

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне будаўніцтва і архітэктуры, геадэзіі і картаграфіі, геаэкалогіі і транспарту.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия F. Строительство. Прикладные науки

В серии F научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области строительства и архитектуры, геодезии и картографии, геоэкологии и транспорта.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series F. Civil engineering. Applied sciences

Series F includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in civil engineering and architecture, geodesy and cartography, geocology and transport.

Адрес редакции:

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск: А.А. Бакатович, Г.И. Захаркина, В.В. Булах, В.К. Лутский, Г.А. Шароглазова
Редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 29.06.2015. Бумага офсетная 65 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 22,32. Уч.-изд. л. 26,89. Тираж 100 экз. Заказ 1029.

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 666.22.33

БЫВШИЙ ДОМ КУПЦА МУРАВЬЕВА В ГРОДНО – ПАМЯТНИК АРХИТЕКТУРЫ XIX ВЕКА

*канд. архитектуры, доц. Г.И. ЗАХАРКИНА
(Полоцкий государственный университет);
канд. архитектуры, доц. А.С. ДАВИДОВИЧ
(Гродненский государственный университет им. Я. Купалы)*

Рассматриваются вопросы, касающиеся одного из значимых памятников историко-культурного наследия Гродненщины – бывшего дома купца Муравьева. Возведение дома датировано концом XIX века. Несмотря на свои относительно небольшие габариты, здание играет важную роль в формировании уникального градостроительного ансамбля Советской (бывшей Рыночной) площади – главной площади Гродно. Анализируется архитектурно-композиционное решение фасада здания; выявлены приемы пластического решения, возможности дальнейшего использования дома купца Муравьева в формировании городской среды.

Введение. Застройка северного участка нынешней Советской (бывшей Рыночной) площади сформировалась во второй половине XIX века вскоре после приобретения его выходцем из Санкт-Петербурга, купцом И.И. Муравьевым. На тот период в застройке Рыночной площади преобладали двухэтажные дома, возвышаясь над которыми, своей статью выделялся трехэтажный дом Муравьева (рис. 1).



Рис. 1. Дом купца Муравьева (1910 г.)

Строительство каменного трёхэтажного здания завершилось в конце 1880-х годов. По описанию 1886 года недвижимое имущество Ивана Муравьева состояло из каменного трехэтажного дома с амбаром в нижней части. В верхних этажах здания располагались жилые помещения и магазин. Известно, что дом был оборудован системой электроснабжения, водопроводом и канализацией [2]. В 1910 году недвижимость Муравьева составляли каменный трехэтажный дом и три флигеля (один – трехэтажный, два – двухэтажных). На тот период в доме Муравьева размещались Гродненское отделение Белостокского коммерческого банка и магазин смешанных мануфактурных товаров (под фирмой “Франк Ш.А., вдова и сын”).

Однако судьба дома Муравьева в период новейшей истории более чем драматична. В 1934 году дом был выкуплен городским магистратом и приспособлен под городскую библиотеку, в этом качестве использовался вплоть до 1989 года. Проводившиеся в 1970-х годах фрагментарные реставрационные работы носили, скорее, косметический характер и желаемого эффекта не давали. Во время начатых в 1990-х годах ремонтных работ вследствие отсутствия надлежащей охраны декоративное убранство ин-

терьеров было похищено. В дальнейшем было предпринято еще несколько попыток реанимировать здание, которые также успеха не имели. И это, конечно, привело к негативным для здания последствиям.

В Гродно выросло целое поколение людей, которым ни разу не довелось ни подняться по лестнице с удивительными коваными перилами, ни побывать внутри знаменитого дома Муравьева на Советской площади: увидеть витражи и цветные фонари, старинные кафельные печи, фрески и деревянную резьбу на стенах.

Основная часть. Автор проекта жилого дома Муравьева не известен, однако общее архитектурное решение, а также, несомненно, высокий уровень проработки всех деталей как наружной, так и внутренней части дома дает основание предположить участие в его возведении высококвалифицированного архитектора, предположительно, из Санкт-Петербурга. В архитектурно-художественном отношении дому Муравьева присущи черты, характерные для таких стилей, как «модерн» и «псевдорусский».

Трёхэтажное здание имеет Г-образную форму плана, стены выложены из глиняного кирпича. В левом крыле здания расположилась деревянная трёхмаршевая лестница с коваными перилами. Значительную часть 2-го этажа занимал центральный зал, рядом с которым находилась комната для игр. Этажом выше размещались жилые комнаты и столовая.

Особого внимания заслуживают наружная и внутренняя отделка здания. Так, главный фасад симметрично фланкирован двумя боковыми ризалитами, завершёнными полуциркульными аттиковыми фронтонами и невысокими усечёнными сверху башенками. Башенки были украшены гербовыми щитами (по всей видимости, гипсовыми). Один из гербовых щитов пережил Вторую мировую войну и был уничтожен где-то на рубеже 1950 и 1960-х годов.

Центральная часть главного фасада на уровне 2-го этажа украшена большим балконом с литой чугунной оградой. На 3-м этаже привлекают внимание боковые арочные проёмы венецианских окон с небольшими балконами. Фасадная поверхность центральной части имеет раскреповки пилястрами с чугунными вензелями в завершениях и рустованную кладку стен в уровне 1-го этажа (рис. 2).



Рис. 2. Фасад здания до реконструкции (2005 г.)

Богатым было и внутреннее убранство здания: лепнина, поручни с оригинальной резьбой, кованные детали, камины, несколько кафельных печей, изображения которых печатались даже в альбомах, посвященных Гродно, и в специализированных изданиях. В частности, в оформлении центрального зала использованы декоративная роспись и лепнина, большие прямоугольные окна имели мраморные подоконники. Стены расчленены пилястрами с лепными гирляндами и неглубокими нишами. Рисунок плафонов

повторяет орнамент на стенах. В углах зала – две кафельные печи с лепными позолоченными картушами; на потолке – лепные розетки, а также деревянный орнаментированный карниз. В помещениях 3-го этажа сохранились печи и лепные розетки на потолках.

Архитектурно-художественная выразительность здания и доминирование его в окружающей застройке обеспечивается силуэтами угловых полуциркульных фронтонов и башенок, завершённых ажурными литыми парапетами и пластикой композиционного решения главного фасада, формирующего пространство городской площади.

Анализ архитектурно-композиционного решения здания показал, что пропорциональное соотношение ширины и высоты его фасада составляет почти 1:1. Но по зрительному восприятию создается ощущение доминирования высоты. Этот эффект получен благодаря силуэту здания и определенным приемам композиционного построения фасадной поверхности, то есть при помощи сложного членения ее вертикальными и горизонтальными элементами. Так, выделение боковых ризалитов с полуциркульными фронтонами и башенками, а также наличие пилястр в центральной части фасада создает ощущение значительного преобладания высоты здания относительно его ширины. Этому способствуют также пропорции оконных проемов и рисунок их переплетов.

Детализировка горизонтальных элементов стен на уровне 2-го и 3-го этажей, кратная размерам кирпича, сомасштабна человеку и не создает ощущения раздробленности фасада. Тектоническая система несущей стены проявляется в достаточно широких простенках, равных $\frac{1}{2}$ ширины оконного проема, и в рустованной кладке 1-го этажа. Рельеф неоштукатуренной фасадной стены, решенный путем незначительного выноса архитектурных элементов из кирпича, особенно четко выявляется глубокой светотенью при боковом освещении солнечными лучами.

В 2005 году, когда собственником здания стал ОАО «Белорусский народный страховой пенсионный фонд», было принято решение о реставрации здания с последующим размещением в нем четырехзвездочного отеля под названием «Муравьефф отель». Проект «Реконструкция с реставрацией здания на пл. Советской, 2, в городе Гродно под гостиницу» был разработан Институтом «Гродногражданпроект» и согласован в Министерстве культуры Республики Беларусь.

В данной ситуации композиция и объёмно-планировочное решение рассматриваемого здания не противоречат функциональному содержанию его нового назначения. Согласно проекту в подвальном этаже дома купца Муравьёва будет расположен бильярдный клуб с открытыми сводчатыми потолками. Первый этаж отдан под вестибюль и администрацию гостиницы. На втором этаже – холл с выходом на балкон, а также гостиничные номера, на третьем – два VIP-номера, на четвертом – один VIP-номер со смотровой площадкой. Внутренний дворик отведен под ресторан, который будет просматриваться сверху из окон. Запроектирована также и навесная застеклённая галерея. Флигель тоже отведен под гостиницу.

Казалось, что возрождение памятника архитектуры осуществится. Но из-за отсутствия достаточного финансирования только в декабре 2007 года, когда генподрядчиком выступила строительная компания ООО «ТОРИА», работы были возобновлены и проведено усиление несущих конструкций основного здания. К началу декабря 2013 года подрядной организацией выполнен первый этап работ – восстановление главного и бокового фасадов здания (рис. 3). Комплекс ремонтно-восстановительных мероприятий включал такие работы, как:

- замена разрушенного кирпича в кладке, восстановление повреждённого кирпича специальным составом «Ремерс»; замена разрушенных фигурных кирпичей (рис. 4);
- восстановление кладки криволинейных тяг архивольтов, обрамляющих полуциркульные тимпаны фронтонов башен и оконных проемов; полное воссоздание опорных частей архивольта фасадов башен с изготовлением новых фигурных кирпичей (рис. 5);
- расчистка швов в кирпичной кладке криволинейных тяг архивольтов и тимпана фронтонов башен, оконных проемов, карнизов, пилястр, порталов и других участков фасадов от разрушенного старого кладочного раствора и заполнение швов новым кладочным раствором, а также их расшивка составами «Ремерс»;
- химическая очистка уцелевших кирпичей от наслоений старой краски; механическая очистка от копоти и органических загрязнений;
- обработка всей кирпичной кладки гидрофобизирующим составом;
- воссоздание декоративной филленчатой обшивки верха башен по медной кровле;
- полное восстановление кирпичной кладки (новодел) карниза главного фасада между башнями, а также кладки карниза между первым и вторым этажом;
- замена балконных металлических балок и бетонирование балконных площадок; реставрация и установка балконных ограждений; воссоздание, монтаж и подшивка декоративных балконных плит с устройством на них медных отливов;
- временное заполнение оконных и дверных проемов имитацией из ПВХ с одинарным остеклением, с целью обеспечения возможности дальнейшего производства внутренних работ по реставрации и реконструкции интерьеров;

- изготовление имитаций старинных деревянных ворот (для временного заполнения ими соответствующих проемов), которые будут заменены на воссозданные ворота по окончании внутренних работ;
- оштукатуривание и двухцветная окраска передней части бокового фасада с выделением цветом контура бывшей пристройки к зданию «Дома Муравьева»;
- выравнивание по сетке с утеплением минеральной ватой и последующим оштукатуриванием и покраской задней части фасада;
- устройство на крыше медного парапета.



