизатора поверхность бетона оказывается покрытой гидрофобной пленкой. Толщина пленки  $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$  на бетоне достигает  $1,9 \cdot 10^{-5}$  см. Отдельные звенья  $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$  имеют толщину  $6 \cdot 10^{-8}$  см. Следовательно, толщина пленки в этом случае оказывается примерно от 2 до 300 молекул.

Таблица 1

Составы пропиточных растворов и свойства полученного дорожного бетона  
Compositions of impregnating solutions and properties of obtained road concrete

Состав пропиточного раствора	Водопоглощение при капиллярном подсосе, $\text{кг/м}^3$ (СТБ 1263–2001, п. 8.13)	Водопоглощение бетона (ГОСТ 1573.3–78)	Истираемость бетона, $\text{г/см}^2$	Класс бетона по прочности на сжатие (ГОСТ 10181–2012, п. 7.2)	$R_{\text{изг}}$ , МПа	Расход пропиточного раствора, $\text{л/м}^2$
Без пропитки	0,36	1,50	0,133	45,30	8,83	–
ТЭОС:этанол = 1:1	0,24	0,73	0,130	48,00	8,95	0,40–0,50
Софлексил-60:вода = 1:10	0,20	0,86	0,120	50,00	9,41	0,20–0,80
Софлексил-60:вода:золь кремнезема = 1:10:1	0,15	0,62	0,120	51,90	9,55	0,20–0,30
Софлексил-Защита	0,17	0,64	0,080	50,20	9,10	0,30–0,35
Софлексил-Защита:золь кремнезема = 10:1	0,07	0,58	0,073	55,20	9,15	0,30–0,35
Софлексил-Защита:ТЭОС = 10:1	0,07	0,60	0,074	55,30	9,50	0,30–0,35
Обозначения: 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 %, $\text{pH} = 14$ . Софлексил-Защита (ТУ 2229-025-42942526–2001, с изм. 1–7) – раствор олигометилгидридсилоксана в органическом растворителе.						

По данным исследований [17], пленка воды на поверхности бетона при относительной влажности 80 % составляет  $0,4 \cdot 10^{-6}$  см, а при 90 % –  $2,7 \cdot 10^{-6}$  см. Водоотталкивающие кремнийорганические пленки очень тонкие. Толщина пленки вычисляется по расходу раствора к весу материала (принимая плотность, равную единице) и составляет от  $(0,1-3,1) \cdot 10^{-6}$  до  $2,5 \cdot 10^{-5}$  см. Материалы, гидрофобизированные кремнийорганическими соединениями, практически не увеличиваются в весе, полностью сохраняют внешний вид, пористость и воздухопроницаемость, чем выгодно отличаются от других водостойких покрытий или пропиток (табл. 1).

Гидрофобная пленка мало стирается при трении, не смывается водой, не растворяется ни в каких обычных растворителях, устойчива в широком диапазоне температур (от минус 200 до плюс 300 °С), устойчива к действию окислителей, ультрафиолета, времени и других факторов. Гидрофобные свойства пленки сохраняются на весь период ее существования. На пленку химически действуют только щелочи и сильные минеральные кислоты (концентрированные). Гидрофобная пленка разрушается также плавиковой кислотой.

Вместе с тем проведенные испытания в естественных условиях показали, что со временем гидрофилизация поверхности бетона происходит, главным образом, за счет запыления гидрофобной пленки, осаждения на ее поверхности гидрофильных частиц, содержащихся в атмосферных осадках, а также благодаря механическому разрушению поверхностного слоя вследствие интенсивного истирания, воздействия ветра и дождя. Поэтому срок службы гидроизоляционного слоя зависит от глубины заполнения гидрофобным раствором пор и дефектов поверхности. Многолетние исследования зависимости срока службы защитного слоя от его глубины показали, что чем больше глубина проникновения пропитки, тем дольше срок службы гидрофобизации.

Глубина заполнения пористого материала гидрофобным раствором связана с физическими процессами, происходящими внутри капилляров материала. Аналитические исследования заполнения гидрофобным раствором показывают, что глубина проникновения раствора и скорость заполнения капилляров зависят от радиуса капилляров и вязкости гидрофобной жидкости:

$$h_{\max} = \frac{2\sigma \cos \Theta}{R\rho g(1 + K_0 \operatorname{ctg} \alpha)}; \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dt} = K_1 \frac{1}{w} - K_2, \quad (2)$$

где  $h_{\max}$  – максимальная глубина проникновения жидкости;  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $\Theta$  – угол смачивания;  $R$  – радиус капилляра;  $p$  – капиллярное давление, создаваемое жидкостью;  $K_0$  – коэффициент трения мениска;  $\alpha$  – угол, составленный капилляром с горизонтом;

$$K_1 = \frac{2\pi^2 \sigma p^2 \cos \Theta N R_c^5}{8\eta};$$

$$K_2 = \frac{\pi p^2}{8\eta} \sum_{n=1}^N R_n^4 g \sin \alpha (1 + \operatorname{ctg} \alpha);$$

$N$  – число капилляров в сечении площадью 1 см<sup>2</sup>;  $\eta$  – вязкость.

Вместе с тем автор статьи считает, что коррозионная стойкость поверхностного слоя дорожного цементобетона может быть повышена (кроме традиционного применения гидрофобизаторов) также путем использования химического упрочнения этого слоя – за счет введения в пропиточный состав золя кремнезема. Известно, что при твердении бетона протекают процессы гидролиза силикатов кальция с образованием большого количества гидроксида кальция, который не обладает вяжущими свойствами. Образующийся гидроксид кальция можно связать в низкоосновные гидросиликаты кальция путем добавки в гидрофобизатор при пропитке золя кремнезема или нанопорошка SiO<sub>2</sub>, которые производятся в промышленном масштабе.

### Структурообразование в затвердевшем бетоне в присутствии кремнезоля

Кремнезоль легко вступает в реакцию с гидроксидом кальция, который образуется в процессе гидратации цемента, повышая тем самым количество гидратированных силикатов типа CSH в результате реакции



Эта вновь образовавшаяся фаза CSH отлична по составу от аналогичной CSH-фазы, полученной в результате гидратации цемента. Как следствие, вновь образовавшаяся фаза CSH обладает способностью присоединять другие ионы, особенно щелочи, что имеет существенное значение в связи с применением золя для уменьшения расширения, вызванного реакциями между щелочами и заполнителем. Пуццолановая реакция золя является наиболее интен-

сивной в течение первых двух недель после пропитки. Тем не менее следует подчеркнуть, что с учетом необходимости защиты арматуры содержание золя в пропиточном составе не должно превышать 7–10 %.

Как уже отмечалось, прочность переходной зоны между цементным раствором и крупным заполнителем меньше прочности самого раствора. Эта зона содержит больше пустых пространств, образующихся вследствие скопления свободной воды около зерен заполнителя, а также сложностей, связанных с более плотной упаковкой частиц у его поверхности. В этом пространстве скапливается больше частиц портландита. В случае отсутствия добавки золя в данной области образуются крупные кристаллы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ориентированные параллельно поверхности заполнителя или арматуры. Кристаллы портландита обладают меньшей прочностью, чем образующиеся силикаты кальция CSH. Именно поэтому переходная зона является самым слабым звеном в обычном бетоне. Добавка золя даже в количестве 2–5 % приводит к уплотнению структуры переходной зоны за счет заполнения свободных пространств. Поэтому уменьшается содержание портландита в зоне контакта цемента и зерен заполнителя, что обуславливает упрочнение этой слабой зоны бетона. В результате снижается пористость переходной зоны и повышается сцепление цементного теста с заполнителем и арматурой.

Пуццолановые реакции как фактор химического воздействия вызывают дальнейшее повышение прочности и долговечности бетона. Считается, что в течение первых семи дней твердения воздействие золя на свойства бетона имеет в основном физический характер, а позднее – как физический, так и химический. В результате физического и химического воздействий происходит благоприятное изменение микроструктуры теста, связанное со значительным уменьшением пористости в зоне капиллярных пор. Изменение структуры пор в бетоне рассматривается многими исследователями как главный фактор влияния на механические свойства и прочность бетона. Эти изменения находят свое отражение в снижении проницаемости бетона, а также в уменьшении коэффициентов диффузии ионов хлора. В свою очередь снижение водопроницаемости способствует повышению стойкости бетона к воздействиям агрессивных сред и морозостойкости.

Исследование микроструктуры бетона показало, что состав с оптимальной дозировкой нанодисперсного кремнезема отличается более

плотной матрицей цементирующего вещества и особенной морфологией новообразований модифицированного цементного камня, тогда как контрольные образцы характеризовались более рыхлой и дефектной структурой. Образующаяся плотная малодефектная структура отличается наличием новообразований, характерных для гидросиликатов кальция, представленных в виде игольчатых кристаллов, армирующих бетон (табл. 1).

## ВЫВОДЫ

1. Снижение прочностных характеристик и износостойкости дорожного бетона связано с наличием пор, а также микро- и макрокапилляров, которые образуются в процессе получения бетона, его укладки и эксплуатации.

2. Обоснована возможность уменьшения пористости поверхностного слоя дорожного бетона путем его пропитки составами, содержащими гидрофобизатор и золь кремнезема.

3. В качестве гидрофобизатора использовались выпускаемые промышленностью метилсиликонат калия, олигометилгидридсиликонат, ТЭОС, которые создают на поверхности пор бетона труднорастворимую пленку, препятствующую проникновению воды в бетон.

4. Образующийся в процессе растворения и гидролиза минералов цементного клинкера гидроксид кальция связывается в гидросиликаты содержащимся в пропитанном растворе золем кремнезема. Эти гидросиликаты кальматируют поры бетона и упрочняют его поверхностный слой за счет дополнительной твердой фазы, по химическому составу родственной гидросиликатам кальция, образующимся при твердении цемента.

5. Показано, что основным технологическим фактором, влияющим на проникновение пропитанного раствора в обрабатываемый бетон, является вязкость раствора, зависящая от концентрации действующих веществ (метилсиликоната калия, олигометилгидридсиликоната, ТЭОС и золя кремнезема).

6. Установлено, что из параметров структуры материала наибольшее влияние на глубину пропитки оказывает не только количество, но и распределение по размерам пор и капилляров в диапазонах радиусов 0,1–50,0 мкм.

7. Проведенные испытания пропиточных составов на основе гидрофобизаторов метилсиликоната калия, олигометилгидридсиликоната, ТЭОС и золя кремнезема подтвердили их эффективность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов, И. Н. Влияние дисперсности цемента на структурообразование цементного камня и пористости последнего на прочность бетона / И. Н. Ахвердов, М. А. Шалимо, Т. Е. Шалимо // Тезисы Всесоюзного совещания по современной технологии бетона. М., 1965.
2. Бунин, М. В. Структура и механические свойства цементных бетонов / М. В. Бунин, И. М. Грушко, А. Г. Ильин // Структура и механические свойства цементных бетонов. Харьков: Харьк. ун-т, 1968. 199 с.
3. Водонепроницаемость высокопрочного бетона при высоких гидростатических давлениях / М. К. Шаровар [и др.] // Бетон и железобетон. 1976. № 5. С. 20–21.
4. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона транспортных сооружений / С. В. Шестоперов. М.: Транспорт, 1966. 500 с.
5. Беркман, А. С. Структура и морозостойкость стеновых материалов / А. С. Беркман, И. Г. Мельникова. М., 1962. 168 с.
6. Лайдобон, Ч. С. Поверхностная модификация бетона высоковязкими составами / Ч. С. Лайдобон. Иркутск, 2005. 290 с.
7. Королев, А. С. О новом подходе в математическом прогнозировании водонепроницаемости цементных композитов / А. С. Королев // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. 2008. № 25. С. 31–36.
8. Стольников, В. В. Седиментационные процессы в бетонной смеси и их влияние на формирование структуры бетона и его водонепроницаемость / В. В. Стольников, П. А. Ребиндер, Е. В. Лавринович // Труды ВНИИГ, Ленинград. 1952. № 47.
9. Дубинин, М. М. Пористая структура и свойства материалов / М. М. Дубинин // RILEM-JUPAC: Междунар. симпозиум. Прага, 1973. С. 56–63.
10. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 471 с.
11. Ершова, С. Г. Обеспечение эффективной гидрофобной защиты неорганических строительных материалов / С. Г. Ершова. Новосибирск, 2006. 174 с.
12. Соловьева, В. Я. Новые добавки полуфункционального действия, улучшающие деформативные характеристики бетона / В. Я. Соловьева, Т. В. Смирнова, И. В. Степанова // II Междунар. науч.-практ. конф. «Бетон и железобетон»: тез. докл. Р-н-Д, 2002. С. 312–322.
13. 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.
14. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия: СТБ 1544–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2005. 17 с.
15. Пашенко, А. А. Кремнийорганические защитные покрытия / А. А. Пашенко, М. Г. Воронков. Киев: Техника, 1969. 251 с.
16. Пашенко, А. А. Кремнийорганические гидрофобизаторы в строительстве / А. А. Пашенко. Алма-Ата: Казахстан, 1968. 178 с.
17. Вершинина, О. С. Применение кремнийорганических соединений в строительстве / О. С. Вершинина. М., 1989. 62 с.

Поступила 26.01.2017

Подписана в печать 24.03.2017

Опубликована онлайн 28.03.2017

## REFERENCES

1. Akhverdov I. N., Shalimo M. A., Shalimo T. E. (1965) Influence of Cement Dispersion Ability on Structure Formation of Hardened Cement Paste and its Porosity on Concrete Strength. *Tezisy Vsesoyuznogo Soveshchaniya po Sovremennoi Tekhnologii Betona* [Abstracts of All-Union Meeting on Modern Concrete Technologies]. Moscow, 1965 (in Russian).
2. Bunine M. V., Grushko I. M., Ilyin A. G. (1968) *Structure and Mechanical Properties of Cement Concrete*. Kharkov, Publishing House of Kharkov University. 199 (in Russian).
3. Sharovar M. K., Ivanov F. M., Moskvina, V. M., Savvina Yu. A. (1976) Water Permeability of High-Strength Concrete at High Hydrostatic Pressures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (5), 20–21 (in Russian).
4. Shestoperov S. V. (1966) *Concrete Longevity in Transport Works*. Moscow, Transport. 500 (in Russian).
5. Berkman A. S., Melnikova I. G. (1962) *Structure and Frost Resistance of Wall Materials*. Moscow, Gosstroizdat. 168 (in Russian).
6. Laydobon Ch. S. (2005) *Surface Modification of Concrete while Using High-Viscosity Compositions*. Irkutsk. 290 (in Russian).
7. Korolev A. S. (2008) On New Approach to Mathematical Prediction of Cement Composite Water Permeability. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gos. Un-ta. Seriya "Stroitelstvo i Arkhitektura"* [Bulletin of South Ural State University. Series "Construction and Architecture"], (25), 31–36 (in Russian).
8. Stolnikov V. V., Rebinder P. A., Lavrinovich E. V. (1952) Sedimentation Processes in Concrete Mixture and their Influence on Formation of Concrete Structure and its Water Permeability. *Proceedings of All-Union Scientific-Research Institute of Hydrotechnics*. Leningrad, (47) (in Russian).
9. Dubinine M. M. (1973) Porous Structure and Material Properties. *RILEM-JUPAC: International Symposium*. Prague, 56–63 (in Russian).
10. Lykov A. V. (1968) *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ. 471 (in Russian).
11. Ershova S. G. (2006) *Provision of Efficient Water-Repelling Protection for Non-Organic Construction Materials*. Novosibirsk, 2006. 174 (in Russian).
12. Solovyova V. Ya., Smirnova T. V., Stepanova I. V. (2002) New Semi-Functional Additives Improving Stress-Related Concrete Characteristics. II *Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. "Beton i Zhelezobeton": Tezisy Dokladov* [2<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference "Concrete and Reinforced Concrete". Abstracts of Reports]. Rostov-on-Don, 312–322 (in Russian).
13. 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).
14. СТБ 1544–2005 [Standards of the Republic of Belarus]. *Constructional Heavy-Weight Concrete. Technical Specifications*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. 2005. 17 (in Russian).
15. Pashchenko A. A., Voronkov M. G. (1969) *Organic-Silicon Protection Coatings*. Kiev, Tekhnika Publ. 251 (in Russian).
16. Pashchenko A. A. (1968) *Organic-Silicon Hydrophobisators in Construction*. Alma-Ata, Kazakhstan Publ. 178 (in Russian).
17. Vershinina O. S. (1989) *Application of Organic-Silicon Compounds in Construction*. Moscow, The Central Interdepartmental Institute for Advanced Training of Leaders and Construction Specialists at the MISI them. V. V. Kuybysheva. 62 (in Russian).