Рис. 3. Дом купца Муравьева в Гродно после ремонта (2013 г.).

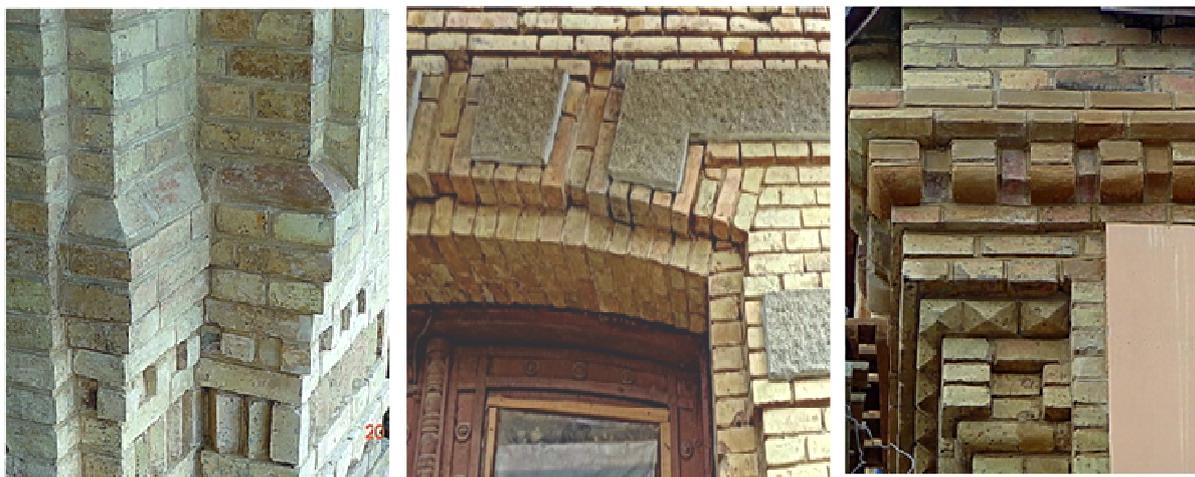


Рис. 4. Участки кирпичной кладки после обработки



Рис. 5. Фрагменты восстановленных оконных проёмов боковых ризалитов

Таким образом, проведённые работы по восстановлению фасада почти завершены – деревянные ворота, а также заполнение оконных и дверных проёмов будут установлены после окончания внутренних работ. Однако в настоящий период времени работы по реконструкции внутреннего пространства приостановлены из-за финансовых и организационных проблем.

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- бывший дом купца Муравьева являет собой пример одного из наиболее значимых памятников историко-культурного наследия Гродненщины и служит градообразующим элементом в формировании ансамбля Советской (бывшей Рыночной) площади в городе Гродно. Согласно постановлению Совета Министров Республики Беларусь № 1288 от 03.09.2008 бывший дом купца Муравьева получил статус историко-культурной ценности категории «2» (шифр 412Г000666 в Государственном перечне историко-культурных ценностей Республики Беларусь).

- на протяжении всей своей истории здание использовалось в различных целях и постепенно теряло эксплуатационную пригодность, оказавшись в аварийном состоянии. Решение о его реконструкции и превращении в отель было своевременно и давало реальную надежду на сохранение уникального архитектурного памятника. В настоящее время здание законсервировано в связи с отсутствием источника финансирования, сроки завершения работ по реконструкции и реставрации не определены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Историко-культурная ценность категории «2» – бывший дом купца Муравьева (XIX в.) на пл. Советской в городе Гродно: отчет; науч. рук. / А.С. Давидович. – Гродно, 2013.
2. Біяграфія гарадзенскіх вуліц. Ад Фартоў да Каложы / А. Вашкевіч [і інш.]. – Гродно-Вроцлав, 2012.
3. Когда в Гродно восстановят дом купца Муравьева? // Гродненская правда. – 2012. – 20 апр.

Поступила 04.06.2015

THE FORMER HOUSE OF MERCHANT MURAVJOV IN GRODNO – ARCHITECTURAL MONUMENT OF THE XIXth CENTURY

G. ZAHARKINA, A. DAVIDOVICH

The article dwells on the issues, relating to one of the most important monuments of the historical and cultural heritage of Grodno – the former house of merchant Muravjov. The erection of the house dates to the end of the XIXth century. The outer dimensions of the house are relatively small, still the building plays an important role in formation of the unique urban ensemble of the Soviet (former Market) Square – the main square of Grodno. The architectural composition of the facade of the building is analysed, techniques of plastic composition are shown, the potential of the subsequent use of the house of merchant Muravjov in forming of the city environment is revealed.

УДК 629.10.066

**АРХИТЕКТУРНО-ИСТОРИЧЕСКИЕ ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ:
КОЛОДЕЦ ПОЛОЦКОГО ИЕЗУИТСКОГО КОЛЛЕГИУМА
(СЕРЕДИНА XVIII – НАЧАЛО XX ВЕКА)**

А.А. СОЛОВЬЁВ

(Национальный Полоцкий историко-культурный музей-заповедник)

Представлены результаты изучения старейшего гидротехнического сооружения – колодца Полоцкого иезуитского коллегиума. В ходе раскопок были собраны образцы строительных материалов и бытовых артефактов, касающихся истории коллегиума и кадетского корпуса. Также были зафиксированы остатки деревянных конструкций и скобяные изделия, связанные с внутренним устройством насосных и подъёмно-передаточных механизмов, устроенных при ремонте колодца во время перестройки бывшего иезуитского коллегиума под кадетский корпус. На основе выявленных находок стало возможным предположить его внутреннее устройство и частично реконструировать его внешний облик на период существования кадетского корпуса.

Введение. В сентябре – декабре 2011 года во внутреннем дворе бывшего иезуитского коллегиума в Полоцке (ул. Стрелецкая, д. 4) начались раскопки старинного иезуитского колодца. Археологический надзор за работами вёлся научным сотрудником Национального Полоцкого историко-культурного музея-заповедника А.А. Соловьёвым. Согласно исследованиям В.В. Глинника, колодец был устроен около 1765 года при строительстве существующих корпусов самими иезуитами для обеспечения водой как близко расположенных пекарен и кухни, так и всего коллегиума [1, с. 5].

Изучаемый нами колодец упоминается и в строительной документации, относящейся ко времени перестройки коллегиума под кадетский корпус. Согласно исторической справке по корпусу «А», во время реконструкции коллегиума под кадетский корпус колодец по состоянию на 1833 год находился «в совершенной запущенности...механизм, состоящий более из составов железного металла ... совершенно изржавевший» [1, с. 6; 2, с. 42]. В связи с тем, что составе подъёмного колодезного механизма было много металлических деталей, было решено переделать крышу, исправить и покрасить его снаружи. Тогда же принято решение замостить булыжником двор. По описанию В.П. Викентьева, иезуитский колодец был около «тринадцати сажений», то есть около 27...28 м [3, с. 34].

Самое раннее изображение колодца относится к плану коллегиума 1820 года, при этом он показан в виде квадрата. Возможно, из-за наличия шатровой крыши. На планах коллегиума 1828 года (подвалы; первый этаж корпусов) изображения колодца имеют различия. Так, на плане подвалов он выглядит как массивное кольцо, которое одного цвета со стенами зданий. Середина его показана в виде тёмно-коричневого круга. План на уровне первого этажа зафиксировал колодец в виде восьмигранного массивного контура. Он также был одного цвета со стенами зданий. Восьмигранный контур имел в грани, ориентированной на восток, отверстие, в котором была расположена труба, подающая воду во двор коллегиума; над трубой – дверца к лестнице, ведущей на дно колодца. Колодец находился между корпусами «А» и «В», к нему примыкал забор, который отделял большую часть внутреннего двора, занятую под сад. Этот колодец есть на плане города Полоцка и коллегиума 1828 года, где показан в виде круга [1, с. 16, 17].

На плане подвалов коллегиума, созданном после 1831 года и приведенном в альбоме Д. Струкова за 1864–1867 годы, колодец показан в виде двух массивных колец. Они также были одного цвета со стенами зданий. От колодца в северо-восточном направлении отходит труба, которая огибает корпус «Б», далее она, заламываясь под углом, проходит через Восточный дворик и примыкает к восточному (взорванному) крылу коллегиума. На плане начала XX века, составленном до модернизации коллегиума 1910–1914 годов, над колодцем указано небольшое деревянное строение из двух одинаковых квадратных помещений. В одном из них, западном, располагался оголовок колодца. С восточной стороны имелся вход в соседнее помещение, также квадратное в плане, середину которого занимало круглое сооружение с выделенным центром. Данная конструкция характерна для конного(?) манежа, который приводил в движение насос колодца [1, с. 5].

От одного из керамических колодцев начала XX века в изучаемый нами колодец была выведена цементная труба, её трасса и направление совпадают с трубой, проложенной после 1831 года.

Основная часть. Место зарытого колодца (рис. 1) было определено на основе планов коллегиума 1828 года и плана начала XX века. Разработка территории – выемка грунта (преимущественно верхний слой с асфальтом и верхние слои мусора) – на первых этапах велась экскаватором.

В ходе исследования нами были проведены работы по частичной выемке содержимого колодца, раскопке его оголовка для поиска остатков конструкций и подъёмного механизма, опор кровли и элемен-

тов благоустройства территории. Для изучения культурного слоя проводилась зачистка небольших отрезков (участков) на стенках ямы. Были проведены дополнительные врезки в дно ямы для поиска опор колодезных конструкций (нами они названы «большой» и «малой»). Основная расчистка проводилась механическим способом. Глубина разработки корректировалась в зависимости от выявляемых остатков конструкций, дальнейшая расчистка которых велась вручную. Таким же способом расчищался и сам изучаемый нами колодец.

В ходе работ по расчистке выявлено, что остатки его верхней части начинаются сразу под слоем песка (благоустройство 2011 г.) и асфальтом мощностью 10...15 см. Кладка колодезной шахты сооружения прослежена с глубины около 0,2 м (135,00 м). Толщина слоя песка до 5,0 см. Данный слой асфальта сформировался с 90-х годов XX века. До 2011 года он являлся уровнем дневной поверхности двора. От него нами производился отсчёт глубины залегания слоёв и выявляемых конструкций. Ближайшая нивелировочная отметка расположена с северной стороны (134,80 м от дневной поверхности). Сам колодец (его верх) представлял собой массивное кирпичное кольцо с внутренним диаметром 2,35...2,4 м и толщиной стенок около 1,1...1,2 м; верхние ряды его кладки были ветхими и представляли собой (особенно снаружи) сплошную массу разрушенного кирпича. В ходе работ эта кладка была разобрана на 7 рядов, нижняя отметка – 135,70 м. Основной находкой стала больших размеров кованая скоба от лестницы, вмурованная в стену колодца. Было также выяснено, что западная внешняя сторона колодца (четверть круга) имеет утолщение на полкирпича, в данном месте толщина стенки составляла около 1,25 м (см. рис. 1).

Заполнение колодца и внутренняя поверхность стен. Расчистка внутреннего пространства показала, что внутренний диаметр кирпичной шахты колеблется в пределах 2,3...2,4 м. Система кладки представляет собой чередующиеся ряды ложков и тычков. Толщина швов достигает 1,5...3,0 см. Кирпич с косыми бороздками, ярко-красный, размером 7...7,5×14,5...15,0×28,0...30,5 см. В юго-восточной части колодца расположена скобяная лестница. Скобы аналогичны той, что найдена при разборке ветхой кладки, вмурованы на длину кирпича (28,0...30,0 см), на концах – расклёпка; расстояние между ними около 40,0 см (4 ряда кладки) (рис. 2: 16). Зачистка кладки позволила выявить гнезда для крепления разновременных опорных брёвен подъёмных и передаточных механизмов (рис. 2: 5, 15). Самые ранние расположены между скобами лестницы, устроены при кладке трубы. Это были углубления размером около 17,0×22,0×12,0,0 см (рис. 2: 5), расположенные на оси «юго-восток – северо-запад». При перестройке колодца в 1833 году рядом вместо них были прорублены другие 30,0×17,0×15,0 см, расположенные на оси «восток – запад», прослеженные на глубине 0,9 м от разобранных рядов (рис. 3: 1). Их нижняя граница на глубине около 1,5 м (136,30 м) от дневной поверхности. В восточной части колодца обнаружена закладка прорубленного отверстия шириной 0,5...0,6 м, её верхняя часть была разобрана вместе с ветхими рядами (рис. 1; рис. 2: 19). Высота сохранившейся части от уровня разобранных рядов около 0,7 м. Кирпич, использованный в закладке, малоформатный. На глубине около 2 м от дневной поверхности кладка более грубая и неровная. В северо-восточной её части на глубине около 2,7 м от дневной поверхности (138,50 м) была ещё одна закладка с цементной(?) трубой в нижней части с внутренним диаметром около 12 см (рис. 1; рис. 2: 2). Труба ориентирована на керамический колодец дренажа начала XX века (обнаружен в 2011 году), который расположен перед юго-западным углом крыльца корпуса «Б».

В ходе благоустройства территории двора этот колодец был засыпан. Закладка пролома изучаемого нами иезуитского колодца проведена также малоформатным кирпичом. В этом же месте на плане подвала зданий бывшего коллегиума, снятого Д. Струковым между 1864 и 1867 годами, была отмечена труба, соединявшая колодец с восточным крылом коллегиума.

Заполнение иезуитского колодца представлено слоями строительного мусора, угольного и железного шлака, характерного для отходов котельных. При их удалении найдено много артефактов, большинство из которых датированы первыми десятилетиями XX века, но отдельные относятся к XVIII и XIX векам.

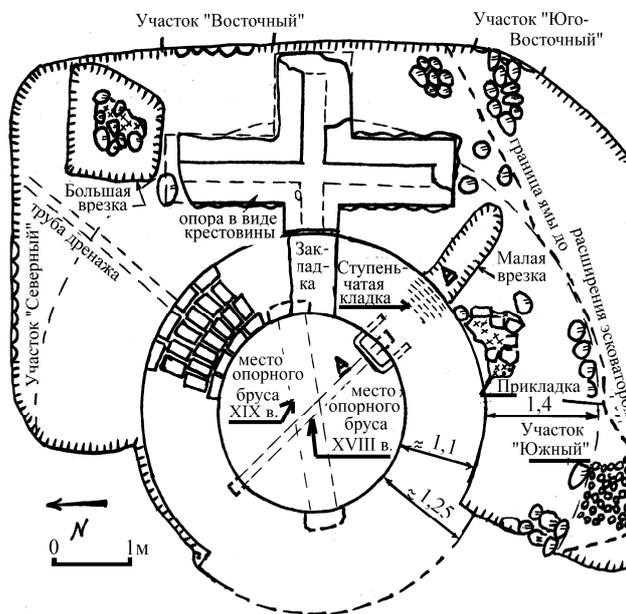


Рис. 1. Ситуационный план раскопанных остатков наземных частей колодца

Участок «Восточный» зачищен на восточной стенке ямы (см. рис. 1) на длину 1,5 м. Под асфальтом толщиной 10...15 см прослежен слой спрессованного строительного мусора серого оттенка в верхней части и красноватого оттенка в нижней части с преобладанием кирпичного боя. Он насыщен обломками фабричных гладких изразцов конца XIX – начала XX века толщиной 0,45...0,5 м; перекрывает булыжную мостовую, выполненную из камней диаметром 10...25 см, которые были уложены на песчаной подушке толщиной 5...10 см. Мостовая сохранилась фрагментарно, на изучаемом отрезке стратиграфии она прослежена на длину около 1,2 м и расположена на глубине около 0,55(135,35) м от дневной поверхности. Далее, под ней, находится слой тёмно-серой, почти чёрной земли.

Участок «Юго-восточный» представляет собой отрезок стратиграфии культурного слоя (см. рис. 1), расположенный возле фрагмента булыжной кладки мостовой, зачищен длиной 1 м. Под асфальтом толщиной 10...15 см прослежен слой спрессованного строительного мусора серого оттенка в верхней части и красноватого оттенка в нижней части с преобладанием кирпичного боя. Он насыщен обломками фабричных изразцов конца XIX – начала XX века. Общая толщина этого слоя – 0,45...0,5 м. От нижнего слоя его отделяла прослойка жёлтого песка, которая над булыжной кладкой имела разрыв. Толщина прослойки 8 см. Эти слои перекрывают булыжную мостовую из камней диаметром 10...25 см, она прослежена на глубине 0,55(135,35)...0,6(135,40) м от дневной поверхности. Под мостовой следовал перемешанный слой чёрной земли. Южнее кладки на глубине около 0,7...0,8 м зафиксированы вкрапления материкового песка и глины. Вероятно, они были вынуты из котлована при строительстве корпусов коллегiums (корпус «А»).

Участок «Южный» расположен на южной стенке ямы (см. рис. 1). Для его изучения был зачищен отрезок стратиграфии длиной 2 м. Под асфальтом толщиной 10...15 см прослежен слой спрессованного строительного мусора серо-коричневого оттенка. Толщина его от 15 до 30 см, мощность балласта возрастает в восточном направлении; далее следует слой тёмно-коричневой, почти чёрной земли толщиной от 15 до 30 см, толщина его возрастает в западном направлении. Данный слой перекрывает вымостку, выполненную круглой галькой диаметром от 3 до 10 см на глубине 0,55(135,35) м от дневной поверхности. Со стороны колодца её ограничивало скопление положенных насухо камней диаметром 10...20 см. От вымостки галькой до кирпичной кладки оголовка колодца 1,4 м. Под вымосткой также следовала перемешанная чёрная земля. Позднее, в ходе расширения ямы вокруг колодца нам удалось произвести зачистку остатков вымостки, которая сохранилась на площади 0,8×0,8 м. При этом выяснено, что она имеет значительный уклон в сторону колодца. Перепад уровней её краёв составлял около 10 см, то есть от 0,55 до 0,45 м от дневной поверхности (соответствующие нивелировочные отметки 135,35 и 135,25 м).

Наблюдение за ручной разработкой данного участка позволило выявить на его западном конце ещё один фрагмент кладки из положенных насухо булыжных камней диаметром 10...20 см на расстоянии 1,4 м от внешней стороны кирпичной кладки. Здесь она сохранилась на высоту около 0,25(135,05) м от дневной поверхности. В ходе раскопок на дне ямы и дальнейших расчисток также замечены скопления камней или отдельные камни, расположенные на таком же расстоянии (1,4 м) от кирпичной кладки. Они прослежены на разных участках дна ямы и образуют очертания кольца вокруг кирпичного оголовка колодца шириной 1,4 м. Восточная часть кольца практически уничтожена при устройстве бетонной крестообразной опоры. Все фрагменты булыжных мостовых, выявляемые при исследованиях, находились за пределами остатков каменного кольца.