Received: 26.01.2017

Accepted: 24.03.2017

Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-153-159

УДК 624.32.159.5

## О расчете кольцевых (замкнутых) в плане фундаментов\*

Инж. Л. С. Хасеневич<sup>1)</sup><sup>1)</sup>РУП «БелТЭИ» (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** В возведенных в конце 80-х – начале 90-х гг. XX ст. и эксплуатируемых в настоящее время четырех дымовых железобетонных трубах тепловых электростанций обнаружено практически полное отсутствие осадок, что не учитывается современными нормативными документами. Фундаменты данных труб разработаны в это же время, защищены патентами России и Беларуси и представляют собой кольцевые основания из погруженных вплотную друг к другу железобетонных свай, образующих своеобразную «стену в грунте» и объединенных монолитным железобетонным ростверком. Ростверк является прямым продолжением стен стволов труб. Одна из этих труб возведена в России, а три – в Беларуси. Поскольку и грунтовые условия, и нагрузки резко отличаются друг от друга, можно говорить о закономерности наблюдаемого явления. Несмотря на то что кольцевые фундаменты значительно снижают расход бетона и стали, уменьшают время строительства и объем трудозатрат, они не получили должного внимания у научной общественности и проектировщиков. В статье на конкретных примерах возведенных труб показана возможность применения расчетов, в которых эффективно используется пассивный отпор грунта. И расчеты, и конструкции существующих фундаментов позволяют оценить вероятность предлагаемой методики для аналогичных фундаментов, замкнутых в плане, не только для промышленных зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** кольцевые фундаменты, замкнутые фундаменты, дымовые трубы, грунты, пассивный отпор, давление, зона теории выделенных объемов

**Для цитирования:** Хасеневич, Л. С. О расчете кольцевых (замкнутых) в плане фундаментов / Л. С. Хасеневич // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 153–159. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-153-159

## Calculation of Foundations with Circular (Closed) in-Plane Shapes

L. S. Khasenevich<sup>1)</sup><sup>1)</sup>RUE BelTEI (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** It has been found that four reinforced concrete flue stacks being constructed in late 80-ies and early in 90-ies of the 20<sup>th</sup> century and being operated at various thermal power stations show practically no settlement, and this fact is not taken into account by any applicable regulatory documents. Foundations of these stacks were designed at the same time and they have been protected by patents of Russian Federation and Republic of Belarus. They represent circular bases made of reinforced concrete piles buried tightly together and forming so-called “slurry wall” with common monolithic reinforced concrete grillage. The grillage presents a direct extension of the stack shaft. One of these stacks has been built in Russia, and three – in Belarus. Due to significant differences in soil conditions and loads in each case, it is a fair assumption to say about regularity of the observed phenomenon. Notwithstanding the fact that circular foundations significantly decrease steel and concrete consumption, construction period and labour input, they have not yet received adequate attention from the side of scientific community and designers. While considering specific examples of the constructed stacks the paper reveals an opportunity to apply calculations which efficiently use passive soil resistance. The presented calculations and designs of the existing foundations make it possible to assess probability of the proposed methodology for the foundations which are analogous in design and which have closed in-plane structure not only for industrial buildings and structures.

**Keywords:** circular foundation, closed loop foundation, flue stack, soil, passive resistance, pressure, TAV area

**For citation:** Khasenevich L. S. (2017) Calculation of Foundations with Circular (Closed) in-Plane Shapes. *Science and Technique*. 16 (2), 153–159. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-153-159 (in Russian)

### Адрес для переписки

Хасеневич Леонид Сулейманович  
РУП «БелТЭИ»  
ул. Романовская Слобода, 5,  
220048, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 226-54-54  
bsn@beltei.by

### Address for correspondence

Khasenevich Leonid S.  
RUE BelTEI  
5 Romanovskaya Sloboda st.,  
220048, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 226-54-54  
bsn@beltei.by

\* Печатается в порядке обсуждения.

В конце 80-х – начале 90-х гг. XX ст. в Советском Союзе на объектах Белорусского отделения института ВНИПИэнергопром были защищены патентами, запроектированы и построены четыре фундамента железобетонных дымовых труб. Вначале возвели фундамент на площадке Курской ТЭЦ-1 для трубы высотой 180,0 м и диаметром устья 8,4 м; затем – на БелГРЭС для трубы высотой 90,0 м и диаметром устья 3,6 м; после – на Брестской ТЭЦ для трубы высотой 120,0 м и диаметром устья 4,2 м и, наконец, на последней – Пинской ТЭЦ для трубы высотой 150,0 м и диаметром устья 5,4 м. И стволы, и фундамента таких труб в соответствии с действующими тогда требованиями проектировались исключительно отделениями института «Теплопроект», субподрядчиками. Последние создавали проекты, ориентируясь на свои типовые разработки со сплошными или кольцевыми массивными фундаментами (если высота труб превосходила 180 м) на глубинах 4,5 м и более. На слабых грунтах массивные фундамента устанавливались на усиленное сваями грунтовое основание. Диаметры этих фундамента на 5–8 м превосходили наружные диаметры стволов труб в нижней части. Устанавливать их было необходимо на значительном расстоянии от существующих зданий и сооружений. Кроме всего прочего, бетонирование таких массивов вели непрерывно из-за опасности расслоения бетона. В условиях плотно застроенных площадок электростанций подобные работы были трудоемкими, в большинстве случаев необычайно дорогими.

Автором в конце 1980-х – начале 1990-х гг. разработаны решения, позволявшие устранить недостатки массивных фундамента, а заодно поставить не совсем обычную задачу – заставить работать грунт на гашение процессов колебания фундамента вместе со стволом своим объемом, а не весом и площадью массивного фундамента [1, 2]. В предложенных решениях такие фундамента являлись продолжениями стен стволов труб в виде погруженных в грунт вплотную друг к другу железобетонных свай, образующих кольцевую замкнутую «стену в грунте» [3–5]. На всех четырех объектах фундамента выполнены в соответствии с изобретениями без изменения конструкций самих

труб, разработанных в отделениях института «Теплопроект».

Схемы кольцевого фундамента и расположения свай в нем приведены на рис. 1, 2.

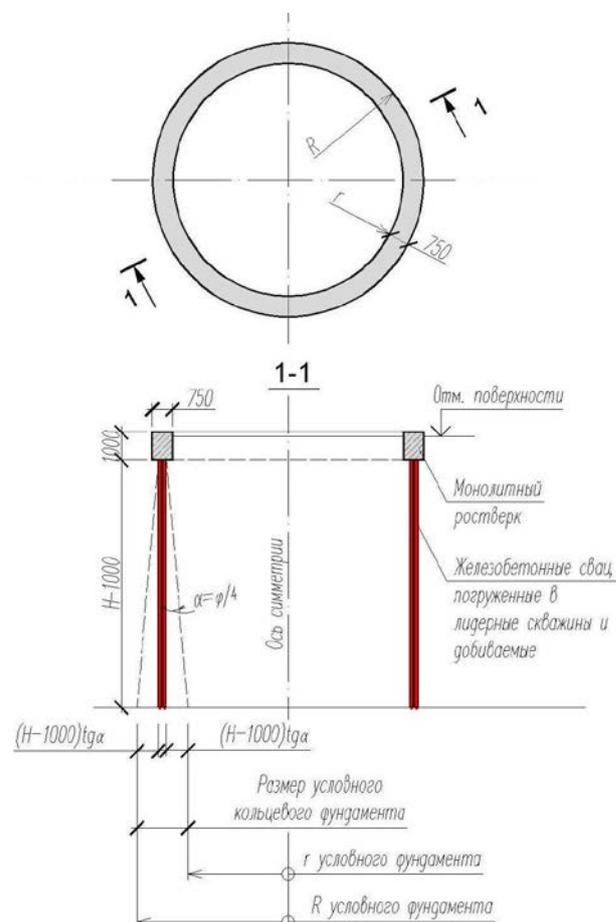


Рис. 1. Схема кольцевого фундамента

Fig. 1. Diagram of circular foundation

Предложенные конструкции не имели аналогов в мировой практике, а потому в условиях Курской ТЭЦ-1 были проведены статические испытания как отдельных свай (4 шт.), так и фрагментов из шести свай каждый (два фрагмента). Испытания для Курской ТЭЦ-1 показали предельную несущую способность отдельных свай 1400 кН, фрагментов – 4000 кН, для Пинской ТЭЦ – предельную несущую нагрузку отдельных свай 1200 кН. Упругие свойства грунтового основания по результатам испытаний учитывались при проектировании.

Показатели фундамента кольцевых дымовых труб в сравнении с решениями института «Теплопроект» для различных объектов приведены в табл. 1.

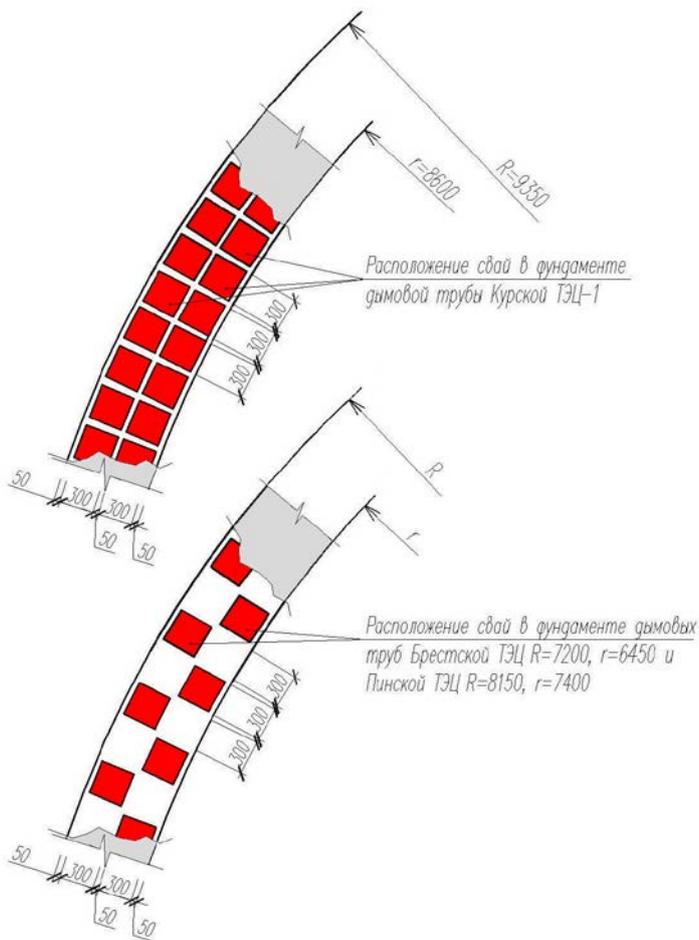


Рис. 2. Схема расположения свай в кольцевых фундаментах

Fig. 2. Location diagram of piles in circular foundations

В процессе возведения ствола трубы вели наблюдение за осадками, и их результаты оказались не совсем сопоставимыми с проведенными статическими испытаниями. Медленно нарастающая нагрузка и ветровое с кориолисовым ускорением воздействие не моделируются. Следует обратить внимание на разную степень зависимости труб с массивными «классическими» фундаментами с глубиной погружения до 4,5 м и с кольцевыми (более легкими, но более глубокими) от влияния ветрового давления и воздействия сил, связанных с кориолисовым ускорением. Известно, что кориолисовы силы действуют в северных широтах перпендикулярно направлению движения вправо, а в южных широтах соответственно влево. Следовательно, давление ветра приводит к движению ствола вместе с жестко с ним связанным фундаментом, а кориолисова сила при этом допол-

нительно такое движение смещает вправо. Центр тяжести суммарной массы «ствол – фундамент» находится для массивного фундамента значительно выше, чем для кольцевого. Его положение по высоте влияет на величину кориолисовых сил: чем выше и массивнее, тем больше. Порывы ветра заставляют ствол колебаться с большей частотой, чем ствол и фундамент от кориолисовой силы. Поэтому если при геометрическом сложении ветрового давления и кориолисовых сил появляются резонансные совпадения, то у фундамента с меньшей площадью пассивного отпора грунта и меньшей глубиной, что характерно для массивных фундаментов, появляется вероятность крена. У кольцевых фундаментов, более глубоких, в суммарную массу трубы и фундамента включается дополнительно выгороженный объем грунта. Боковая поверхность по глубине и площади превосходит глубину массивного фундамента, а потому пассивный отпор более эффективен.

В соответствии с табл. 2 параметров условных фундаментов, где  $\Sigma N = N + N_{\phi} + N_{гр}$  при  $\sigma > \sigma_{быт.}$ , необходимо вести расчеты по определению осадок. Но на всех объектах строительства после возведения труб произошла практически полная стабилизация грунта, осадки прекратились и даже через 10 лет замеры указывали на их отсутствие. Данное обстоятельство требовало найти причины такого положения с точки зрения современных строительных норм. Ведь опорные площади фундаментов были уменьшены в 10–11 раз, а моменты сопротивления площадей опирания – в 8–10 раз. Следовательно, искать причину практически полного отсутствия осадок необходимо было в сопротивлении боковых поверхностей кольца из свай – и изнутри, и снаружи.

По результатам работ на строительстве Курской ТЭЦ-1, по результатам испытаний, а также по предварительным расчетам и экономическому анализу фундамента дымовой трубы Пинской ТЭЦ Министерством архитектуры и строительства Республики Беларусь было разослано специальное рекомендательное письмо от 10.11.1997 № 06-1/7-7600 «О конструкциях фундаментов дымовых труб и других сооружениях башенного типа». Проектное решение попало в отчеты Госэкспертизы при Минстройархитектуры от 30.12.1997 № 531-7/97, т. е. она согласовала это решение.