Данная опора имеет булыжное основание и представляет собой заливку (135,70 м) из бетона, которая примыкает к кирпичному оголовку шахты колодца с востока в том месте, где прослежена кирпичная закладка. В плане опора в виде креста с первоначальными габаритами 3,8×2,4 м. Три конца имели ширину около 1 м, на них фрагментарно сохранилась обмазка со скошенной внешней стороной (верхняя отметка 135,90 м). Её высота около 20 см. Обмазка образовывала прямоугольные желоба 20...22×20...22 см на центральных осях конструкции. Четвёртый конец опоры шириной около 0,7 м примыкал к колодцу (см. рис. 1).

Прикладка. Возле юго-восточной стороны кирпичной кладки колодца была обнаружена кирпичная прикладка в виде треугольника, меньшие грани которого ориентированы по сторонам света, их длина около 1 м. Найденная прикладка начиналась с глубины около 0,3...0,4 м от дневной поверхности. Её нижняя граница была на глубине около 0,7...0,8 м. Основа прикладки – каменная кладка на слабом растворе; выше следовала бессистемная смешанная кладка из малоформатного кирпича. Под данной конструкцией начинался слой чёрного перемешанного грунта.

Для поиска остатков опор колодезной крыши и более ранних мостовых в дно ямы производились **врезки** в виде шурфов и траншей (см. рис. 1).

Большая врезка была устроена в виде неглубокого шурфа (0,3 м от дна ямы) неправильной четырёхугольной формы в северо-восточной части ямы для поиска опоры колодезной кровли. Данное место было обнаружено при выемке экскаватором строительного мусора. При этом выявлено скопление камней на слабом известковом растворе. Булыжники диаметром 10...15 см образовывали треугольную площадку неправильной формы с габаритами 0,6×0,7 м. Кладка камней в один ряд, начинается на глубине 0,8 м от дневной поверхности, нижняя её граница находится на глубине 0,9...1,0 м от дневной поверхно-

сти (нивелировочные отметки 135,70 и 135,80 м). Данная каменная кладка перекрывает культурный слой с артефактами XVII века, который прослеживался с глубины 1 м от дневной поверхности (см. рис. 1).

Поиски остатков подобной кладки проводились и в юго-восточной части ямы, но результата не дали.

Малая врезка устроена в виде неглубокой (0,5 м от дна ямы) траншеи от кирпичной кладки колодца в юго-восточном направлении. Прорезка прилегающего колодцу слоя позволила выявить чёрный перемешанный культурный слой с предметами XVII века. Зачистка внешней стороны кирпичной кладки позволила выявить её ступенчатый характер. Выступы каждого ряда 2...4 см. Если на глубине 0,9 м от дневной поверхности ширина кладки составляла 1,1 м, то на глубине около 1,5 м толщина стенки колодца была около 0,6...0,75 м (см. рис. 1).

Дальнейшая расчистка заполнения колодца (см. рис. 2) продолжалась в феврале 2012 года с глубины 3,0 м от дневной поверхности. На глубине 2,7...2,8 м при зачистке стенок колодца выяснено, что они имели кирпичные закладки; сделаны на крепком известковом растворе из малоформатного кирпича, поставленного на ребро (см. рис. 2: 14). Возможно, эти переделки связаны с ремонтом и закладками каких-то конструкций или тайных лазов со стороны подвала. Обнаруженные кладки образуют полосу шириной около 3,5...4,0 м. Далее, на глубине около 14 м от дневной поверхности, по периметру колодезной трубы прослежена сквозная кольцевая по продольному шву кладки трещина. Ширина её местами около 3 см. Выяснено, что толщина стенок шахты колодца 0,45...0,46 м в полтора кирпича. Далее была прослежена тычковая кладка, образывавшая ровную стенку. Между ними – заполнение жёлтым песком.

Далее также были прослежены разновременные гнёзда под опорные брусы для колодезных механизмов. Самые ранние расположены между скобами лестницы и были устроены при кладке трубы – это углубления $22 \times 17 \times 12 \pm 7$ см (см. рис. 2: 5; рис. 3: 1), расположенные на оси «юго-восток – северо-запад».

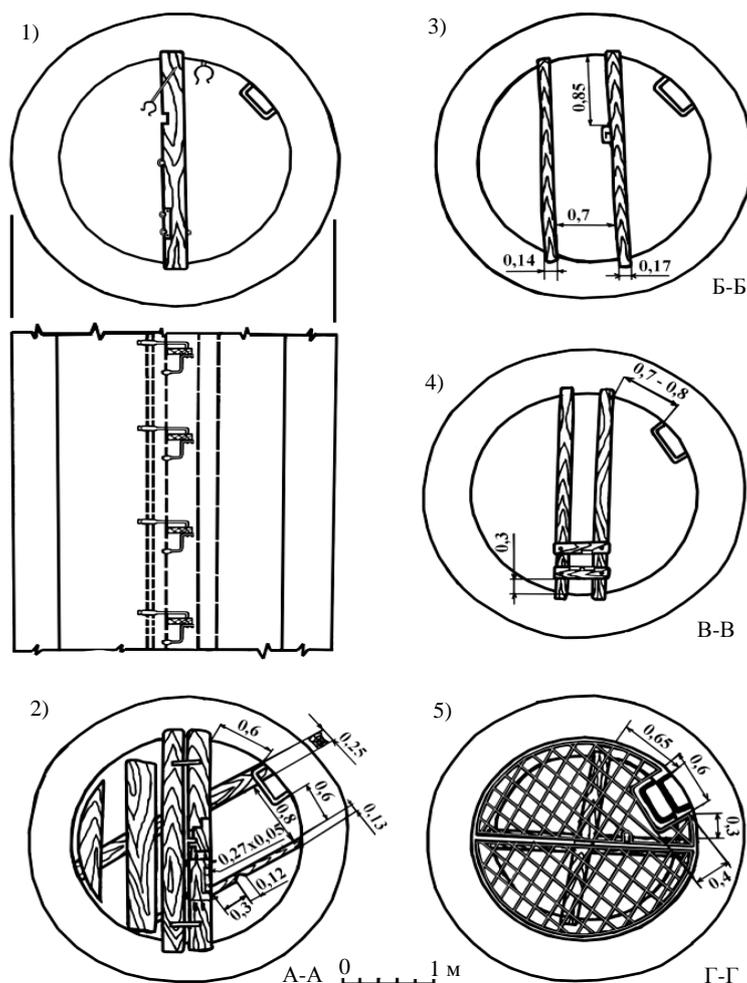


Рис. 3. Продольные и поперечные разрезы

с частичной реконструкцией найденных остатков колодезных механизмов:

- 1 – поперечный и продольный разрез-реконструкция расположения и связи опорных балок для передаточных механизмов;
- 2 – верхняя насосная площадка; 3 – опорные брёвна для промежуточного агрегата(?) между насосными площадками;
- 4 – нижняя насосная площадка; 5 – откидная «иезуитская» решётка под настилом и глиняным замком

При перестройке колодца в 1833 году рядом вместо ранних гнёзд были устроены другие, размером $30 \times 17 \times 15 \pm 7$ см, расположенные на оси «восток – запад». При раскопках в некоторых из них обнаружены уцелевшие опорные балки (брусы) примерно $0,26 \dots 0,27 \times 0,01 \dots 0,12$ м с частично сохранившимися крепежами механизмов. В части каждого бруса, ориентированной на восток, имелись ухваты для крепления трубы; ориентированной на запад – массивные набойки и кронштейны для пропуска осей механизмов (рис. 2; 5; рис. 3: 1; рис. 4: 1; рис. 5: 1, 4 – 7, 9 11).

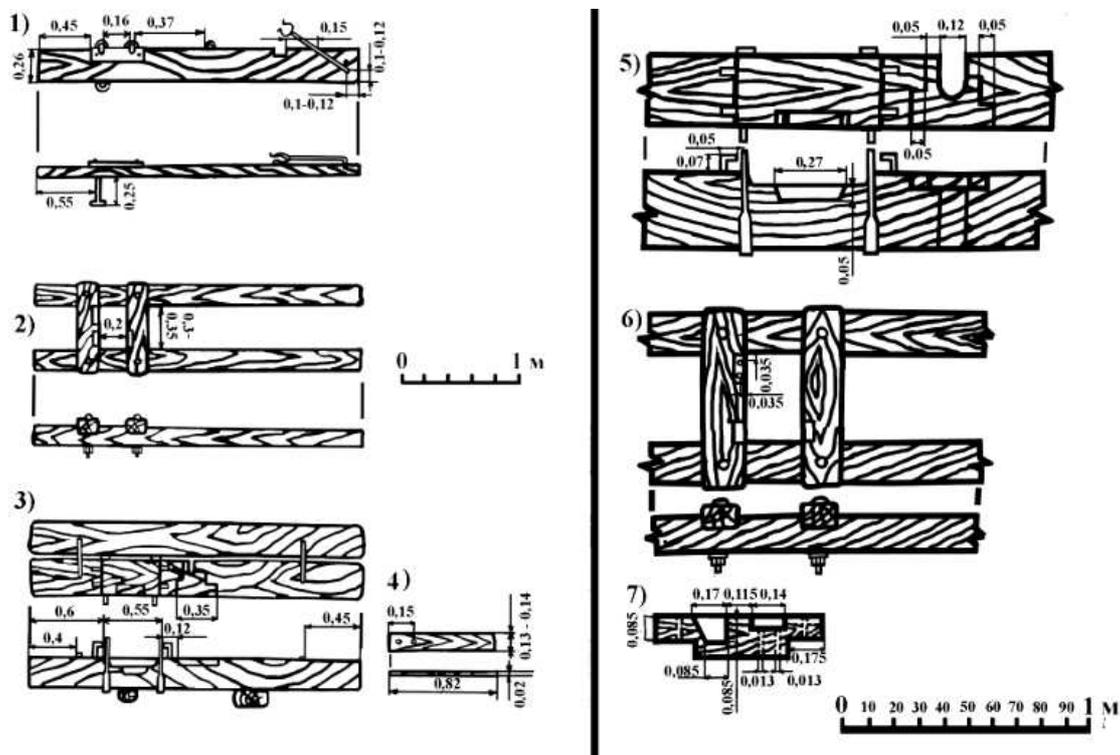


Рис. 4. Деревянные части для установки колодезных механизмов с частичными обмерами:

- 1 – опорная балка для передаточного механизма; 2 – опора под насос нижней насосной площадки;
3 – опора под насос верхней насосной площадки; 4 – доска деревянной обшивки от колодезного домика;
5 – вырезы на бревне от верхней насосной площадки; 6 и 7 – опорная рама и вырезы под насосы на нижней насосной площадке

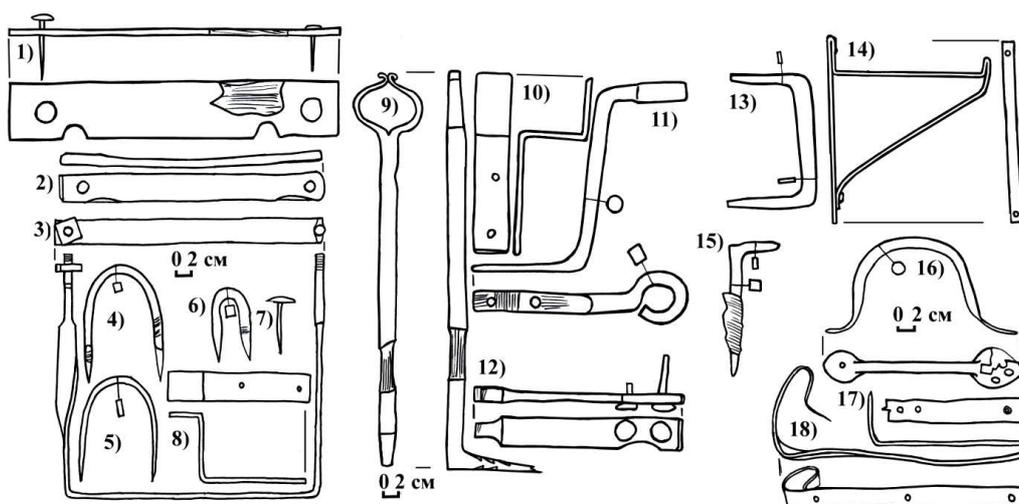


Рис. 5. Скобяные детали от колодезных механизмов:

- 1, 4 – 7, 9, 11 – детали от опорных брусков для передаточных механизмов;
2, 8, 10, 12 – колодезные детали, место и расположение которых в колодезных конструкциях не определено;
3, 15, 17 – скобяные детали от верхней колодезной площадки; скобы от опорных брёвен для промежуточного агрегата;
14 – кронштейн под трубы; 16 и 18 – ручка и петля от колодезной надстройки

На глубине около 17,8 м от дневной поверхности была обнаружена опорная площадка под насос, устроенная при реконструкции коллегиума под кадетский корпус. Для установки насоса были встроены два спаренных бревна сечением 0,25×0,3 м каждое, общая ширина площадки 0,6 м, брёвна были стянуты скобами. Сечение брусков (брёвен) было близко к тем, что использовали при перестройке в 1831 году крыш корпусов «А», «Б», «Г». На «южном» бревне имелись пазы и врезки под корпус и детали насоса(?). В качестве крепежа были использованы П-образные скобы и Г-образные костыли. Там же, в центре бревна, имелось отверстие для подвижной оси или трубы насоса. С северной стороны находилась площадка для их обслуживания – настил из досок разной ширины толщиной 3 см. Для её устройства ниже опоры насоса были задействованы два бревна 15 и 25 см в диаметре (рис. 2: 6, 7; рис. 3: 2; рис. 4: 3, 5; рис. 5: 3, 15).

Далее, на глубине 19,3±0,15 м от дневной поверхности прослеживались гнёзда 16×14 и 16×17 см для опорных балок на одном уровне. На «южной» была металлическая скоба и костыль(?) (рис. 3: 3; рис. 5: 13).

На глубине 20,5 м от дневной поверхности была расчищена ещё одна площадка под насос, которая состояла из брусков, образующих раму в западной части. Брусков был связаны между собой пазы и болтами с шестигранными гайками. В каждом бревне имелись пазы и отверстия от крепежа насосов. Таким образом, площадка имела вид рамы, собранной на болтах с круглыми головками и шестигранными гайками. Все брёвна были обложены листовым железом. Судя по сечению балок и отверстиям под них, можно предположить, что они могли остаться и от «иезуитских» конструкций (рис. 2: 9; рис. 3: 4; рис. 4: 2, 6 и 7). Под ними располагался слой сырой плотной красной глины, образывавшей замок, который закрывал резервуар колодца (рис. 2: 8; рис. 3: 5). Ниже, на глубине 21 м, прослежен настил из досок толщиной 3 см, перекрывающих кованую откидную решётку из 2-х частей с отверстием под водозаборную трубу. Отверстие располагалось в стороне от центра, ближе к скобяной лестнице (рис. 3: 5).

Далее, по периметру стенок колодца имелся выступ 15...16 см (полкирпича), который были опорой решётки. Под решёткой – только продолжение скобяной лестницы. На глубине около 22,2 м от дневной поверхности наблюдалась вода. Таким образом, труба сужалась и образовывала своеобразный изолированный от внешней среды резервуар, заполнявшийся до определённого уровня водой. Дно колодца было на глубине около 24 м от дневной поверхности (рис. 2: 11 и 12).

Пространство между нижней насосной площадкой и дощатым настилом по решётке было заполнено красной материковой вязкой глиной, образывавшей замок толщиной около 0,2 м, который защищал воду от попадания мусора и возможной попытки отравления.

Археологические находки характеризуются артефактами XVII – началом XX века. Начиная с глубины 3...5 м, встречалось большое количество обломков белого гладкого кафеля XIX–XX веков. Судя по клеймам, он был изготовлен на мануфактуре Будникова в Витебске. На глубине 7...10 м от дневной поверхности находок не наблюдалось. На глубине около 11 м были зафиксированы первые «непотревоженные» опорные деревянные балки для передаточных механизмов, находившиеся в гнёздах колодезных стенок, некоторые из них приходилось выпиливать. С этой же глубины возобновляются и находки. До уровня первой площадки под насос они представлены обломками гладкого кафеля мануфактурного производства, редкими осколками посуды и писсуара. Обломки плиток пола относятся к модернизации 1910–1914 годов. Они имеют аналогии с артефактами с корпуса «Д». Также найдены редкие обломки черепицы и изразцов, оставшихся после иезуитов – черепица необычной треугольной формы, имеет сильный нагар, её крепёжный шип был заменён на выступ.

При расчистке пространства между двумя площадками от насосов в засыпке найдено много обломков тарелок и кружек из фаянса с надписью «ПК 190 г.». Там же была найдена и форменная пуговица кадетов с изображением орла.

Самые многочисленные находки относятся к XIX – началу XX века. Они связаны с перестройками корпусов при реконструкциях этого периода. Их можно разделить на две группы: первая наиболее разнообразная и многочисленная – это ненужные выброшенные предметы из корпусов при их ремонтах во время перестройки под военный госпиталь; строительные материалы XIX – начала XX века представлены фрагментами литых чугунных плит с кольчужным орнаментом, которыми были покрыты полы лестничных клеток корпусов в 1832–1833 годах [3, с. 76, рис. 39], и обломками гладких терракотовых изразцов. Найденные на глубине 10 м гладкие эмалевые изразцы фабричного изготовления, датированы концом XIX – началом XX века. Самыми поздними артефактами являются обломки плиток пола, малоформатный шамотный кирпич с буквами «Р.О.ж.д.», обычно такие кирпичи использовали для строительства и ремонта топок котлов [3, с. 90]. Они связаны с модернизацией кадетского корпуса между 1910–1914 годами. С ней же связаны обломки черепицы с надписью «Полоцк...», обломки тонкого оконного стекла.

Находок, связанных со строительством и перестройками колодца, обнаружено немного. К XVIII веку относится скоба от лестницы колодца, вынутая при разборке обветшалой кладки оголовка.

Наиболее широко представлены остатки механизмов, установленных при перестройке коллегиума под кадетский корпус (см. рис. 5: 1–15). При выборке заполнения колодца на разных уровнях были обна-

ружены опорные бусы для устройства передаточных механизмов между насосами и конным(?) манежем возле колодца (см. рис. 4: 1). Большинство из них были повреждены и извлечены из гнёзд при засыпке колодца. Практически все они имели частично сохранившиеся скобяные изделия, представленные на-

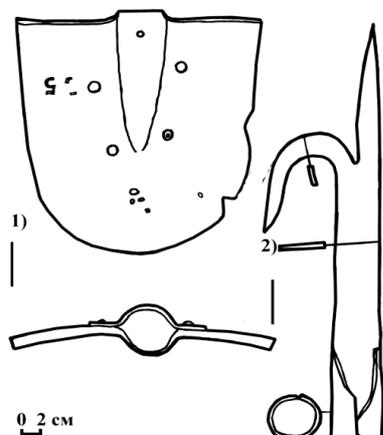


Рис. 6. Инвентарь для обслуживания колодца: 1 – лопата; 2 – багор

бойкой, дужками в виде петель, ограждавших вырезы под подвижные оси, цепи и тросы, ухваты для трубы и кронштейны с отверстиями (см. рис. 5: 1, 4–7, 11). Форма и расположение кронштейна свидетельствуют о его предназначении для фиксации составленной из звеньев непрерывной оси, которая должна была передавать движение на всю высоту колодезной шахты.