Показатели фундаментов кольцевых дымовых труб в сравнении с решениями института «Теплопроект» для различных объектов

Indices of circular stack foundations in comparison with «Теплопроект» Institute solutions for various objects

Показатель	Дымовая труба			
	Курской ТЭЦ-1, $H = 180$ м, $D_0 = 8,4$ м	БелГРЭС, $H = 90$ м, $D_0 = 3,6$ м	Брестской ТЭЦ, $H = 120$ м, $D_0 = 4,2$ м	Пинской ТЭЦ, $H = 150$ м, $D_0 = 5,4$ м
Выемка грунта, м <sup>3</sup>	290 (5700)	120 (3600)	830 (5610)	490 (8860)
Обратная засыпка, м <sup>3</sup>	220 (4700)	100 (2800)	800 (4740)	440 (8400)
Сваи, шт./м <sup>3</sup>	248/265 (292/280)	48/30,5 (без свай)	146/131,4 (192/140)	96/70 (без свай)
Монолитный железобетон, м <sup>3</sup>	160 (958)	60 (330)	80 (457)	51 (540)
Стоимость, руб.	80500 (265000), в ценах 1991 г.	22360 (69000), в ценах 1984 г.	43020 (115724), в ценах 1984 г.	55440 (368540), в ценах 1991 г.
Трудозатраты, чел./ч	9559 (44500)	3985 (6500)	625 (3036)	1125 (15052)

Таблица 2

Параметры условных фундаментов  
Parameters of conventional foundation

Показатель	Условный фундамент		
	Курской ТЭЦ-1	Брестской ТЭЦ	Пинской ТЭЦ
$H-1$ , м (рис. 1)	11,5	7,5	11,5
$r_{\text{усл.ф.}}$ , м	7,45	5,76	6,04
$R_{\text{усл.ф.}}$ , м	10,45	7,84	9,46
$A_{\text{усл.ф.}}$ , м <sup>2</sup>	168,618	88,824	166,451
$\Sigma N$ , кН	144287	52399	102836
$\sigma$ , кН/м <sup>2</sup>	855,7	590,0	617,8
$\sigma_{\text{быт.}}$ , кН/м <sup>2</sup>	227,150	186,675	230,125

Однако при попытке сейчас спроектировать подобный фундамент экспертиза не позволит выполнить его из-за отсутствия такого понятия в классификационных областях применения фундаментов (табл. 5.1 ТКП 45-5.01-254-2012 «Основания и фундаменты зданий и сооружений»). Данное отношение экспертизы частично обосновано и тем, что в нормативной литературе не присутствует раздел «кольцевые фундаменты» и соответственно нет расчета замкнутых оболочек в грунте, заполненных грунтом. Например, в расчете опускного колодца предлагается рассматривать координату  $z_0$  центра поворота и угол поворота  $\omega$ , как элементы абсолютно жесткого стержня, по принципу расчета свай [6–9]. Но размеры отдельно рассматриваемой жесткой сваи в плане и размеры опускного колодца абсолютно несопоставимы. Уже отпор грунта по лобовой поверхности может оказаться гораздо весомее, чем аналогичное сопротивление для свай даже метровой шири-

ны. А распорное давление на боковые поверхности, не учтенное в расчетах на поворот, явно превратит предлагаемое решение в бессмысленные математические упражнения, ничего общего с реальным поведением опускного колодца под нагрузкой не имеющие. Кольцевой фундамент только наружной поверхностью напоминает опускной колодец, даже давление снаружи не является распорным. Давление и снаружи и изнутри – пассивный отпор, так как в отличие от изгибаемой распором стены опускного колодца оно вызвано предполагаемым продавливанием грунта узкой лентой фундамента шириной 650 мм. Следовательно, воздействие на фундамент оказывается противоположным направлению земного притяжения за счет трения по грунту боковых поверхностей снаружи и изнутри и отпорным по основанию. При расчете такого фундамента силы трения необходимо включать в формулы устойчивости и деформации системы.

Расчеты для определения несущей способности в соответствии с предложенной теорией выделенных объемов (ТВО) в [10] выполнялись при условии опирания острия свай на грунт с учетом сопротивления по боковым (краевым) поверхностям так называемой «луковицы давлений» ниже плоскости расположения острия свай. Такие зависимости возможны при проведении испытаний и последовательных нагрузках в процессе строительства. Нельзя исключать вероятность, что грунт ниже острия свай при полной передаче давления на кольцо в перечисленных случаях не подвергнется нерав-

номерной осадке. Такое положение необходимо учитывать и определять в расчетах.

В эксплуатационный же период грунт стабилизирован. Он плотно сжимает изнутри и снаружи кольцо из свай, имеющих тенденцию к предполагаемому движению по вертикали вниз за счет земного притяжения, и создает в грунте распор, т. е. пассивный отпор. Причем этот пассивный отпор становится преобладающим (по времени) над пассивным отпором ниже острия (в зоне ТВО). В условиях стабилизации он включается в работу раньше. Поэтому для режима эксплуатации вначале следует определить пассивный отпор в верхней зоне боковых поверхностей и вызываемые им силы трения, вычесть эти силы из суммарных нагрузок, а разницу, если она существует, приложить к зоне ТВО. Данное решение надо применять исключительно к кольцевым (или замкнутым в плане) фундаментам. Таким образом, получаем три последовательных расчета:

- расчет в стадии строительства (в зоне ТВО);
- эксплуатационный расчет верхней зоны;
- эксплуатационный расчет зоны ТВО (по необходимости).

У таких фундаментов пассивные отпоры верхней зоны изнутри и снаружи отличаются друг от друга. Считать несущую способность этих фундаментов по методу условных фундаментов неверно хотя бы потому, что данные расчетов (табл. 1, рис. 1) указывают на возможное появление осадок. Следует отметить необходимость сохранности существующего ненарушенного сложения грунтовой толщи. Данное обстоятельство обеспечивалось выполнением шнеками лидирующих скважин под каждую сваю, а в условиях Брестской ТЭЦ – забивкой свай.

На схеме рис. 3 изображен поперечный разрез кольцевого фундамента с действующими нагрузками и отпорными силами со стороны грунта. Собственный вес надземного строения  $N$ , опрокидывающий момент  $M$  и сдвигающее усилие  $Q$  приложены в верхней части у поверхности фундамента. Вес кольцевого фундамента из свай  $N_{\phi}$  распределен равномерно внутри

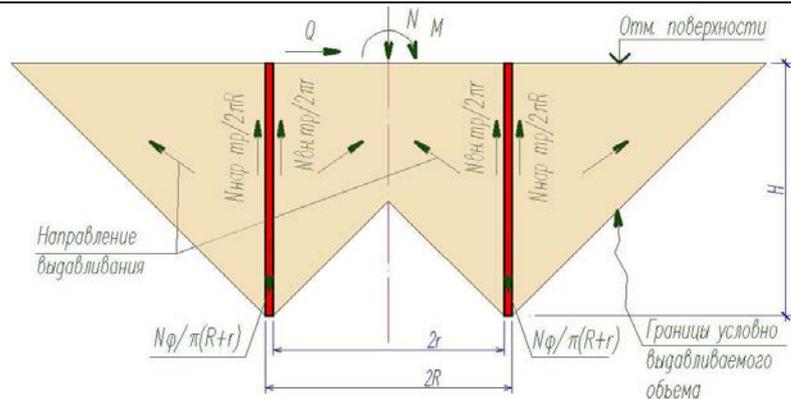


Рис. 3. Схема действующих на кольцо фундамента сил при эксплуатации  
Fig. 3. Diagram of forces acting on foundation circle during operation

и снаружи образующих: внутренней – диаметром  $d$ , внешней – диаметром  $D$ .

Нагрузка на грунтовое основание [11] в уровне острия свай при предварительном расчете давления на него без учета сопротивления грунта определяется по формуле

$$\sigma = \frac{N + N_{\phi}}{A} \pm \frac{M + QH}{W} \mp \frac{(N + N_{\phi})D}{2W}, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь опирания;  $W$  – момент сопротивления опорной площади основания.

Для дымовых труб третий член (1) (давление от удерживающего момента) обычно на порядок больше второго члена уравнения (от опрокидывающего момента), и крены практически невозможны еще и из-за большой глубины передачи нагрузки. Поэтому все сводится к определению деформационных процессов по вертикали, т. е. возможности появления осадок. Для учета пассивного отпора  $E_1$  снаружи фундаментного кольца находим средневзвешенные значения удельного веса грунтов  $\gamma$ , сцепления  $c$  и угла внутреннего трения  $\phi$  для глубины заложения фундамента  $H$ . Изнутри определяем пассивный отпор  $E_2$  как объем условно выдавливаемого грунта с учетом его сил трения по поверхности свай и по грунту в пределах внутренней поверхности кольца. Отпор грунта с коэффициентом пассивного отпора  $K_p$  и снаружи, и изнутри определяли со средневзвешенными коэффициентами трения грунта по бетону и грунту и со средневзвешенными  $\gamma$ ,  $\phi$  и  $c$ .

Таким образом, для определения действительной нагрузки в уровне острия свай следует из веса ствола и фундамента вычесть силы трения по поверхностям снаружи и изнутри:

$$A = \pi \frac{D^2 - d^2}{4}; E_1 = \pi DH \frac{\gamma HK_p + 2c\sqrt{K_p}}{2};$$

$$E_2 = \pi d^2 \gamma \left( H - \frac{1}{6K_p} \right) + \pi d H 2c\sqrt{K_p}.$$

Тогда силы трения по наружной поверхности

$$N_{нар.тр} = \left( f_1 \frac{nb}{\pi D} + f_2 \frac{\pi D - nb}{\pi D} \right) E_1, \quad (2)$$

где  $n$  – число свай в наружном или во внутреннем ряду;  $b$  – размер стороны сваи;  $f_1$  – средневзвешенный коэффициент трения грунта о бетон снаружи;  $f_2$  – то же грунта о грунт.

Силы трения по внутренней поверхности

$$N_{вн.тр} = \left( f_1 \frac{nb}{\pi d} + f_2 \frac{\pi d - nb}{\pi d} \right) E_2. \quad (3)$$

Эти силы противодействуют давлению суммарного веса ствола и фундамента. В таком случае нагрузка, приходящаяся на грунт в уровне острия свай:

$$N_{\Sigma} = N + N_{\phi} - N_{нар.тр} - N_{вн.тр}. \quad (4)$$

Расчеты (табл. 3) для фундамента дымовой трубы Курской ТЭЦ-1 показали, что суммарная расчетная вертикальная нагрузка ствола и фундамента 113865 кН меньше удерживающих сил при учете пассивного отпора грунта изнутри и снаружи кольца глубиной 12,5 м. Силы трения на преодоление отпора не позволяют 248 сваям передавать нагрузку на грунт в уровне острия. Поэтому осадка оказалась невозможной. Кольцевые фундаменты Брестской и Пинской ТЭЦ находятся в таком же положении. Данных инженерно-геологических изысканий по фундаменту дымовой трубы БелГРЭС, а соответственно и расчетов по истечении времени, автору до настоящего времени не удалось отыскать. Но поскольку ему пришлось быть участником проведения работ при отрывке котлована и погружении свай, то можно уверенно утверждать о глинистом составе грунтов. Верхние 1,5 м грунтов котлована были представлены сильно обводненными заторфованными глинистыми соединениями, а ниже их подстилали супеси, суглинки и песчаные линзы.

Как видно из табл. 3, нагрузка, приходящаяся на грунт в уровне острия свай, т. е. в уровне зоны ТВО, отсутствует. И, следовательно, отсутствует осадка.

Таблица 3

Определение суммарных нагрузок на фундамент  
Determination of total loads on foundation

Показатель	Кольцевой фундамент		
	Курской ТЭЦ-1	Брестской ТЭЦ	Пинской ТЭЦ
$d$ , м	17,3	13,0	14,9
$D$ , м	18,6	14,3	16,2
$M$ , кН·м, на отм. 0.00	187460	34450	55850
$N$ , кН, на отм. 0.00	103240	34860	63080
$Q$ , кН, на отм. 0.00	1320	370	481
$A$ , м <sup>2</sup>	36,6360, плоскость на отм. -12.5 м	27,8597, плоскость на отм. -8.5 м	31,7376, плоскость на отм. -12.5 м
$E_1$ , кН	205279	101719	232686
$E_2$ , кН	85993	59031	77845
$N_{нар.тр}$ , кН	82254	42308	109590
$N_{вн.тр}$ , кН	32154	24687	35277
$N + N_{\phi}$ , кН	113865	40145	69485
$n_{свай}$ , шт.	248 при $L = 12$ м	146 при $L = 8$ м	96 при $L = 12$ м
$N_{\Sigma}$ , кН	-543	-26850	-75382
Выводы по фундаменту	Защемлен изнутри и снаружи	Защемлен изнутри и снаружи	Защемлен изнутри и снаружи

## ВЫВОДЫ

1. Анализируя проведенные исследования, автор считает необходимым ввести в ТКП 45-5.01-254-2012 «Основания и фундаменты зданий и сооружений» и в аналогичные нормативные документы понятия «кольцевые или замкнутые в плане фундаменты из элементов «стены в грунте» с разъяснениями, что сваи в этом случае являются указанными элементами.

2. Для кольцевых или замкнутых в плане фундаментов, а также для свай вообще, учитывая значительную разницу результатов испытаний и замеров осадок в процессе строительства, расчеты вести с учетом пассивного отпора грунта раздельно в строгой последовательности:

- в стадии строительства – в зоне опирания свай (в зоне выделенных объемов – ТВО);
- в стадии эксплуатации – по боковым поверхностям изнутри и снаружи;
- в стадии эксплуатации – в зоне опирания свай (в зоне теории выделенных объемов при соблюдении условия  $N + N_{\phi} > N_{\text{нар.тр}} + N_{\text{вн.тр}}$ , т. е. когда вес ствола и фундамента превосходит сопротивление грунта по боковым поверхностям).

3. Расчеты любых фундаментов (не только замкнутых и не только свайных) правильнее выполнять с учетом пассивного отпора грунта по боковым поверхностям и в зоне теории выделенных объемов, ниже опорной плоскости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фундамент сооружения: пат. 1790644 USSR: МКИ<sup>5</sup>Е 02D 27/42 / Л. С. Хасеневич; дата публ. 23.01.1993.
2. Фундамент сооружения: пат. 1150 ВУ; МКИ<sup>5</sup>Е 02D 27/42, 5/20 / Л. С. Хасеневич; дата публ.: 14.06.1996.
3. Способ возведения «стены в грунте»: пат. 1827410 USSR; МКИ<sup>5</sup>Е 02 D 5/20 / Л. С. Хасеневич; дата публ.: 15.07.1993.
4. Способ возведения «стены в грунте»: пат. 1149 ВУ; МКИ<sup>5</sup> Е 02 D 5/20 / Л. С. Хасеневич; дата публ.: 14.06.1996.
5. Способ образования фундамента дымовой трубы: пат. 2049857 RU; МКИ<sup>5</sup> Е 02D 27/42, 5/20 / Л. С. Хасеневич; дата публ.: 10.12.1995.
6. Основания и фундаменты: справ. / под ред. Г. И. Швецова. М.: Высш. шк., 1991. С. 189–211.
7. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения. Строительные нормы проектирования:

- ТКП 45-5.01-254-2012. Введ. 01.07.2012. Минск: Минстройархитектуры, 2012. 102 с.
8. Проектирование и устройство свайных и траншейных стен: П 14-01 к СНБ 5.01.01-99. Введ. 01.01.2002. Минск: Минстройархитектуры, 2001. 64 с.
  9. Свайные фундаменты: СНиП 2.02.03-85. Введ. 01.01.1987. М.: Госстрой, 1985.
  10. Хасеневич, Л. С. Теория выделенных объемов (ТВО), или Устойчивость грунтовых стен траншей в методе «стена в грунте» и расчет фундаментов / Л. С. Хасеневич. 2-е изд. перераб. и доп. Минск: Изд. центр БГУ, 2011. 156 с.
  11. Coriolis, G. Sur Les Equation du Movement Corps / G. Coriolis // Journ Ecole Politechn // Journ. Ecole Polytechn. 1835. Vol. 15, No 24. P. 142–154.