Исследования насосных площадок позволяют считать, что для крепления насоса были использованы Г-образные костыли и П-образные скобы с резьбой и квадратными гайками на концах (см. рис. 2: 6; рис. 5: 3, 15). Кроме скобяных изделий, связанных с передаточными механизмами и насосами, были найдены кронштейн для труб(?), обломки дверной петли и ручки, а также доски, которые, судя по их размерам и расположению гвоздей, могли принадлежать обшивке стен надколодезной постройки (см. рис. 4: 4; рис. 5: 16, 18). План данной надстройки указан на плане начала XX века (составлен до 1910 года, начала модернизации кадетского корпуса). К инвентарю для обслуживания колодца, возможно, относятся найденные в его заполнении лопата и багор (рис. 6).

Выводы. В ходе археологического надзора за раскопками колодца Полоцкого иезуитского коллегиума выявлено, что изучаемый колодец представлял собой сложное гидротехническое сооружение, которое за время своего существования неоднократно переустраивалось. Сама шахта колодца являла собой кирпичную кладку. Между скобами лестницы в кладке были предусмотрены гнёзда (см. рис. 2: 15, 16). Возможно, в них была устроена нижняя опора первоначального подъёмного механизма в виде бруса, проходившего через центр колодца. Ещё один из вариантов их использования – устройство опоры для строительных лесов, необходимых при кладке стенок колодцев.

С глубины около 1,5...2,0 м от дневной поверхности начинался массивный кирпичный оголовок, толщина стенок которого была около 1,1 м. Переход между стенками колодца разной толщины осуществлялся за счёт ступенчатой кирпичной кладки, выполненной с помощью напуска каждого верхнего ряда кладки на 3...4 см («малая» врезка). Дополнительное её расширение имелось только с западной стороны оголовка колодца, но её раскопка не производилась (там находится подъёмник), поэтому его назначение выяснить не представилось возможным. Вероятнее всего, здесь были ступеньки, ведущие к дорожке, соединяющей выход с кухни и арку ворот во двор.

Высота кирпичного оголовка колодца была более 0,7 м, верхняя его часть снесена при нивелировке территории. Поэтому конструкцию обрамления верха колодца и площадки перед ним выяснить не удалось. Опираясь на планы территории, можно полагать, что это был восьмигранник с отверстием в восточной стенке (вероятно, дверца входа для ремонта механизма и прочистки колодца и полива сада между корпусами «Б» и «В»).

Обнаруженные скопления камней на определённом расстоянии вокруг оголовка колодца образуют очертания круга (граница его контура расположена на расстоянии 1,4 м от внешней поверхности кирпичного оголовка) и указывают на то, что у него была обширная круглая площадка в виде обложенного булыжником возвышения. Булыжное покрытие могло полностью перекрывать кирпичную кладку оголовка трубы, примыкая к восьмигранному обрамлению верха. Территория, прилегающая к колодцу первоначально, была выложена крупной круглой галькой. Фрагмент такого покрытия обнаружен с южной стороны круглой площадки (участок «южный»). Оно имело значительный уклон в сторону колодца (перепад между верхней и нижней точками составлял 10...15 см на отрезок в 1 м), поэтому и сохранилось в месте примыкания данной отмостки к булыжникам круглой площадки (см. рис. 1).

Таким образом, реконструировать первоначальный внешний облик колодца возможно только приблизительно. Находки остатков одновременных каменных мощений позволяют полагать, что первоначально прилегающая территория к нему была выслана мелкой галькой. Поверхность вымостки с уклоном в сторону к колодцу и общим перепадом высот поверхности от 0,25 до 0,4 м. Сам же колодец имел круглый булыжный подиум диаметром около 7,3...7,5 м. Он защищал его кирпичный оголовок от оседания и размывания. Подиум был из крупных камней и мог иметь края, оформленные как в виде ступеней, так и в виде пологих скатов. Поверхность оголовка могла быть выложена кирпичом (плиткой?) или вымощена камнем. При этом она располагалась примерно на одном уровне с современной дневной поверхностью двора. Наземная часть оголовка (борта), судя по плану 1828 года, могла состоять из восьми каменных плит или иметь вид восьмиугольного сруба с отверстием в восточной стенке.

Что касается надстройки, то исходя из плана 1820-х годов, она была квадратной формы и могла иметь вид черепичного шатра на четырёх опорах. Наличие массивной кладки оголовка позволяет говорить, что его опорные столбы могли быть как деревянными (это могла быть фахверковая конструкция, квадратная или восьмигранная в плане), так и кирпичными (каменными, в виде цельных или составных изделий). Пролёты между ними могли быть как открытыми, так и закрытыми тонкими стенками или решётками. Таким образом, под шатром в помещении было достаточно места для подъёмного механизма, который имел ручку для приведения его в движение.

Остатков конструкций опор его крыши в ходе исследований выявить не удалось. Согласно плану коллегиума 1820 года крыша была квадратной (возможно четырёхскатной) в плане. На плане 1828 года крыша показана круглой (или восьмигранной?), что указывает на её значительные перестройки до реконструкции коллегиума под кадетский корпус. Сама кровля могла быть черепичной или гонтовой. С оформлением её скатов могут быть связаны и треугольные черепицы, найденные в заполнении колодца.

О виде самого первоначального водоподъёмного механизма, стоявшего в колодце при иезуитах, судить невозможно из-за отсутствия деталей. Скорее всего, сначала это был водоподъёмный механизм как система цепей и колёс с ковшами [4, с. 308], который сами же иезуиты могли позже заменить поршневым насосом с трубами. Это могло произойти в конце XVIII – начале XIX века – во время распространения новых механизмов насосов [5, с. 304–305; 6, с. 18–19]. Позднее его могли заменить более мощным поршневым насосом, связанным с резервуаром и верхом колодца трубами.

Расчистка решётки, перекрывавшей резервуар, позволила обнаружить отверстие под водозаборную трубу, расположенную в стороне от центра, в ближайшей к лестнице створке. Судя по отверстию, её внешний диаметр мог быть около 5...7 см.

Значительные перестройки наземных частей колодца и прилегающей к нему территории велись при реконструкции коллегиума под кадетский корпус. Возле юго-восточной части оголовка выявлена смешанная кладка. Незначительной глубина её залегания, наличие малоформатного кирпича и треугольная форма (напоминала разрезанный по диагонали квадрат) позволяют считать временем её появления период реконструкции коллегиума под кадетский корпус, во время которого верхняя часть колодца была перестроена. Данная кладка могла быть частью фундамента деревянной надстройки, «посаженной» на его круглую каменную площадку. С этого же времени к колодцу с восточной стороны пристраивается ворот или конный манеж для обеспечения непрерывной работы насоса. С его появлением связано устройство отверстия в восточной части оголовка колодца и установление передаточного механизма, желобов или труб. В ходе этих перестроек производится новое мощение территории булыжником. Вероятно, именно к этому времени относятся фрагменты мостовых, обнаруженные на участках «северный», «восточный», «юго-западный». Исходя из плана начала XX века и найденных находок можно полагать, что эта надстройка была двухкамерным каркасным или срубным строением с двумя помещениями для манежа и колодца, с входом с востока и стеклянными окнами в северной стене.

Позднее, при перестройке колодца в начале XX века (возможно при подготовке к 75-летию кадетского корпуса в 1910 году или модернизации 1910–1914 годов) мостовые были использованы в качестве цементно-известкового фундамента под деревянную опору манежа. Данная опора была устроена в виде крестовины возле восточной части оголовка колодезной трубы и примыкала к нему на месте замурованного пролома. В перекрестии деревянных брусов находилась ось манежа. Сами брусы сечением около 20×20 см обмазывались раствором. Обмазка частично сохранилась и сейчас. Вероятно, тогда же была проведена и повторная отсыпка двора булыжником (участок «северный») [3, с. 81, 91]. Позднее колодец полностью теряет своё значение как источник не только питьевой, но и технической воды, и уже в советское время к нему подводится дренаж в виде цементной трубы. Приблизительно в 20–30-е годы XX века колодец ликвидируется окончательно, и при очередном ремонте зданий превращается в огромную мусорную яму для котельного шлака и строительного мусора. Тогда же ведётся подсыпка и нивелировка всей территории внутреннего двора, и она приближается к уровню современных нивелировочных отметок.

Большой объём информации удалось собрать об устройстве насосных механизмов, созданных при реконструкции колодца для нужд кадетского корпуса. От манежа до насосов на промежуточных балках были установлены передаточные механизмы. При этом для связи оси манежа и верхнего звена передаточного механизма была прорублена восточная стенка кладки оголовка колодца. Между ними была устроена передача при помощи цепей или тросов. Далее движение передавалось сверху вниз, к насосу, с помощью вертикальной оси. Она могла собираться как сплошной конструкцией из отдельных звеньев, так и секциями, связанными через систему шестерёнчатых передач, имевшихся на каждой опорной балке. Возможно, что одним из элементов фиксации главной подвижной оси были кронштейны, один из которых сохранился на опорной балке. Он был ориентирован на вырез в балке и железной набойке. Судя по количеству гнезд, для опорных балок передаточный механизм состоял из 14 секций и завершался у верхней насосной площадки. Вода от данного насоса подавалась на поверхность земли сначала по узкой массивной трубе с внешним диаметром до 5...7 см, закреплённой ухватами за опорные балки, а затем, после

одной из реконструкций, – по широкой прикреплённой ухватами к стенке. Она была жестяной в диаметре 15...20 см. Что касается водозаборной трубы, для неё в центре брусков насосной площадки был устроен специальный вырез. Диаметр трубы для него около 5...7 см. Не исключено, что для этого были приспособлены трубы от «иезуитского» механизма. Сам насос имел жёсткую систему крепежа и, возможно, представлял собой двухпоршневую конструкцию, известную с Античности [6, с. 18]. Это был наиболее надёжный вид устройства, позволявший поднимать воду на большую высоту в вертикальном направлении [6, с. 18–19]. Не исключено, что при перестройках и реконструкциях колодца [3, с. 78, 91], кроме основного подъёмно-передаточного механизма в колодце и надстройки над ним, были устроены распределительные бачки с малыми насосами. Они позволяли уменьшить давление в трубах и вывести кран во двор. Именно для их защиты и была устроена деревянная надстройка над оголовком и манежем колодца.