Поступила 31.10.2016

Подписана в печать 04.01.2017

Опубликована онлайн 28.03.2017

## REFERENCES

1. Khasenevich L. S. (1993) Foundations of Buildings. Patent USSR No 1790644 (in Russian).
2. Khasenevich L. S. (1996) Foundations of Buildings. Patent Republic of Belarus No 1150 (in Russian).
3. Khasenevich L. S. (1993) Method for “Slurry Wall” Construction. Patent USSR No 1827410 (in Russian).
4. Khasenevich L. S. (1996) Method for “Slurry Wall” Construction: Patent Republic of Belarus No 1149 (in Russian).
5. Khasenevich L. S. (1995) Method for Construction of Flue Stack. Patent Russian Federation No 2049857 (in Russian).
6. Shvetsov G. I. (ed.), Noskov I. V., Slobodyan A. D., Gorkova G. S. (1991) *Foundation Engineering: Reference Book*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 189–211 (in Russian).
7. ТКП 45-5.01-254-2012. Foundation Engineering for Buildings and Structures. Principal Provisions. Construction and Design Standards. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2012. 102 (in Russian).
8. Appendix 14-01 to СНБ 5.01.01-99 [Construction Standards of the Republic of Belarus]. Design and Construction of Piled and Trench Walls. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2001. 64.
9. SNiP 2.02.03-85 [Construction Rules and Regulations]. Piled foundations. Moscow, State Committee for Construction Publishing House, 1985.
10. Khasenevich L. S. (2011) *Theory of Allocated Volumes (TAV) or Stability of Trench Soil Walls in “Slurry Wall” Method and Calculation of Foundations*. 2<sup>nd</sup> ed. Minsk, Belarusian State University Publishing Centre. 156 (in Russian).
11. Coriolis G. (1835) Sur Les Equation du Movement Corps. *Journ. Ecole Polytechn*, 15 (24), 142–154.

Received: 31.10.2016

Accepted: 04.01.2017

Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170

УДК 621.311.6:621.311.001.57

## Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло\*

Докт. физ.-мат. наук К. В. Доброго<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Резюме.** В настоящее время наблюдается быстрый рост рынка накопителей энергии. Имеются предпосылки для их распространения в Беларуси. Несмотря на развитие технологии, вопросы оптимизации систем накопления электроэнергии и их работы в условиях конкретных систем «генератор – накопитель – потребитель» (ГНП) не получили необходимой проработки. Вместе с тем настройка и оптимизация системы ГНП могут дать конкурентное преимущество тем или иным системам накопителей, поскольку применение аккумуляторных батарей в неоптимальных условиях зарядки-разрядки снижает их ресурс. Оптимизация системы ГНП может включать использование гибридных систем накопителей совместно с разнородными химическими и механическими накопителями, с настройкой параметров контроллера системы и др. В научных работах представлено немало эмпирических и аналитических методов расчета электрических нагрузок, использующих в качестве исходных данных усредненные по времени значения фактического потребления электроэнергии, средние квартирные нагрузки, эмпирические или статистические коэффициенты формы и коэффициенты максимума электрической нагрузки группы однородных потребителей. Однако такие модели не отвечают требованиям детального имитирования работы небольших систем, когда моделирование должно соответствовать нестационарному, неусредненному, стохастическому характеру нагрузки. В статье изложен простой подход к детальному имитационному моделированию электрических нагрузок относительно небольших объектов, таких как многоквартирный дом или небольшое сельскохозяйственное производство. Модель сформулирована как в физическом, так и в алгоритмическом виде, что позволяет легко реализовать ее в любой среде программирования. Представлена сходимости интегрального потребления электроэнергии, задаваемого моделью, к статистически средним параметрам. Рассчитана автокорреляционная функция, показывающая два масштаба автокорреляции имитационных графиков нагрузок. Проанализированы Фурье-спектры сгенерированных графиков нагрузок. Модель электрической нагрузки может использоваться независимо или как составная часть общей модели системы ГНП. Она также может применяться для настройки систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ) и различных исследовательских целей.

**Ключевые слова:** моделирование, электрическая нагрузка, накопитель электроэнергии, метод Монте-Карло

**Для цитирования:** Доброго, К. В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло / К. В. Доброго // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 160–170. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170

---

**Адрес для переписки**

Доброго Кирилл Викторович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-42-32  
ef@bntu.by

---

**Address for correspondence**

Dobrego Kirill V.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-42-32  
ef@bntu.by

\* Работа выполнена в рамках задания 1.20 «Обоснование технико-экономической эффективности использования свинцовых аккумуляторов со структурно-модифицированными электродами для накопительных блоков» Государственной программы научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. «Энергетические системы, процессы и технологии».

## Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System while Using Monte-Carlo Method

K. V. Dobrego<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Nowadays we observe rather rapid growth of energy accumulators market. There are prerequisites to their extensive application in Belarus. In spite of technology development problems pertaining to optimization of electric power and their operation under conditions of specific systems “generator – accumulator – consumer” (GAC) have not obtained proper consideration. At the same time tuning and optimization of the GAC system may provide competitive advantages to various accumulating systems because application of accumulator batteries in non-optimal charge – discharge conditions reduces its operating resource. Optimization of the GAC system may include utilization of hybrid accumulator systems together with heterogeneous chemical and mechanical accumulators, tuning of system controller parameters etc. Research papers present a great number of empirical and analytical methods for calculation of electric loads. These methods use the following parameters as initial data: time-averaged values of actual electric power consumption, averaged apartment electric loads, empirical and statistical form coefficients, coefficients of maximum electric load for a group of uniform consumers. However such models do not meet the requirements of detailed simulation of relatively small system operation when the simulation must correspond to non-stationary, non-averaged, stochastic load nature. The paper provides a simple approach to the detailed simulation of electric loads in regard to small projects such as multi-unit apartment building or small agricultural farm. The model is formulated both in physical and algorithmic terms that make it possible to be easily realized in any programming environment. The paper presents convergence of integral electric power consumption, which is set by the model, to statistically averaged parameters. Autocorrelation function has been calculated in the paper that shows two scales for autocorrelation of simulated load diagrams. The paper contains of an analysis on Fourier spectra for generated electric load diagrams. The model of electric load may be used separately or as a component of a general model in the GAC system. It may also be applied for tuning of automatic systems for control and accounting of power resources and various research purposes.

**Keywords:** simulation, electric load, electric power accumulator, Monte-Carlo method

**For citation:** Dobrego K. V. (2017) Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System while Using Monte-Carlo Method. *Science and Technique*. 16 (2), 160–170. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170 (in Russian)

### Введение

В настоящее время наблюдается высокий интерес к системам накопления электроэнергии как для бытового, так и промышленного использования. По оценкам экспертов, годовой рост мирового рынка накопителей электроэнергии составляет 27 % [1]. Имеются объективные предпосылки для широкого внедрения систем накопителей в Республике Беларусь. Это связано с планируемым вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС, введением многотарифной системы оплаты за электроэнергию [2], появлением систем локальной электрогенерации с использованием возобновляемых источников энергии.

Уже сейчас имеется немало компаний, производящих системы накопления электроэнергии, среди которых Tesla, NGK, AltairNano [1, 3, 4]. В борьбу за рынок включаются и российские производители [5]. Несмотря на бурное развитие технологии, вопросы оптимизации систем накопления электроэнергии и в особенности их

работы в условиях конкретных систем «генератор – накопитель – потребитель» (ГНП) не получили необходимой проработки. Вместе с тем понятно, что настройка и оптимизация системы ГНП могут дать конкурентное преимущество тем или иным системам накопителей, поскольку применение аккумуляторных батарей в неоптимальных условиях зарядки-разрядки существенно снижает их рабочий ресурс. Оптимизация системы ГНП может включать, в частности, использование гибридных систем накопителей совместно с разнородными химическими и механическими накопителями, с настройкой параметров контроллера системы.

Ввиду того что прямые испытания и последующая оптимизация накопителей для конкретных систем ГНП дорогостоящи, компьютерное моделирование может существенно облегчить задачу оптимизации конструкции, схемы накопителя и алгоритмов его работы в системе. Накопитель электроэнергии может использоваться в различных сетях и выполнять разные

функции. Наиболее очевидные функции накопителя – это работа: 1) в автономной сети с ветрогенераторами и солнечными батареями, другими источниками и относительно маломощными потребителями; 2) в качестве буферного накопителя для выравнивания суточной неравномерности электрической нагрузки; 3) по графику минимального тарифа на электроэнергию с локальным использованием накопленной энергии.

Для выполнения каждой из указанных функций требуются специфические накопительные устройства и алгоритмы управления их работой [6, 7], а для моделирования системы ГНП нужны модели работы всех элементов этой системы. Соответствующие модели представлены в различных научных трудах. Так, в [8] предложен метод моделирования работы накопителя при помощи передаточных функций, в [6, 9] – модели работы ветрогенераторов и солнечных батарей. Расчеты электрических нагрузок в основном сводятся к нормативным методам оценки средних и максимальных нагрузок достаточно крупных промышленных и жилищно-бытовых объектов (предприятий, жилых микрорайонов и т. п.) для целей проектирования [10–13]. Методы расчета вероятностного распределения напряжений и потоков мощности делятся на аналитические и численные. Аналитические используют описание временных выборок случайных значений мощности нагрузки и генерации с помощью сверток и кумулянтов [14–16], численные основываются на моделировании случайных временных выборок методом Монте-Карло.

Существует немало эмпирических и аналитических методов расчетов электрических нагрузок, использующих в качестве исходных данных усредненные по времени значения фактического потребления электроэнергии, средние квартирные нагрузки, эмпирические или статистические коэффициенты формы и коэффициенты максимума электрической нагрузки группы однородных потребителей [15, 17, 18]. Однако такие модели не отвечают требованиям детального имитирования работы небольших систем, максимально соответствующего нестационарному, неусредненному, стохастическому характеру нагрузки рассматриваемой сети. Анализ данных показывает, что численное мо-

делирование является наиболее эффективным методом решения задач имитации реальных графиков электрических нагрузок (ГЭН). Об этом говорят и хорошие результаты, полученные при использовании такого подхода для исследования ГЭН жилищно-бытовых объектов [19–21].

В статье изложен простой подход к детальному имитационному моделированию электропотребления относительно небольших объектов, таких как многоквартирный дом или небольшое сельскохозяйственное производство. Модель сформулирована как в физическом, так и в алгоритмическом виде, что позволяет легко реализовать ее в любой среде программирования. Модель электрической нагрузки составлена таким образом, чтобы ее можно было использовать как часть общей модели системы ГНП, построение которой будет выполнено в дальнейшем для оптимизации работы накопителей и генераторов.

Следует иметь в виду, что изолированные энергетические системы с накопителями электроэнергии пока не распространены в Республике Беларусь. Однако со временем они займут свою нишу в хозяйстве страны, и для них должны быть разработаны средства тестирования и оптимизации. Модель, представленную в статье, можно применять также для уточнения методов расчета электрических нагрузок (РЭН) жилищно-коммунальных и промышленных объектов, коэффициентов использования для эмпирических методов РЭН, коэффициентов несоответствия расчетных максимумов нагрузок силовых электроприемников и других параметров, используемых в РЭН. Кроме того, ее можно применять для моделирования и отладки АСУ энергетических систем.

### Модель электрической нагрузки

Рассмотрим автономные энергетические системы, генерирующая часть которых состоит из ветрогенератора и (или) фотогальванических элементов, а потребителем выступает группа домохозяйств (квартир), сельскохозяйственное предприятие или иной небольшой потребитель. Модель формулируется в достаточно универсальном виде, однако очевидно, что для более специфичного объекта потребуются особая и, возможно, многопараметрическая модель.

Считаем, что моделируемый объект включает определенное число независимых потребителей активной электрической мощности, которых можно разбить на несколько классов. Каждый класс потребителей характеризуется диапазоном мощности отдельных потребителей, некоторым распределением этих потребителей по мощности внутри установленного диапазона, статистическим законом включения/выключения нагрузки и другими параметрами. Разделение на классы электропотребителей (группы электроприемников) – стандартный подход как в эмпирических, так и в статистических методах РЭН [9, 11, 15].

Предложим простейшее деление электропотребителей жилых помещений. Класс С0 – постоянно или длительно работающие маломощные потребители (электробытовые приборы в дежурном режиме или режиме ожидания, часы, таймеры, датчики, контроллеры, Wi-Fi-хабы и т. п.). Диапазон мощности  $\Delta P^{(C0)}$  потребителей этого класса 0,1–10,0 Вт. Временной закон включения/выключения нагрузки отсутствует – потребитель постоянно включен. Распределение отдельных потребителей по мощности – арифметически равномерное. Класс С1 – маломощные бытовые приборы (прежде всего приборы освещения), имеющие случайный закон включения/выключения с плотностью вероятности включения, промодулированной по суточному циклу необходимости освещения  $f^{(ocb)}(t)$ . Диапазон мощности потребителей этого класса  $\Delta P^{(C1)} = 10\text{--}100$  Вт. Распределение по мощности отдельных потребителей в данном диапазоне – равномерное геометрическое, что отражает тенденцию к уменьшению использования в быту ламп накаливания и переходу на энергосберегающие приборы освещения. Класс С2 – бытовые приборы средней мощности, такие как пылесосы, холодильники, стиральные машины, миксеры, дрели, СВЧ-печи, электрочайники и т. п. Диапазон мощности  $\Delta P^{(C2)}$  потребителей этого класса 100–3000 Вт. Временной закон включения/выключения нагрузки – случайный с плотностью вероятности, промодулированной по суточному циклу активности домохозяйств  $f^{(акт)}(t)$  (максимальные нагрузки – с 17:00 до 22:00, минимальные – с 23:00 до 6:00).

Мощность  $i$ -го прибора класса С при его арифметически равномерном распределении в интервале  $\Delta P^{(C)} = P_{\min}^{(C)} \dots P_{\max}^{(C)}$  запишется в виде

$$P_i^{(C)} = P_{\min}^{(C)} + (i-1)\Delta q, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta q = \frac{P_{\max}^{(C)} - P_{\min}^{(C)}}{N^{(C)} - 1}.$$

При геометрически равномерном распределении

$$P_i^{(C)} = P_{\min}^{(C)} \delta^i, \quad (2)$$

$$\text{где } \delta = \left( \frac{P_{\max}^{(C)}}{P_{\min}^{(C)}} \right)^{1/N^{(C)}}.$$

Первичными исходными данными модели будут: среднесуточное потребление электроэнергии объектом в целом (определяется из среднесуточного потребления  $\bar{L}_{\text{сут}} = \bar{L}_{\text{мес}} / 30$ ), относительное потребление энергии приборами каждого класса (основанное на статистических данных или других моделях), количество электроприборов каждого класса на объекте –  $N^{(C0)}$ ,  $N^{(C1)}$ ,  $N^{(C2)}$ . Примем, что средняя потребляемая мощность приборов класса С0  $\bar{P}^{(C0)} = N^{(C0)}$ , тогда потребление электроэнергии в сутки  $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C0)} = 24N^{(C0)}$ . Между потребителями классов С1 и С2 среднесуточное потребление энергии распределено в соотношении 1:2 (модельное допущение), таким образом,  $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C1)} = \frac{\bar{L}_{\text{сут}} - \bar{L}_{\text{сут}}^{(C0)}}{3}$  и  $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C2)} = 2\bar{L}_{\text{сут}}^{(C1)}$ .

Статистический закон работы отдельного прибора формулируется при помощи функции плотности вероятности включения прибора, основанной на суточном цикле необходимости освещения  $f^{(ocb)}(t)$  и бытовой активности домохозяйств  $f^{(акт)}(t)$ . Момент выключения определяется исходя из статистического закона времени нахождения прибора во включенном состоянии  $f^{(ON)}(t)$ . Определяя статистический закон  $f^{(ON)}(t)$ , следует учитывать, что кратковременные включения достаточно вероятны

и отсутствует выраженное «ожидаемое» время включения прибора. Поэтому от нормального закона распределения вероятности, распределений Стьюдента, Лапласа и подобных им целесообразно отказаться. Более правдоподобными следует признать распределения типа Вейбулла, Фишера, бета-распределение [22]. Примем для  $f^{(ON)}(t)$  распределение Вейбулла [23], имеющее вид

$$f_{WEI}(k, \lambda, t) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k} \text{ для } t \geq 0, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент формы (модуль Вейбулла);  $\lambda$  – коэффициент масштаба.

Математическое ожидание, медиану, моду и дисперсию распределения найдем как:

$$M_{WEI} = \lambda \Gamma(1 + 1/k); \quad m_{WEI} = \lambda \ln(2)^{1/k};$$

$$d_{WEI} = \frac{\lambda(k-1)^{1/k}}{k^{1/k}} \text{ для } k > 1;$$

$$\sigma_{WEI} = \lambda^2 \Gamma(1 + 2/k) - \mu^2.$$

Модуль Вейбулла для  $f^{(ON)}(t)$  будет положительным, поскольку плотность вероятности времени включения должна расти от нуля. Для простоты положим  $k = 2$ . Выбор коэффициента масштаба может быть сделан исходя из статистических медианных или модальных данных. Если предположить, что медиана распределения соответствует получасу для приборов класса C1, то  $\lambda^{(C1)} = 1800 / \ln(2)^{1/k} \cong 2162$  с. Для приборов класса C2 оценим медиану в 100 с и получим  $\lambda^{(C2)} = 100 / \ln(2)^{1/k} \cong 120$  с.

Суточный цикл необходимости освещения  $f^{(ocb)}(t)$  построим, учитывая метеорологические данные о времени восхода ( $t_{li}$ ), заката ( $t_{dar}$ ) солнца, длительности сумерек ( $\Delta t_{ocb}$ ) для заданного периода года и географического положения объекта [24, 25]. В суточный цикл необходимости освещения включим область ночных «мертвых» часов (от 1:00 до 4:00), не зависящую от поры года. Простая аналитическая модель  $f^{(ocb)}(t)$  может быть записана в виде

$$f^{(ocb)}(t) = 1 - 0,4 \left[ \tanh\left(\frac{t - t_{li}}{\Delta t_{ocb}}\right) - \tanh\left(\frac{t - t_{dar}}{\Delta t_{ocb}}\right) + \tanh\left(\frac{t - t_{1h}}{\Delta t_{ocb}}\right) - \tanh\left(\frac{t - t_{4h}}{\Delta t_{ocb}}\right) \right]. \quad (4)$$

Заметим, что  $f^{(ocb)}(t)$  везде больше нуля. Это отражает факт необходимости освещения закрытых, неосвещаемых помещений или работы дежурных источников света в любое время суток. Модель  $f^{(ocb)}(t)$  может уточняться с учетом характеристик конкретных объектов.

Функции вероятности включения приборов построим на основании эмпирических трендовых (усредненных по достаточному интервалу времени) кривых электрической нагрузки объекта  $f^{(\GammaЭН)}(t)$ , приводимых в литературе. Эмпирическая кривая нормируется на величину электропотребления рассматриваемого объекта

$$f^{(C)}(t) = \alpha f^{(\GammaЭН)}(t), \quad (5)$$

где  $\alpha = \bar{L}_{\text{сут}} / \int f^{(\GammaЭН)}(t) dt$ .

С учетом модели (4) и заданного отношения средних мощностей приборов классов C0, C1 и C2 из  $f^{(C)}(t)$  выделяются части, связанные с работой приборов разных классов. Мощность приборов класса C0 постоянна и равна  $\tilde{P}^{(C0)}$ . Кривые электропотребления приборов классов C1 и C2 связаны через функцию  $f^{(ocb)}(t)$   $f^{(C1)}(t) = \beta f^{(C2)}(t) f^{(ocb)}(t)$ . Учитывая баланс  $f^{(C1)}(t) + f^{(C2)}(t) + \tilde{P}^{(C0)} = \alpha f^{(\GammaЭН)}(t)$ , получим уравнения для графиков нагрузки:

$$f^{(C2)}(t) = \frac{\alpha f^{(\GammaЭН)}(t) - \tilde{P}^{(C0)}}{\beta f^{(ocb)}(t) + 1}; \quad (6)$$

$$f^{(C1)}(t) = \alpha f^{(\GammaЭН)}(t) - f^{(C2)}(t) - \tilde{P}^{(C0)}; \quad (7)$$

$$\beta = \bar{L}_{\text{сут}}^{(C1)} / \int f^{(C2)} f^{(ocb)}(t) dt. \quad (8)$$

Система (6)–(8) решается итерациями; для первой итерации полагаем, например,  $\beta = 1 / \int f^{(ocb)}(t) dt$ .

Другие объекты электропотребления, представляющие интерес для имитационного моделирования, такие как малые сельскохозяйственные или лесохозяйственные предприятия, труднее поддаются формальному описанию ввиду специфики производств. Кроме потребителей обозначенных выше классов С0, С1 и С2 на таких объектах можно ввести классы технологических электропотребителей – оборудования малой  $\Delta P^{(C3)} = 0,5\text{--}10,0$  кВт, средней  $\Delta P^{(C4)} = 10\text{--}100$  кВт и большой  $\Delta P^{(C5)} = 100\text{--}1000$  кВт мощности. Диапазоны мощности и деление на классы здесь условны, не привязаны к нормативным документам промышленности. Временной закон включения/выключения технологических электропотребителей должен быть установлен с учетом особенностей процесса [26, 27].

Алгоритм имитационного моделирования нагрузки реализуется следующим образом. На первом этапе определяются суточные среднестатистические данные о потреблении электроэнергии приборами всех классов  $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C0)}$ ,  $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C1)}$ ,  $\bar{L}_{\text{сут}}^{(C2)}$ ; число приборов всех классов  $N^{(C0)}$ ,  $N^{(C1)}$ ,  $N^{(C2)}$ . Находятся пронумерованные множества (массивы) мощностей отдельных приборов классов С1  $\{P_1^{(C)}, P_2^{(C)}, \dots, P_N^{(C)}\}$  и С2  $\{P_1^{(C)}, P_2^{(C)}, \dots, P_N^{(C)}\}$ . Затем таблично или аналитически определяются: базовая функция – график электрической нагрузки объекта  $f^{(\GammaЭН)}(t)$ , функция необходимости освещения  $f^{(\text{осв})}(t)$ , задаются параметры функции плотности вероятности времени включения приборов классов С1 и С2 (в случае распределения Вейбулла  $k^{(C1)}$ ,  $\lambda^{(C1)}$  и  $k^{(C2)}$ ,  $\lambda^{(C2)}$ ).

На следующем этапе определяется количество раз включения приборов классов С1 и С2 в сутки. Для этого используется статистическое равенство

$$\bar{L}_{\text{сут}}^{(C)} = \sum_{i=1}^{V^{(C)}} P_{i\text{RAND}}^{(C)} \cdot M_{\text{WEI}}^{(C)}, \quad (9)$$

где  $V^{(C)}$  – количество включений приборов класса С в сутки;  $i\text{RAND}[1 \dots N^{(C)}]$  – целое случайное число из диапазона  $[1 \dots N^{(C)}]$ .

Число включений  $V^{(C)}$  найдется путем последовательного суммирования (8) до минимизации выражения  $\text{MIN} \left| \sum_{i=1}^{V^{(C)}} P_{i\text{RAND}}^{(C)} M_{\text{WEI}}^{(C)} - Q_{\text{сут}}^{(C)} \right|$ .

Соблюдение условия минимизации требуется для получения несмещенной оценки  $V^{(C)}$ .

Зная  $V^{(C)}$ , генерируем соответствующее количество случайных чисел из суточного временного диапазона, вероятность которых промодулирована кривыми суточной нагрузки (6) и (7) (плотностью вероятности включения). Соответствующая процедура строится по методу обратной функции и обозначена нами  $f\text{RAND}[0 \dots 86400, f^{(C)}]$ , где диапазон 86400 соответствует количеству секунд в сутках. Затем генерируется  $V^{(C)}$  случайных чисел  $\text{WeibRAND}[k^{(C)}, \lambda^{(C)}]$ , определяющих время нахождения соответствующих приборов во включенном состоянии. В результате получаем последовательность троек чисел (векторов), содержащих данные о приборе:

- 1) мощности;
- 2) времени включения;
- 3) времени выключения.

Данные заносятся в массив соответствующей размерности. Указанный набор векторов находится для всех классов электрических приборов, имеющихся на моделируемом объекте. Массивы дополняются друг другом таким образом, чтобы сформировался общий массив, содержащий данные обо всех случаях включения и выключения приборов за сутки.

Последним шагом алгоритма является сортировка векторов общего массива по возрастанию времени включения, в результате чего получаем модель электрической нагрузки системы в статистическом смысле, соответствующую заданным среднесуточным показателям нагрузки и реализующую уникальный вариант суточной электрической нагрузки данного объекта. Пример итогового варианта событий по алгоритму (10)–(13) показан в табл. 1. Для моделирования системы «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло можем сгенерировать необходимое количество реализаций графика электрической нагрузки.

Пример сгенерированной последовательности включения и выключения потребителей класса С1

Example of generated on-off sequence for consumers of class C1

Показатель прибора	Номер события								
	1	2	3	4	5	6	7	...	$V^{(C)}$
Время включения, с	25	290	3677	4501	4557	9012	9288		81544
Время выключения, с	228	650	3988	4539	4977	9117	9703		82011
Мощность, Вт	17	99	33	19	105	22	155		27

Для проверки алгоритма необходимо убедиться в том, что интегральная характеристика  $j$ -й реализации модели  $L_{сут,j}$  статистически сходится к исходному параметру модели  $\bar{L}_{сут}$ , т. е. выполняется условие

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{сут,j} \right) = \bar{L}_{сут} \quad (10)$$

Сходимость последовательности реализации ГЭН к среднему потреблению электроэнергии в течение суток от среднего по  $n$  последовательным реализациям показана на рис. 1.

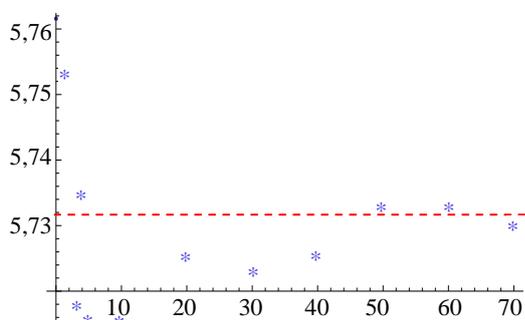


Рис. 1. Сходимость последовательности реализации графика электрических нагрузок к среднему потреблению электроэнергии в течение суток от среднего по  $n$  последовательным реализациям:

\* – модель 30-квартирного дома,  $\bar{L}_{сут} = 5,7321 \cdot 10^8$  Дж;  
штриховая линия – среднесуточное потребление электроэнергии

Fig. 1. Convergence of sequence in realization of electric load diagram to average consumption of electric power within 24 hours according to average  $n$  sequential realizations: \* – model of 30-apartment building,

$\bar{L}_{сут} = 5,7321 \cdot 10^8$  J; dashed line – average daily consumption of electric power

Из графика рис. 1 видно, что усредненные последовательности реализаций ГЭН хорошо

аппроксимируют среднее значение суточного потребления электроэнергии. Очевидно, что точность аппроксимации при большом количестве приборов высока и превышает характерную точность бытовых измерений параметров нагрузки. Для модельного 30-квартирного дома число включений приборов в течение суток колеблется в пределах 5900. Для объектов, на которых реализуется небольшое количество включений/выключений потребителей (десятки и сотни), точность аппроксимации будет меньше.

### Расчет детального графика электрической нагрузки модельного объекта

Приведем пример оценки параметров модели и расчета имитационного ГЭН для объекта – многоквартирный дом. Для получения первичной информации проводили простейшее анкетирование. От группы граждан были получены анонимные сведения об электробытовом оснащении квартир, в которых они проживают, или квартир, с электробытовым оснащением которых они досконально знакомы. Все сведения собирали в электронную таблицу, как, например, табл. 2.

При достаточном объеме и репрезентативности такой информации могут быть построены достоверные корреляции величин  $A$  и  $B$  со всеми прочими параметрами, а следовательно, смоделированы любые жилищно-бытовые блоки. В качестве примера рассмотрим многоквартирный дом, в котором имеется 10 однокомнатных, 10 двухкомнатных и 10 трехкомнатных квартир. Используя полученные статистические данные, установили, что данный объект включает 137 потребителей класса С0, 218 – С1 и 178 – класса С2. Значения других входных параметров модели приведены в табл. 3.

Таблица 2

Данные для оценки параметров модели электрической нагрузки  
Data for assessment of parameters for electric load model

Число проживающих в квартире <i>A</i>	Число жилых комнат <i>B</i>	Количество потребителей, шт., класса			Среднемесячный объем потребления электроэнергии, кВт·ч $\tilde{L}_{month}$
		C0	C1	C2	
		$N^{(C0)}$	$N^{(C1)}$	$N^{(C2)}$	

Таблица 3

Параметры статистической модели электрической нагрузки модельного 30-квартирного дома  
Parameters of statistical electric load model for model 30-apartment building

Класс потребителя	Число потребителей	Среднесуточная мощность, кВт	Амплитуда вероятности включения	Модуль Вейбулла <i>k</i>	Параметр формы Вейбулла $\lambda$ , с
C0	137	0,274	Const	–	–
C1	218	1,592	$f^{(C1)}(t)$ , по (7)	2	1162
C2	178	4,776	$f^{(C2)}(t)$ , по (6)	2	120
Параметры $f^{(ocb)}(t)$	$t_{ii} = 28800$ с; $t_{dar} = 64800$ с; $t_{1h} = 3600$ с; $t_{4h} = 1440$ с; $\Delta t_{ocb} = 3600$ с				

Для функции необходимости освещения используем модель (4) с метеорологическими параметрами, соответствующими середине декабря. В качестве  $f^{(ГЭН)}(t)$  возьмем график суточного электропотребления многоквартирного дома серии Домкон-1 [10]. Используя эти данные и уравнения (6), (7), определяем функции вероятности  $f^{(C1)}(t)$  и  $f^{(C2)}(t)$  включения приборов классов C1 и C2. Далее, принимая параметры статистической модели из табл. 3, строим реализацию суточного графика нагрузки, создаваемой модельным 30-квартирным домом (рис. 2).