В первоначальном виде сегодня сохранился только резервуар для воды и устройство стенок колодца. Благодаря значительной глубине колодезной шахты (примерно на уровне дна Западной Двины) в нём постоянно была вода. Подпитка его велась за счёт как водоносного слоя, так и грунтовых вод, содержащихся в насыпном слое (культурный слой и пласты песчано-глинистого материка). По этой же причине были устроены и двойные стенки трубы. Кирпичная кладка и песок между образованными ею оболочками выполняли функцию фильтра.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют, что изучаемый нами колодец был уникальным и сложным гидротехническим сооружением, которое не раз перестраивалось. Отсутствие полной и достоверной информации о его устройстве требует дальнейшего уточнения и проверки предлагаемых выводов и реконструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глинник, В.В. Благоустройство территории комплекса иезуитского коллегия в г. Полоцке. Комплексные научные изыскания / В.В. Глинник. – Минск, 2004. – (Архив В.В. Глинника).
2. Кукуня, О.Г. Объект: Памятник архитектуры XVIII в. (Корп. «А» иезуитского коллегия в г. Полоцке): Эскизный проект, комплексные научные изыскания. Историко-архивные и библиографические исследования / О.Г. Кукуня, В.Е. Соболев. Т. 2, кн. 5. – Минск, 1994. – (Архив АП «Белорусский реставрационный проектный институт»).
3. Соловьёв, А.А. Полоцкий иезуитский коллегия в ретроспективе (1581–1914): архитектурно-археологический очерк / А.А. Соловьёв. – Полоцк: Полоцк. книжное изд-во, 2012. – 97 с.
4. Квитковский, Ю.В. Насосные агрегаты / Ю.В. Квитковский // БСЭ: в 30 т.; гл. ред. А.М. Прохоров. – Изд. 3-е. – М.: Сов. Энцикл., 1974. – Т. 17. – 616 с.
5. Квитковский, Ю.В. Насосы / Ю.В. Квитковский // БСЭ: в 30 т.; гл. ред. А.М. Прохоров. – Изд. 3-е. – М.: Сов. Энцикл., 1974. – Т. 17. – 616 с.
6. Насосы: справочное пособие / К. Бадеке [и др.]; под ред. В. Плётнера; пер. с нем. В.В. Малюшенко, М.К. Бобок. – М.: Машиностроение, 1979. – 502 с.

Поступила 24.11.2014

HISTORI AND ARCHITECTURE OF UNDERGROUND STRUCTURES: POLOCK JESUIT COLLEGIUM (MIDDLE XVIII – OF THE BEGINNING XX CENTURU)

A. SOLOVYOV

The article dwells on the results of the exploration of Jesuit well – the oldest hydraulic structure in Polotsk. During the clearance new samples of building material and household items relating to the history of Polotsk Jesuit Collegium and the Cadet building were collected. We have also studied the remains of wooden structures and locksmith's work related to the pumping and lifting mechanisms added to the well during the restructuring of the former Jesuit Collegium into the Cadet building. On the basis of the findings it was possible to conjecture its internal structure, and to partially reconstruct its appearance while studying the Cadet building.

УДК 728.22

ТИПЫ ЖИЛЫХ ЯЧЕЕК В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ЖИЛИЩЕ

Е.Ю. ОРЛОВСКАЯ

(Полоцкий государственный университет)

Представлена типология жилых ячеек в домах специализированного типа: по времени и характеру проживания; уровню комфорта; составу помещений; количеству проживающих и степени их родства; количеству уровней, в которых располагается жилая ячейка; виду освещения. Выявлены средние параметры площади, глубины и ширины по световому фронту близких по составу помещений жилых ячеек; а также наиболее характерные типы ячеек, предназначенных для молодёжи, в том числе студентов, пожилых людей и для общежитий. Определены основные факторы, влияющие на используемые при проектировании габариты жилых ячеек. В результате проведенного исследования планировочных особенностей жилых ячеек, расположенных в одном и двух уровнях, определена градация уровней их комфорта.

Введение. Проблема дома – одна из острейших проблем человечества. Она порождена социальными причинами и имеет социальное содержание. Пути ее решения не могут быть чисто техническими, инженерно-строительными и архитектурно-художественными. Они существенно зависят от экономических, политических и экологических обстоятельств [1].

На современном этапе развития успешная реализация государственных программ жилищного строительства обусловливается в значительной степени применением принципиально новых типов жилищ, отвечающих потребностям различных категорий населения – в последнее время намечается тенденция к сокращению количества традиционных, состоящих из нескольких поколений семей, в пользу малых территориально разобщённых. Появилась необходимость выявления жилища специализированного типа, то есть жилых помещений и домов, предназначенных для проживания домохозяйств, пользование жилыми помещениями общего типа для которых невозможно либо затруднено [2]. К специальным жилым помещениям относятся: общежития; квартиры; жилые дома для инвалидов, престарелых; жилые дома маневренного фонда; жилые дома для экстренного заселения жертв стихийных, техногенных, социальных катастроф; приюты для бездомных и т.п. [3].

Цель данной работы – изучить планировочные решения жилых ячеек в домах специализированного типа и определить их типологические разновидности.

Основным методом исследования является анализ научных трудов, конкурсных, проектных и методических материалов по изучаемой проблеме, материалов международной компьютерной сети «Internet».

Основная часть. Для выявления основных типов жилых ячеек в специализированном жилище нами проведено сравнение планировочных решений ячеек, предназначенных для проживания разных социальных групп населения (молодёжи (студентов), пожилых людей), а также общежитий, построенных в Беларуси и за рубежом в конце XX начале XXI века. В результате изучения была выявлена типология жилых ячеек: по времени и характеру проживания, уровню комфорта, составу помещений, количеству проживающих и степени их родства, количеству уровней и виду освещения.

В зависимости от **времени и характера проживания** могут быть выделены жилые ячейки:

- для лиц *ограниченно постоянного проживания*: молодёжи, студентов, родителей-одиночек, молодых семей, одиноких или проживающих отдельно пожилых людей;

- для лиц *временного проживания*: трудовые мигранты, командировочные и т.д.

По **составу помещений** были выделены 12 типов жилых ячеек: «а» – комната; «б» – комната + санузел; «в» – комната + санузел + кухня-ниша; «г» – комната + санузел + кухня-ниша + спальня; «д» – комната + санузел + кухня-ниша + 2 спальни; «е» – комната + санузел + кухня; «ж» – комната + санузел + кухня + спальня; «з» – комната + санузел + кухня + 2 спальни; «и» – блок из нескольких комнат + санузел; «к» – блок из нескольких комнат + санузел + кухня-ниша; «л» – блок из нескольких комнат + санузел + общая с кухней-нишей; «м» – блок из нескольких комнат + санузел + кухня.

Наиболее простая по структуре *ячейка типа «а»* представляет собой комнату, которая предназначена для проживания одного, двух, реже – трёх, четырёх, десяти и даже двадцати человек. Основные параметры таких ячеек, предназначенных для проживания одного человека, составляют 5,1...9,9 м², двоих – 9,6...15,2 м², троих и более – свыше 16,5 м². Но наиболее распространены жилые ячейки площадью от 9,0 до 16,0 м², их глубина на одного человека составляет 3,2...3,9 м, ширина – 1,6...3,0 м; на двоих – глубина 3,1...4,6, ширина 3,0...3,5 м.

В состав *жилой ячейки типа «б»* входят: комната площадью 7,9...31,8 м², предназначенная для проживания одного, двух, реже – трёх, четырёх человек; санузел (душ + умывальник + унитаз) площадью 2,3...5,5 м²; прихожая 1,0...8,6 м². Глубина ячейки такого типа на одного человека составляет 4,2...6,4 м, ширина – 2,4...4,0 м; на двоих проживающих глубина – 4,5...6,0 м, ширина – 3,1...6,6 м. Общая площадь жилой ячейки типа «б» на одного человека составляет 11,4...24,6 м², на двоих – 17,7...35,5 м². Но наиболее распространены жилые ячейки площадью от 18,0 до 28,0 м².

Жилая ячейка типа «в», как правило, рассчитана на одного, двух человек и представляет собой квартиру-студию. В состав помещений входят: общая комната площадью 10,4...48,8 м²; кухня-ниша, которая может входить в состав общей комнаты, прихожей или занимать отдельное помещение площадью 3,1...5,8 м²; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) – 2,7...7,2 м²; прихожая – 2,4...10,0 м². Глубина ячейки составляет 4,0...10,6 м, ширина – 3,3...6,0 м. В состав ячейки могут входить кладовые. Общая площадь ячейки – 18,9...64,2 м², но наиболее распространены жилые ячейки площадью от 18,0 до 29,0 м².

Жилая ячейка типа «г», как правило, рассчитана на одного, двух, максимум трёх человек и представляет собой квартиру-студию с отдельной спальней комнатой. В состав помещений входят: общая комната площадью 9,0...34,8 м²; кухня-ниша, которая может быть совмещена с общей комнатой, прихожей или занимать отдельное помещение площадью 2,9...4,8 м²; спальня – 7,4...25,9 м²; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) – 2,4...6,0 м²; прихожая – 2,5...15,5 м². В состав ячейки могут входить кладовые. Глубина ячейки колеблется от 4,3 до 9,6 м, ширина – от 5,1 до 10,2 м. Общая площадь ячейки составляет 27,8...71,4 м², но наиболее распространены ячейки площадью 28,0...38,0 м².