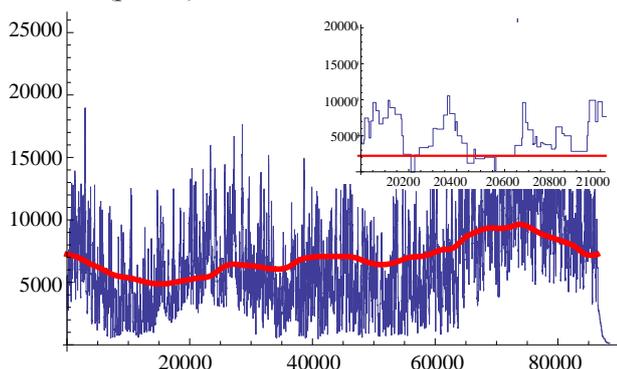


Рис. 2. Имитационный суточный график электрической нагрузки модельного многоквартирного дома: врезка – участок графика на интервале 20000–22000 с

Fig. 2. Simulation daily diagram of electric load for model multi-apartment building: insert – diagram section within interval 20000–22000 s

Приведенные на рис. 3, 4 графики являются уникальными реализациями модели потребления и могут быть использованы для имитационных и статистических исследований локальных потребителей электроэнергии, отладки систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ), системы «генератор – накопитель – потребитель» и для других исследовательских целей.

Имитационных и статистических исследований локальных потребителей электроэнергии, отладки систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ), системы «генератор – накопитель – потребитель» и для других исследовательских целей.

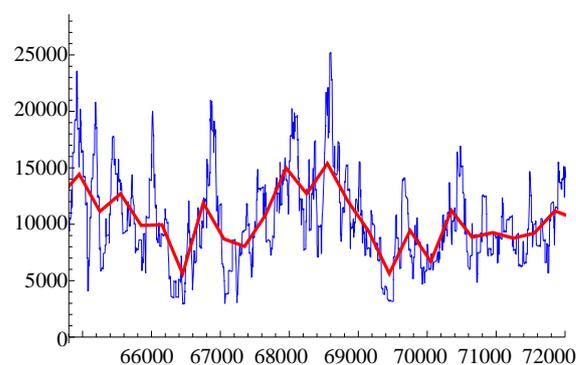


Рис. 3. Имитационный график нагрузки модельного многоквартирного дома: красная линия – 10-минутное усреднение имитационного графика

Fig. 3. Simulation diagram of load for model multi-apartment building: red line – 10-minute averaging of simulation diagram

Из графика видно, что для рассматриваемых систем кратковременные нагрузки могут существенно превосходить усредненные нагрузки даже при малых интервалах усреднения порядка 3–10 мин. Особенно заметен этот эффект при умеренном количестве потребителей (около сотни). В представленном на рис. 3 расчетном случае амплитуда отклонения от среднего достигает 1000 %, тогда как отклонение усредненной (10-минутное усреднение) кривой – до 25 %.

Выполнив дискретное преобразование Фурье, получим спектральную характеристику графика электрической нагрузки рассматриваемого объекта (рис. 4).

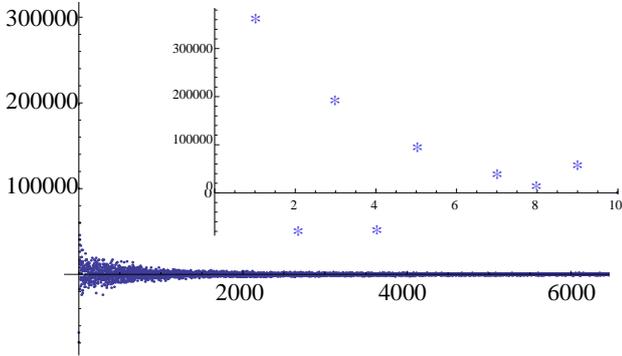


Рис. 4. Спектр дискретного cos-Фурье-преобразования имитационного суточного графика нагрузки модельного 30-квартирного жилого дома: врезка – амплитуды первых девяти дискретных частот cos-Фурье-спектра

Fig. 4. Spectrum of discrete cos-Fourier transformation of simulation daily load diagram for model 30-apartment building: insert – amplitude of first nine discrete frequencies of cos-Fourier spectrum

Как видно из рис. 4, спектр частот cos-Фурье-преобразования носит стохастический характер на всей области определения. Только на минимальных частотах имеются максимумы, которые отвечают низкочастотным суточным ритмам активности потребителей электроэнергии. В целом картина Фурье-спектра свидетельствует о стохастичности нагрузки и в этом смысле – о соответствии графика нагрузки предпосылкам модели. Увеличение количества потребителей не приводит к качественным изменениям дискретного cos-Фурье-спектра графика электрической нагрузки.

Рассмотрим автокорреляционную функцию (АФ) полученного графика нагрузки, позволяющую судить о качественных характеристиках кривой [28]. Расчет АФ проведем по формуле

$$K(m) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} P_i \cdot P_{i+m} - P_c^2, \quad (11)$$

где  $P_i$  – значение случайной составляющей ГЭН в  $i$ -й момент времени при разбиении области, определенной ГЭН на  $n$  дискретных интервалах;  $P_{i+m}$  – значение в  $(i+m)$ -й момент времени;  $P_c$  – среднее значение случайной составляющей ГЭН;  $m$  – сдвиг по времени в единицах дискретных интервалов разбиения ГЭН.

Нормированная АФ определена как  $k(m) = \frac{K(m)}{K(0)}$ . Расчетное значение нормированной автокорреляции  $k(m)$  в зависимости от времени сдвига приведено на рис. 5.

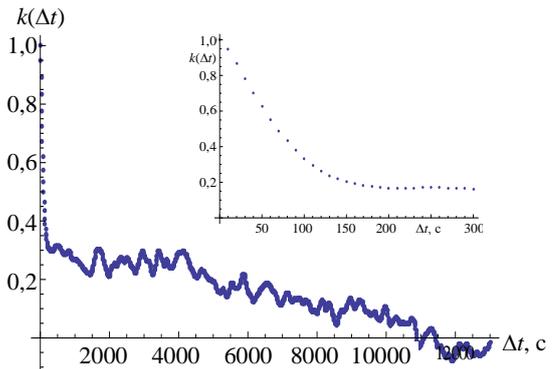


Рис. 5. Автокорреляционная функция имитационного графика нагрузки модельного 30-квартирного дома: врезка – участок графика для времени до 300 с

Fig. 5. Autocorrelation function of simulation load diagram for model 30-apartment building: insert – diagram section for time up to 300 s

Из графика рис. 5 видно, что АФ быстро падает до значения  $K \sim 0,3$  при времени корреляции примерно 100 с, а затем продолжает убывать при времени порядка 4–6 ч. Заметим, что времена автокорреляции ГЭН многоквартирных домов, представленные в [9], составляют около 5 ч и фактически характеризуют трендовые периодические колебания ГЭН. На графике рис. 5 также присутствует 4-часовой масштаб автокорреляции, но при этом имеется 100-секундный масштаб автокорреляции, связанный с характерным временем включения/выключения мощных бытовых приборов. Очевидно, что данная особенность не может проявиться на графиках нагрузки, усредненных на интервалах 3, 10 и более минут.

## ВЫВОДЫ

1. Изложен простой подход к детальному имитационному моделированию электропотребления относительно небольших объектов, таких как многоквартирный дом или небольшое сельскохозяйственное производство. Модель сформулирована как в физическом, так и в алгоритмическом виде, что позволяет легко реализовать ее в любой среде программирования. Показана сходимость интегрального потребления электроэнергии, задаваемого моделью, к статистически средним параметрам.

2. Расчет по предложенной модели показывает, что реальные кратковременные нагрузки, которые влияют на режим эксплуатации накопительных устройств, существенно отличаются от нагрузок, усредненных на масштабах времени порядка минут, и должны учитываться при проектировании накопителей для небольших автономных систем. На основе имитации графиков электрических нагрузок построены автокорреляционные функции. Показано, что такие

функции имеют два характерных масштаба автокорреляции – первый порядка 100 с и второй около 4–6 ч. Меньший масштаб связан с временем работы мощных бытовых приборов, относимых к классу С2, а больший масштаб соответствует суточному волнообразному ритму бытовой активности в многоквартирном доме.

3. Фурье-спектры сгенерированных графиков нагрузок в первую очередь демонстрируют наличие низкочастотных осцилляций потребления электроэнергии, связанных с указанными выше факторами. В остальной области частот Фурье-спектр является практически хаотичным, что свидетельствует о достаточно хорошем воспроизведении «случайности» событий включения/выключения нагрузки в модели.

4. Проведенные исследования – первый шаг для построения универсальной системы тестирования и оптимизации работы накопителей в различных системах «генератор – накопитель – потребитель». На основе приведенных алгоритмов может быть построена методика тестирования систем накопления энергии и оценки их эффективности при работе в заданных технико-экономических условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мировой рынок накопителей энергии [Электронный ресурс] // Региональная энергетическая консалтинговая компания. Режим доступа: <http://mig-energo.ru/diod/kineticheskie-nakopiteli-energii/mirovoj-gynok-nakopitelej-energii/>. Дата доступа: 15.01.2017.
2. О внесении изменений в постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2013 г. № 1166 и определении тарифов на некоторые виды жилищно-коммунальных услуг [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 16.12.2016, № 1035 [Электронный ресурс] // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. Режим доступа: [http://www.cgis.by/downloads/legislation/1035\\_20161216.pdf](http://www.cgis.by/downloads/legislation/1035_20161216.pdf). Дата доступа: 15.01.2017.
3. Powerwall 2 [Electronic Resource] // Tesla Inc. Mode of Access: <https://www.tesla.com/powerwall>. Date of Access: 15.01.2017.
4. Electric Grid [Electronic Resource] // Altairnano Company. Mode of access: <http://www.altairnano.com/solutions/electric-grid/>. Date of Access: 15.01.2017.
5. Накопитель «Экомоторс» 7 кВт·ч [Электронный ресурс] // ООО «Экомоторс». Режим доступа: <http://ecomotors.ru/index.php?productID=2977>. Дата доступа: 15.01.2017.
6. A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications / F. Díaz-González [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, No 4. P. 2154–2171.
7. Technology Overview on Electricity Storage: Overview on the Potential and on the Deployment Perspectives of Electricity Storage Technologies / G. Fuchs, B. Lunz, M. Leuthold, D. U. Sauer. Aachen: Smart Energy For Europe Platform GmbH (SEFEP), 2012. 66 p.
8. Оценка накопителей энергии с помощью их передаточных функций / К. В. Доброго [и др.] // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах: сб. материалов науч.-практ. конф., Минск 22 апр. 2016 г. Минск: РИВШ, 2016. С. 102–104.
9. Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems: Technology, Energy Storage and Applications / Ed. by J. L. Kaldellis. Woodhead Publishing Limited, 2010. P. 554.
10. Павлов, А. В. Повышение точности расчетов электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов / А. В. Павлов // НПИ имени М. И. Платова. Новочеркасск, 2016. 22 с.
11. Кудрин, Б. И. Расчет электрических нагрузок потребителей: история, состояние, комплексный метод / Б. И. Кудрин // *Промышленная энергетика*. 2015. № 5. С. 14–22.
12. Нормативы для определения расчетных электрических нагрузок зданий (квартир), коттеджей, микрорайонов (кварталов) застройки и элементов городской распределительной сети. Изменения и дополнения раздела 2 «Расчетные электрические нагрузки» Инструкции по проектированию городских электрических сетей: РД 34.20.185–94. Утв. приказом Минтопэнерго от 29.06.1999 № 213. М.: Москов. науч.-техн. общ-во энергетиков и электротех., 1999. 13 с.
13. Инструкция по проектированию городских электрических сетей: РД 34.20.185–94. М.: Мин-во топлива и энерг. Рос. Фед., 1994. 29 с.
14. Фокин, Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю. А. Фокин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
15. Жежеленко, И. В. Развитие методов расчета электрических нагрузок / И. В. Жежеленко, В. П. Степанов // *Электричество*. 1993. № 2. С. 1–9.
16. Тарнижевский, М. В. Моделирование суточных графиков электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей методом ортогональных разложений / М. В. Тарнижевский, В. И. Михайлов // *Электричество*. 1985. № 5. С. 66–68.
17. Гнеденко, Б. В. Теоретико-вероятностные основы статистического метода расчета электрических нагрузок промышленных предприятий / Б. В. Гнеденко // *Изв. вузов СССР, сер. «Электромеханика»*. 1961. № 1. С. 90–99.
18. Кабышев, А. В. Электроснабжение объектов. Ч. 1: Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования / А. В. Кабышев. Томск: Изд-во Томс. политехн. ун-та, 2007. 185 с.
19. Вероятностное потокораспределение как реакция на стохастичность нагрузки в энергосистеме / А. М. Гашимов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 519–528.
20. Лоскутов, А. Б. Методы имитационного моделирования графиков нагрузки на ЭВМ / А. Б. Лоскутов // *Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий*. М.: Энергоатомиздат, 1992. С. 148–152.
21. Beccali, M. Forecasting Daily Urban Electric Load Profiles Using Artificial Neural Networks / M. Beccali // *Journal on Energy Conversion and Management*. 2004. Vol. 45, No 18–19. P. 2879–2900.
22. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк [и др.]. М.: Наука, 1985. 640 с.
23. Weibull, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability / W. Weibull // *J. Appl. Mech.-Trans. ASME*. 1951. Vol. 18, No 3. P. 293–297.
24. Задачник по общей метеорологии / А. Г. Броидо [и др.]. Л.: Гидрометеониздат, 1984. С. 312.
25. Almanac for Computers, 1990, publ. Nautical Almanac Office, United States Naval Observatory, Washington.
26. Лещинская, Т. Б. Электроснабжение сельского хозяйства / Т. Б. Лещинская, И. В. Наумов. М.: КолосС, 2008. 655 с.

27. Агеев, С. П. Расчет выбросов графиков нагрузки электрических сетей лесопильного цеха / С. П. Агеев // Изв. вузов, Электромеханика. 2013. № 5. С. 63–67.
28. Лобанова, О. В. Экспериментальная оценка корреляционных функций графиков электрической нагрузки / О. В. Лобанова, В. П. Степанов, Г. Л. Фомин // Изв. вузов. Электромеханика. 1996. № 3–4. С. 101.

Поступила 22.12.2016

Подписана в печать 21.02.2017

Опубликована онлайн 28.03.2017

#### REFERENCES

- World Market of Energy Accumulators System. *Regional Power Engineering Consulting Company*. Available at: <http://mig-energo.ru/diod/kineticheskie-nakopiteli-energii/mirovoj-rynok-nakopitelej-energii/>. (Accessed 15 January 2017) (in Russian).
- Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated 16.12.2016 No 1035. *National Center of Legal Information*. Available at: <http://ncpi.gov.by/>. (Accessed 15 January 2017) (in Russian).
- Powerwall 2. *Tesla Inc*. Available at: <https://www.tesla.com/powerwall>. (Accessed 15 January 2017).
- Electric Grid. *Altairnano Company*. Available at: <http://www.altairnano.com/solutions/electric-grid/>. (Accessed 15 January 2017).
- 7 kW-h Accumulating System of “Ekomotors” Company. *LLC “Ekomotors”*. Available at: <http://ecomotors.ru/index.php?productID=2977>. (Accessed 15 January 2017).
- Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villa-fañila-Robles R. (2012) A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (4), 2154–2171. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.029.
- Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D. U. (2012) *Technology Overview on Electricity Storage: Overview on the Potential and on the Deployment Perspectives of Electricity Storage Technologies*. Aachen, Germany, Smart Energy For Europe Platform GmbH (SEFEP). 66. DOI: 10.13140/RG.2.1.5191.5925.
- Dobrego K. V., Chervinskii V. L., Poleshchuk V. A., Efremenko N. V. (2016) Assessment of Energy Accumulators with the Help of Their Transfer Functions. *Informatsionnye Tekhnologii v Tekhnicheskikh i Sotsialno-Ekonomicheskikh Sistemakh: Sb. Materialov Nauch.-Prakt. Konf., Minsk 22 apr. 2016 g.* [Information Technologies in Technical and Social and Economic Systems: Proceedings of Scientific and Practical Conference]. Minsk, Republican Institute for Higher School, 102–104 (in Russian).
- Kaldellis J. L. (ed.) (2010) *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems: Technology, Energy Storage and Applications*. Woodhead Publishing Limited, 554. DOI: 10.1533/9781845699628.
- Pavlov A. V. (2016) *Improvement of Accuracy in Calculation of Electric Loads for Communal and Household Consumers of Residential Complexes in Megalopolis*. Novocherkassk. 22 (in Russian).
- Kudrin B. I. (2015) Calculation of Electric Loads for Consumers: History, Current Position, Integrated Method. *Promyshlennaya Energetika* [Industrial Power Engineering], (5), 14–22 (in Russian).
- Norms and Regulations for Determination of Design Electric Loads for Buildings (Apartments), Cottages, Residential Complexes (House Blocks) of Urban Development and Elements of Urban Power Distribution Network. Alterations and Additions to Section 2 “Design Electric Loads”. Engineering Instructions on Urban Power Network ПД 34.20.185–94. Approved by the Order of Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation Dated 29.06.1999 No 213. Moscow, Publishing House of “Moscow Scientific and Technical Association of Power Electrical Engineers”, 1999. 13 (in Russian).
- ПД 34.20.185–94. Engineering Instructions on Urban Power Network. Moscow, Publishing House of “Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation”, 1994. 29 (in Russian).
- Fokin Yu. A. (1985) *Probabilistic and Statistical Methods for Calculation of Power Supply Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 240 (in Russian).
- Zhezhenko I. V., Stepanov V. P. (1993) *Development of Methods for Calculation of Electric Loads*. *Elektrichestvo* [Electricity], (2), 1–9 (in Russian).
- Tarnizhevsky M. V., Mikhailov V. I. (1985) Simulation of Daily Load Diagrams for Communal and Household Consumers while Using Method of Orthogonal Decompositions. *Elektrichestvo* [Electricity], (5), 66–68 (in Russian).
- Gnedenko B. V. (1961) Theoretical and Probabilistic Fundamentals of Statistical Method for Calculation of Electric Loads at Industrial Enterprises. *Izv. Vuzov SSSR. Ser. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], (1), 90–99 (in Russian).
- Kabyshev A. V. (2007) *Electric Power Supply of Installations. Part. 1. Calculation of Electric Loads, Heating of Conductors and Electrical Equipment*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 185 (in Russian).
- Hashimov A. M., Rakhmanov N. R., Guliyev G. B., Rakhmanov R. N., Mustafayev A.A. (2016) Probabilistic Flow Distribution as Reaction to Load Stochasticity in Electric Power System. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 519–528 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-519-528.
- Loskutov A. B. (1992) Methods for Imitation Modeling of Load Diagrams while Using Electronic Computing Machine. *Calculations of Electric Loads for Electric Power Supply Systems of Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 148–152 (in Russian).
- Beccali M. (2004) Forecasting Daily Urban Electric Load Profiles Using Artificial Neural Networks. *Journal on Energy Conversion and Management*, 45 (18–19), 2879–2900. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.01.006.
- Korolyuk V. S., Portenko N. I., Skorokhod A. V., Turbin A. F. (1985) *Reference Book on Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Nauka Publ. 640 (in Russian).
- Weibull W. A (1951) Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *J. Appl. Mech.-Trans. ASME*, 18 (3), 293–297.
- Broido A. G., Zvereva S. V., Kurbatova A. V., Ushakova T. V., Morachevskii V. G. (1984) *Problem Book on General Meteorology*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 312 (in Russian).
- Almanac for Computers, 1990, publ. Nautical Almanac Office, United States Naval Observatory, Washington.
- Leshchinskaya T. B., Naumov I. V. (2008) *Electric Power Supply of Agriculture*. Moscow, KolosS Publ. 655 (in Russian).
- Ageev S. P. (2013) Calculation of Emissions for Load Diagrams of Electrical Power Network at Saw Mill. *Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], (5), 63–67 (in Russian).
- Lobanova O. V., Stepanov V. P., Fomin G. L. (1996) Experimental Assessment of Correlation Functions for Electric Load Diagrams. *Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], (3–4), 101 (in Russian).

Received: 22.12.2016

Accepted: 21.02.2017

Published online: 28.03.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-171-176

УДК 536.24

## Исследование магнитного режима трехфазного трансформатора с симметричным магнитопроводом рамной конструкции

Канд. техн. наук, доц. А. А. Мазуренко<sup>1)</sup>, студ. Е. Т. Смирнов<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Исследован магнитный режим трехфазного трансформатора с симметричным магнитопроводом рамной конструкции на схемной модели. Схема состояла из трех нелинейных катушек, соединенных звездой без нулевого провода. Вебер-амперные характеристики катушек соответствовали одноименным параметрам отдельных рам магнитопровода. Принимали, что магнитный поток каждой рамы замыкается на себя, не переходя в другую раму магнитопровода. Электромагнитное состояние схемы замещения описывали системой дифференциальных уравнений, которые решали с помощью стандартной программы MathCad. В результате рассчитаны функции магнитной индукции рамы и намагничивающего тока и их гармонические составы, определена зависимость реальной амплитуды индукции магнитного поля от амплитуды индукции основной гармоники. В процессе проведения экспериментов выявлено, что: амплитуда индукции основной гармоники магнитного поля в рамках магнитопровода больше расчетного значения индукции на 15,5 %; вследствие нелинейности вебер-амперных характеристик рам и свойств трехфазной системы в функциях магнитной индукции отдельных рам возникают гармонические составляющие, кратные трем; высшие гармоники функции магнитной индукции рамы, накладываясь на основную гармонику, уменьшают реальную амплитуду индукции магнитного поля практически до расчетного значения индукции в рабочем диапазоне реальной амплитуды, при этом коэффициенты высших гармоник изменяются незначительно; в намагничивающих токах отсутствуют гармонические составляющие, кратные трем.

**Ключевые слова:** трехфазный трансформатор, магнитопровод, рамная конструкция, высшие гармоники, магнитный режим

**Для цитирования:** Мазуренко, А. А. Исследование режима трехфазного трансформатора с симметричным магнитопроводом рамной конструкции / А. А. Мазуренко, Е. Т. Смирнов // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 171–176. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-171-176

## Investigation of Magnetic Mode for 3-Phase Transformer with Symmetrical Magnetic Conductor of Frame Design

А. А. Mazurenko<sup>1)</sup>, Е. Т. Smirnov<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Magnetic mode for 3-phase transformer with symmetrical magnetic conductor of frame design has been investigated on schematic model. The scheme consists of three non-linear coils having star-connection without zero wire. Weber-ampere characteristics correspond to similar parameters of separate frames of a magnetic conductor. It has been accepted that a magnetic flow of every frame is closed on itself without passing into other frame of the magnetic conductor. Electromagnetic state of equivalent diagram has been described by a system of differential equations which were solved with the help of MathCad program. Investigations have resulted in calculation of functions for magnetic frame induction and magnetizing

### Адрес для переписки

Мазуренко Анатолий Аркадьевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-71-93  
EiE@bntu.by

### Address for correspondence

Mazurenko Anatoliy A.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-71-93  
EiE@bntu.by

current and their harmonic compositions; dependence of actual amplitude for magnetic field induction on amplitude of the main harmonic induction has been determined in the paper. While executing experiments it has been revealed the following: induction amplitude of the main harmonic in the magnetic field within frames of the magnetic conductor is higher in comparison with the design induction value by 15.5 %; due to non-linearity of weber-ampere characteristics in frames and properties of 3-phase system harmonic components, which are multiple of three, are initiated in the functions of magnetic induction for separate frames; high-order harmonics of function for magnetic frame induction being imposed on the main harmonic decrease an actual amplitude of magnetic field induction practically up to the design induction value within the operational range of the actual amplitude and in this context coefficients of high-order harmonics change insignificantly; harmonic components, which are multiple of three, are absent in magnetizing currents.

**Keywords:** three-phase transformer, magnetic conductor, frame design, high-order harmonics, magnetic mode

**For citation:** Mazurenko A. A., Smirnov E. T. (2017) Investigation of Magnetic Mode for 3-Phase Transformer with Symmetrical Magnetic Conductor of Frame Design. *Science and Technique*. 16 (2), 171–176. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-171–176 (in Russian)

## Введение

В процессе проведения экспериментальных работ авторами выполнено исследование магнитного режима в магнитопроводе рамной конструкции трехфазного трансформатора. Конструктивно магнитопровод состоял из трех одинаковых О-образных рам [1], изготовленных путем намотки ленты из холоднокатаной стали [2]. Ширина ленты при намотке изменялась таким образом, чтобы отдельные рамы в сечении имели форму полукруга. Смежные рамы стыковались боковыми плоскостями, образуя стержни магнитопровода практически с круговым сечением. Такая конструкция имеет свои особенности [3]:

- 1) магнитная система является полностью симметричной по фазам;
- 2) отсутствие стыков в продольном направлении значительно уменьшает продольное магнитное сопротивление;
- 3) наличие стыка между боковыми плоскостями рам препятствует переходу магнитного потока из одной рамы в другую.

Своеобразие формы магнитопровода рамной конструкции обуславливает магнитный режим, который существенно отличается от режимов известных форм магнитопроводов и поэтому требует специального рассмотрения [4]. Внешний вид магнитопровода представлен на рис. 1.

Пространственный магнитопровод рамной конструкции является симметричным. Из этого следует, что при симметричном первичном напряжении трехфазного трансформатора параметры магнитного поля в отдельных рамах будут изменяться одинаково во времени со сдвигом на  $1/3$  периода. В конструкции магни-

топровода между рамами имеется незначительный воздушный зазор, магнитное сопротивление которого во много раз превышает продольное магнитное сопротивление. Это приводит к тому, что магнитные потоки практически не переходят из одной рамы в другую, а замыкаются по пути наименьшего сопротивления, т. е. по контурам рам. Таким образом, отдельные рамы образуют самостоятельные контуры магнитной цепи, по которым замыкаются магнитные потоки.

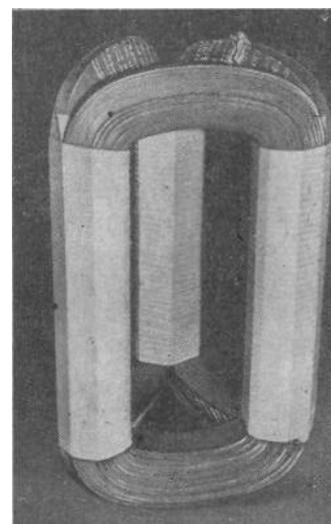


Рис. 1. Внешний вид магнитопровода рамной конструкции

Fig. 1. External view of magnetic conductor having frame design

## Анализ магнитного режима магнитопровода рамной конструкции

Магнитная цепь магнитопровода может быть представлена эквивалентной схемой замещения с нелинейными магнитными сопротивлениями (рис. 2) [5].

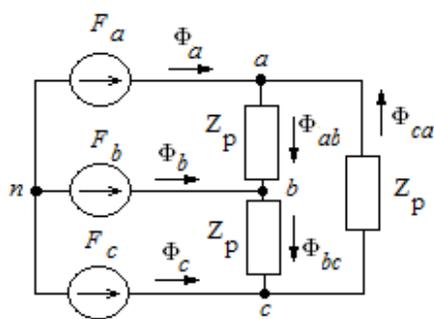


Рис. 2. Эквивалентная схема магнитопровода рамной конструкции при отсутствии магнитной связи между рамами:  $Z_p$  – магнитное сопротивление рамы;  $F_a, F_b, F_c$  – магнитодвижущая сила обмоток фаз трансформатора;  $a, b, c$  – фазы;  $n$  – нейтральная точка;  $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  – фазное значение;  $\Phi_{ab}, \Phi_{bc}, \Phi_{ca}$  – межфазное значение

Fig. 2. Equivalent diagram of magnetic conductor having frame design without magnetic coupling between frames:  $Z_p$  – magnetic resistance of frame;  $F_a, F_b, F_c$  – magneto-motive force in windings of transformer phases;  $a, b, c$  – phases;  $n$  – neutral point;  $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  – phase value;  $\Phi_{ab}, \Phi_{bc}, \Phi_{ca}$  – inter-phase value

Нелинейные вебер-амперные характеристики магнитных сопротивлений рам  $u(\Phi)$  рассчитываются по основной кривой намагничивания материала исходя из геометрических размеров магнитопровода [6, 7]:

$$u_a = a\Phi_a + b\Phi_a^9; \quad (1)$$

$$u_b = a\Phi_b + b\Phi_b^9; \quad (2)$$

$$u_c = a\Phi_c + b\Phi_c^9, \quad (3)$$

где  $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  – мгновенное значение магнитного потока для фаз  $a, b, c$ .

В принятой схеме замещения линейные магнитные потоки стержней  $\Phi_a(t), \Phi_b(t), \Phi_c(t)$  определяются фазными напряжениями трансформатора; они симметричны и имеют синусоидальную форму. Амплитудные значения магнитных потоков находим по формуле

$$\Phi_m = \frac{U_{\max}}{w\omega}, \quad (4)$$

где  $U_{\max}$  – максимальное фазное напряжение;  $w$  – количество витков;  $\omega$  – угловая частота.

Расчетную амплитуду магнитной индукции в стержнях магнитопровода  $B_{mr}$  определяли в предположении, что магнитные потоки равномерно распределены по сечению стержня

$$B_{mr} = \frac{\Phi_m}{2S}, \quad (5)$$

где  $\Phi_m$  – магнитный поток;  $S$  – сечение стержня.

Исходя из свойства симметричной трехфазной системы, амплитуды основной гармоники магнитных потоков в рамах  $\Phi_{abm}$  будут меньше амплитуды магнитных потоков стержней  $\Phi_{am}$  в  $\sqrt{3}$  раз:

$$\Phi_{abm} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Phi_{am}. \quad (6)$$

Соответственно амплитуда индукции  $B_{1m}$  основной гармоники магнитного поля в рамах составит

$$B_{1m} = \frac{\Phi_{abm}}{S} = \frac{2}{\sqrt{3}} B_{mr} = 1,15 B_{mr}. \quad (7)$$

Своеобразие магнитного режима заключается в том, что нелинейность вебер-амперных характеристик магнитных сопротивлений рам приведет к искажению формы кривых магнитных потоков рам  $\Phi_{ab}(t), \Phi_{bc}(t), \Phi_{ca}(t)$  и появлению в их спектрах высших гармоник, кратных трем. Эти гармоники в смежных полустержнях будут направлены встречно и не будут индуцировать ЭДС в обмотках трансформатора. Реальная амплитуда индукции магнитного поля в рамах  $B_{\max}$  определится совокупным гармоническим составом функции магнитной индукции рамы  $b(t)$ .

### Расчет магнитного режима

Расчет магнитного режима непосредственно в эквивалентной схеме замещения (рис. 2) связан со значительными математическими трудностями [8, 9]. Для получения более простого и компактного решения авторами предложена математическая модель-схема, представленная на рис. 3.

Исследуемая схема состоит из трех отдельных (несвязанных) нелинейных катушек индуктивности, подключенных по схеме звезды без нулевого провода к симметричному трехфазному генератору с фазными напряжениями:

$$u_a(t) = U_m \sin \omega t; \quad (8)$$

$$u_b(t) = U_m \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (9)$$

$$u_c(t) = U_m \sin(\omega t + 120^\circ), \quad (10)$$

где  $U_m$  – фазное напряжение;  $t$  – время.

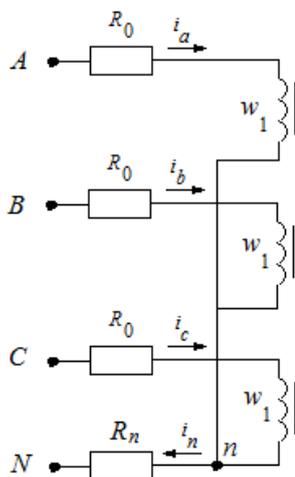


Рис. 3. Математическая модель-схема трансформатора:

$i_a, i_b, i_c$  – фазные токи;  $i_n$  – ток в нейтральном проводе;  
 $w_1$  – количество витков в обмотке;  $R_0$  – активное сопротивление нелинейных катушек;  
 $R_n$  – сопротивление на нулевом проводе;  
 $A, B, C, N$  – фазы;  $n$  – нейтральная точка

Fig. 3. Mathematical model diagram of transformer:

$i_a, i_b, i_c$  – phase currents;  $i_n$  – current in neutral wire;  
 $w_1$  – number of turns in winding;  $R_0$  – active resistance in non-linear coils;  $R_n$  – resistance in zero wire;  
 $A, B, C, N$  – phases;  $n$  – neutral point

Вебер-амперные характеристики катушек  $i(\psi)$  рассчитывали для отдельных рам магнитопровода и аппроксимировали степенным полиномом вида

$$i = a\psi + b\psi^9. \quad (11)$$

Как следует из свойства симметричной трехфазной системы, при отсутствии нулевого провода гармоники, кратные трем, будут отсутствовать в фазных токах  $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ , и наряду с основной гармоникой появятся в фазных напряжениях  $u_{an}(t), u_{bn}(t), u_{cn}(t)$  и соответственно в магнитных потоках  $\psi(t)$  и магнитных потоках  $\phi_{ab}(t), \phi_{bc}(t), \phi_{ca}(t)$  катушек.

Следует отметить, что магнитный режим отдельных катушек на рис. 3 полностью соответствует магнитному режиму в рамках магнитопровода рис. 2. На рис. 3 последовательно с нелинейными катушками включены сравни-

тельно небольшие по величине сопротивления  $R_0$ , а в нулевой провод – достаточно большое сопротивление  $R_n$  ( $\approx 1000R_0$ ). Наличие этих элементов в расчетной схеме не приводит к существенным погрешностям в вычислениях, но позволяет решить систему дифференциальных уравнений численным методом на ЭВМ по стандартной программе.

Электрическое состояние расчетной схемы на рис. 3 описывается системой уравнений Кирхгофа в дифференциальной форме, которая дополняется уравнениями аппроксимации вебер-амперных характеристик  $i(\psi)$  для отдельных катушек:

$$i_n = i_a + i_b + i_c; \quad (12)$$

$$i_a R_0 + \frac{d}{dt} \psi_a + i_n R_n = u_a(t); \quad (13)$$

$$i_b R_0 + \frac{d}{dt} \psi_b + i_n R_n = u_b(t); \quad (14)$$

$$i_c R_0 + \frac{d}{dt} \psi_c + i_n R_n = u_c(t); \quad (15)$$

$$i_a = a\psi_a + b\psi_a^9; \quad (16)$$

$$i_b = a\psi_b + b\psi_b^9; \quad (17)$$

$$i_c = a\psi_c + b\psi_c^9. \quad (18)$$

Систему дифференциальных уравнений решали численным методом в MathCad по программе Rkadapt [10]. В результате получены функции потокосцеплений катушек  $\psi_a(t), \psi_b(t), \psi_c(t)$  и магнитных индукций  $b_a(t), b_b(t), b_c(t)$ , а также функции намагничивающих токов  $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ . Далее выполняли гармонический анализ полученных функций. Амплитуду индукции основной гармоники  $B_{1m}$  задавали фазным напряжением  $U_m$ . Исследование проводили в диапазоне  $B_{1m}$ , равном 0,7–2,1 Тл. Диаграммы функций намагничивающего тока  $i_a(t)$  и магнитной индукции рамы  $b_a(t)$  и их гармонических составов показаны на рис. 4, 5, а значения индукций – в табл. 1.

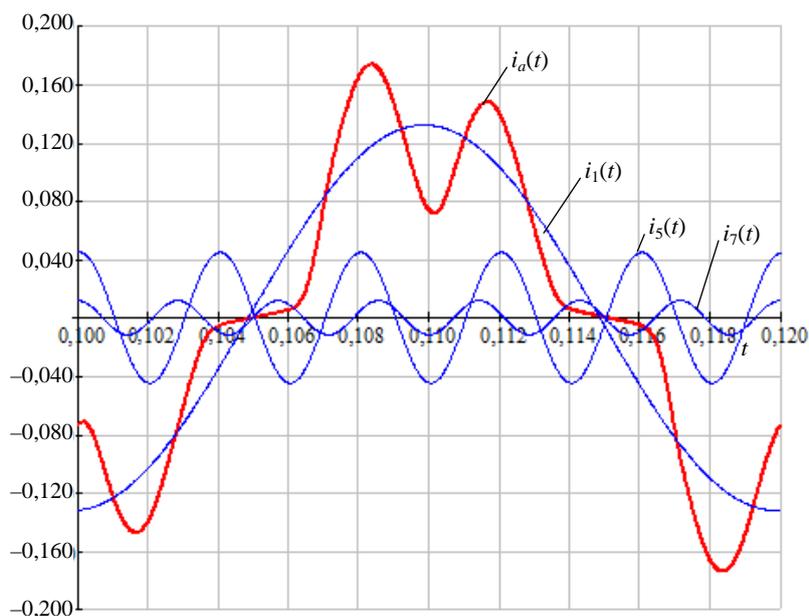


Рис. 4. Диаграмма функции намагничивающего тока  $i_a(t)$  и его гармонический состав:  $i_1(t)$ ,  $i_5(t)$ ,  $i_7(t)$  – функции соответствующих гармоник  $i_a(t)$

Fig. 4. Function diagram of magnetizing current  $i_a(t)$  and its harmonic composition:  $i_1(t)$ ,  $i_5(t)$ ,  $i_7(t)$  – functions of corresponding harmonics  $i_a(t)$

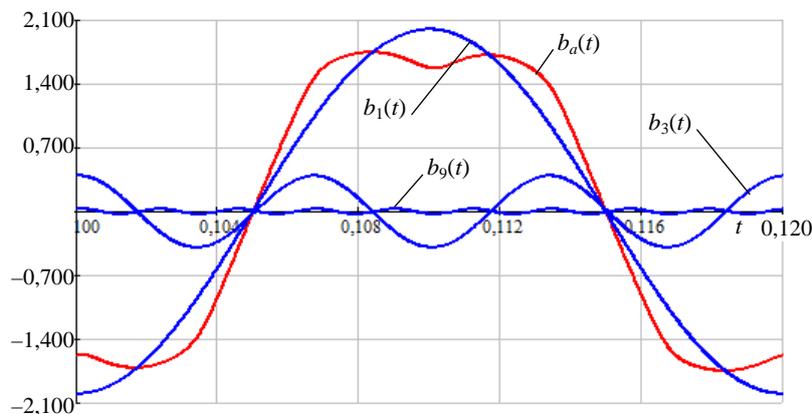


Рис. 5. Диаграмма функции магнитной индукции рамы  $b_a(t)$  и ее гармонический состав:  $b_1(t)$ ,  $b_3(t)$ ,  $b_9(t)$  – функции соответствующих гармоник  $b_a(t)$

Fig. 5. Function diagram of magnetic frame induction  $b_a(t)$  its harmonic composition:  $b_1(t)$ ,  $b_3(t)$ ,  $b_9(t)$  – functions of corresponding harmonics  $b_a(t)$

Таблица 1

Значения индукций

Induction values

$B_{1m}$ , Тл	2,100	2,000	1,900	1,800	1,700	1,600	1,500	1,400	0,700
$B_{mr}$ , Тл	1,814	1,729	1,643	1,558	1,468	1,382	1,297	1,211	0,606
$B_{max}$ , Тл	1,829	1,746	1,664	1,591	1,519	1,455	1,394	1,331	0,699
$\frac{B_{max}}{B_{mr}}$ , о.е.	1,008	1,01	1,013	1,022	1,035	1,053	1,075	1,099	1,154

## ВЫВОД

В процессе проведения экспериментов выявлено, что: амплитуда индукции основной гармоники магнитного поля в рамах магнитопровода  $B_{1m}$  больше расчетного значения индукции  $B_{mr}$  в  $\frac{2}{\sqrt{3}}$  раз, или на 15,5 %; вследствие

нелинейности вебер-амперных характеристик рам и свойств трехфазной системы в функциях магнитной индукции отдельных рам возникают гармонические составляющие, кратные трем (рис. 5); высшие гармоники функции магнитной индукции рамы  $b(t)$ , накладываясь на основную гармонику, уменьшают реальную амплитуду индукции магнитного поля  $B_{max}$  практически до расчетного значения индукции  $B_{mr}$  в рабочем диапазоне реальной амплитуды, при этом коэффициенты высших гармоник изменяются незначительно; в намагничивающих токах отсутствуют гармонические составляющие, кратные трем (рис. 4).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Витой пространственный магнитопровод трехфазного трансформатора: пат. 1658223 СССР: МПК: H01F 27/24 / Г. Б. Андреев, Л. Н. Стабровский; дата публ.: 23.06.1991.
2. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия: ГОСТ 21427.1–83. Введ. 01.01.1984. М.: Издательство стандартов, 1983. 17 с.
3. Чайковский, В. П. Перспективы применения конструкций магнитных систем трансформаторов из витых элементов / В. П. Чайковский, В. А. Матухно, С. А. Игнатенко // Электромашиностроение и электрооборудование. 2007. № 68. С. 48–51.
4. Авдеева, Е. А. Потери активной мощности в трехфазных трансформаторах с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых пространственных магнитопроводов / Е. А. Авдеева, Р. А. Ставинский // Электротехника и электроника / Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т». 2014. № 2. С. 14–17.
5. Мазуренко, А. А. Исследование и расчет магнитного режима трехфазного трансформатора с витым пространственным магнитопроводом / А. А. Мазуренко. М., 1970. С. 186.
6. Дружинин, В. В. Магнитные свойства электротехнической стали / В. В. Дружинин. М.: Энергия, 1974. 240 с.
7. Дубров, Н. Ф. Электротехнические стали / Н. Ф. Дубров, Н. И. Лапкин. М.: Metallurgizdat, 1963. 384 с.

8. Копылов, И. В. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
9. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
10. Бладыко, Ю. В. Применение MathCad в решении задач электротехники. Ч. 2: Переходные процессы. Нелинейные электрические цепи. Теория электромагнитного поля / Ю. В. Бладыко, А. А. Мазуренко, И. В. Новаш. Минск: БНТУ, 2013.

Поступила 20.12.2016

Подписана в печать 17.02.2017

Опубликована онлайн 28.03.2017

## REFERENCES

1. Andreev G. B., Stabrovsky L. N. (1991) *Stranded Spatial Magnetic Conductor of 3-Phase Transformer*. Patent No 1658223 USSR (in Russian).
2. State Standard 21427.1–83. *Electrotechnical Cold-Rolled Anisotropic Sheet Steel. Technical Specifications*. Moscow, Publishing House of Standards, 1983. 17 (in Russian).
3. Tchaikovsky V. P., Matukhno V. A., Ignatenko S. A. (2007) Prospects for Application of Transformer Magnetic Systems with Stranded Elements. *Elektromashinostroyeniye i Elektrooborudovaniye* [Electric Machine Engineering and Electric Equipment], (68), 48–51 (in Russian).
4. Avdeeva E. A., Stavinsky R. A. (2014) Losses of Active Power in 3-Phase Transformers with Circular and Hexagonal Forming Contours of Cores in Stranded Spatial Magnetic Conductors. *Elektrotehnika i Elektronika* [Electrical Engineering and Electronics], (2), 14–17 (in Russian).
5. Mazurenko A. A. (1970) *Investigations and Calculation of Magnetic Mode for 3-Phase Transformer with Stranded Spatial Magnetic Conductor*. Moscow. 186 (in Russian).
6. Druzhinin V. V. (1974) *Magnetic Properties of Electrotechnical Steel*. Moscow, Energiya Publ. 240 (in Russian).
7. Dubrov N. F., Lapkin N. I. (1963) *Electrotechnical Steel*. Moscow, Metallurgizdat Publ. 384 (in Russian).
8. Kopylov I. V. (1986) *Electric Machines*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 360 (in Russian).
9. Tikhomirov P. M. (1986) *Calculations of Transformers*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 528 (in Russian).
10. Bladyko Yu. V., Mazurenko A. A., Novash I. V. (2013) *Application of MathCad for Solution of Problems in Electrical Engineering. Part. 2. Transient Processes. Nonlinear Electric Circuit. Theory of Electromagnetic Field*. Minsk, Belarusian National Technical University. [Electronic Resource] (in Russian).

Received: 20.12.2016

Accepted: 17.02.2017

Published online: 28.03.2017