Жилая ячейка типа «д», как правило, рассчитана на двух, трёх, максимум четырёх человек и представляет собой квартиру-студию с двумя отдельными спальнями. В состав помещений входят: общая комната с кухней нишей площадью 17,7...24,6 м², две спальни – 4,1...16,0 м² каждая; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) – 4,3...5,9 м² и прихожая – 3,6...4,8 м². В состав ячейки могут входить кладовые. Глубина ячейки колеблется от 3,6 до 8,3 м, ширина – от 9,3 до 12,5 м. Общая площадь ячейки – 40,9...80,0 м².

Жилая ячейка типа «е», как правило, рассчитана на одного, максимум двух человек и представляет собой однокомнатную квартиру традиционной планировки. В состав помещений входят: общая комната площадью 12,2...18,8 м²; кухня – 6,9...8,8 м²; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) – 2,9...3,7 м², может быть совмещённым или отдельным; прихожая – 2,6...9,5 м². В состав ячейки могут входить кладовые. Глубина ячейки колеблется от 4,5 до 5,7 м, ширина – от 5,7 до 7,3 м. Общая площадь ячейки составляет 27,6...42,8 м², но наиболее распространены ячейки площадью 28,0...34,0 м².

На рисунках 1, 2 представлены жилые ячейки типа «а» и «е» соответственно.

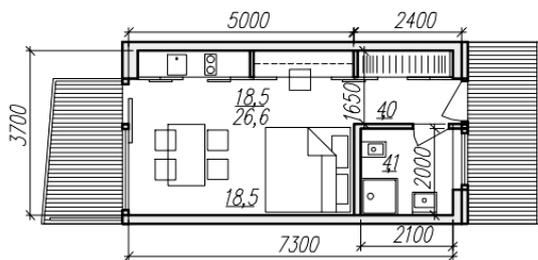


Рис. 1. Жилая ячейка

в проекте студенческого общежития в Париже

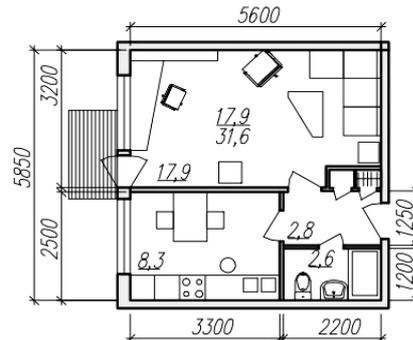


Рис. 2. Жилая ячейка

в многоэтажном жилом доме гостиничного типа

Жилая ячейка типа «ж», как правило, рассчитана на одного, двух, максимум трёх человек. В состав помещений входят: общая комната площадью 13,3...20,5 м²; кухня – 6,0...12,9 м²; спальня – 9,4...14,4 м²; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) – 2,8...5,9 м², может быть совмещённым или отдельным; прихожая – 2,6...7,4 м². В состав ячейки могут входить кладовые. Глубина ячейки колеблется от 4,5 до 12,0 м, ширина – от 6,0 до 8,7 м. Общая площадь ячейки составляет 36,7...58,0 м², но наиболее распространены ячейки площадью 41,0...46,0 м².

Жилая ячейка типа «з», как правило, рассчитана на двух, трёх, максимум четырёх человек. В состав помещений входят: общая комната площадью 11,2...21,0 м²; кухня – 6,0...13,5 м²; спальни – 8,4...14,5 м² каждая; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) – 4,9...6,0 м², может быть совмещённым или отдельным; прихожая – 3,1...10,2 м². В состав ячейки могут входить кладовые. Глубина ячейки колеблется от 6,4 до 9,0 м, ширина – от 7,2 до 9,3 м. Общая площадь ячейки составляет 45,2...68,2 м².

В состав помещений жилой ячейки типа «и» входят: две-три жилые комнаты площадью 11,9...35,6 м² каждая; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) – 3,6...13,9 м²; прихожая – 3,9...27,7 м²; также могут входить кладовые. Глубина ячейки колеблется от 4,8 до 9,6 м, ширина – от 5,4 до 15,0 м. Общая площадь ячейки составляет 36,9...144,0 м², но наиболее распространены ячейки площадью 40,0...44,0 м².

В состав помещений жилой ячейки типа «к» входят: две жилые комнаты площадью 12,3...21,2 м² каждая; кухня-ниша – 4,6...8,1 м²; санузел (душ + умывальник + унитаз) – 3,2...4,6 м² и прихожая – 2,6...6,6 м²; могут входить и кладовые. Глубина ячейки колеблется от 6,4 до 10,5 м, ширина – от 6,0 до 7,2 м. Общая площадь ячейки составляет 36,5...52,2 м².

В состав помещений жилой ячейки типа «л» входят: от двух до четырёх жилых комнат площадью 7,6...14,0 м² каждая; общая комната с кухней-нишей – 9,4...36,6 м²; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) площадью 3,6...5,0 м², преимущественно раздельный. В состав жилых комнат могут входить кладовые площадью 0,8...1,8 м². Глубина ячейки колеблется от 3,7 до 9,2 м, ширина – от 3,9 до 12,6 м. Общая площадь ячейки составляет 36,5...52,2 м².

В состав помещений жилой ячейки типа «м» входят: две жилые комнаты площадью 13,8...24,0 м² каждая; кухня – 9,7...11,0 м²; санузел (душ или ванная + умывальник + унитаз) – 4,6...20,0 м², преимущественно раздельный; прихожая 5,0 м². В состав жилых комнат могут входить кладовые. Глубина ячейки колеблется от 6,0 до 9,0 м; ширина – от 9,6 до 12,0 м. Общая площадь ячейки составляет 54,5...113,0 м².

Средние габариты и площади жилых ячеек представлены в таблице.

Средние габариты и площади жилых ячеек в домах специализированного типа

Тип ячейки	Общая площадь, м ²	Глубина, м	Ширина по световому фронту, м	Площадь общей комнаты, м ²	Площадь санузла, м ²	Площадь прихожей, м ²	Площадь кухни или кухни-ниши, м ²	Площадь спальни или жилой комнаты, м ²
«а»	16,0	4,6	3,3	16,0	–	–	–	–
«б»	23,5	5,7	4,0	16,5	3,7	3,4	–	–
«в»	39,6	7,0	4,6	с учётом кухни-ниши – 27,0; без – 13,3	4,3	5,1	4,3	–
«г»	45,7	6,8	6,7	с учётом кухни-ниши – 21,7; без – 15,2	4,9	6,5	3,9	14,1
«д»	60,7	6,0	10,7	с учётом кухни-ниши – 21,0	5,5	4,0	–	11,0
«е»	33,2	5,2	7,0	16,2	3,5	5,2	7,4	–
«ж»	45,8	7,0	6,9	16,1	4,2	4,6	7,9	12,0
«з»	58,7	7,6	8,5	16,1	5,3	5,8	8,6	11,5
«и»	55,4	6,7	8,5	–	5,2	9,7	–	17,5
«к»	46,0	8,5	6,5	–	3,9	4,0	6,5	16,0
«л»	56,5	7,3	7,8	с учётом кухни-ниши – 20,2	4,2	–	–	10,2
«м»	79,4	7,2	11,4	–	9,7	–	10,2	21,5

В планировке более развитых жилых ячеек (начиная с типа «б») санузел занимает различное положение: блокируется с санузлом соседней ячейки, примыкает к стене галереи или коридору, иногда имеет островное положение.

В целом размер ячеек определяется временем проживания, на которое они рассчитаны, демографическим положением проживающих и их социальным статусом.

Наибольшее распространение в домах для молодёжи получили: ячейки типа «в» (комната + санузел + кухня-ниша); «г» (комната + санузел + кухня-ниша + спальня); «д» (комната + санузел + кухня-ниша + 2 спальни). В домах для студентов – «а» (комната); «б» (комната + санузел); «в» (комната + санузел + кухня-ниша). В домах, предназначенных для проживания пожилых людей, – «б» (комната + санузел), «е» (комната + санузел + кухня); «ж» (комната + санузел + кухня + спальня); «з» (комната + санузел + кухня + 2 спальни). В общежитиях – «а» (комната); «б» (комната + санузел); «и» (блок из нескольких комнат + санузел); «к» (блок из нескольких комнат + санузел + кухня-ниша); «л» (блок из нескольких комнат + санузел + общая с кухней нишей); «м» (блок из нескольких комнат + санузел + кухня).

В зависимости от количества проживающих и степени их родства могут быть выделены:

- жилая ячейка, предназначенная для проживания одного человека;
- жилая ячейка, предназначенная для родственного проживания (молодой или неполной семьи из двух и более человек);
- жилая ячейка, предназначенная для проживания нескольких человек, не связанных родством.

По количеству уровней встречаются жилые ячейки: одноуровневые; двухуровневые.

Перспективным для организации специализированного жилища могут стать разработанные в 20–30-е годы XX века двухуровневые экономичные ячейки типа F, 2F и K, запроектированные в доме Наркомфина по проекту М. Гинзбурга, М. Милиниса и инженера С. Прохорова в Москве. В те годы, так же как и сейчас, происходил поиск нового типа жилища.

Ячейки типа F и 2F (рис. 3) это малометражные одно-, полторакомнатные квартиры, расположенные в двух уровнях. Вход в жилые ячейки, находящиеся на верхнем и нижнем уровне, организован с

одного среднего уровня (рис. 3, а). При входе, на среднем уровне, располагается прихожая площадью 2,3 м² и санузел (унитаз) – 1,1 м². В состав помещений ячейки F, уходящей на уровень ниже (рис. 3, б), после спуска по лестнице, мы попадаем в общую комнату с типовым кухонным элементом, спальней и умывальником площадью 33,6 м². Вместо умывальника, могли быть предусмотрены ванная комната или душевая. В состав ячейки 2F, уходящей на пол-уровня вверх (рис. 3, в), после подъёма по лестнице мы попадаем в общую комнату с типовым кухонным элементом – 17,9 м², ещё на пол-уровня выше в спальню с умывальником 15,3 м². Вместо умывальника могут предусматриваться ванная комната или душевая.

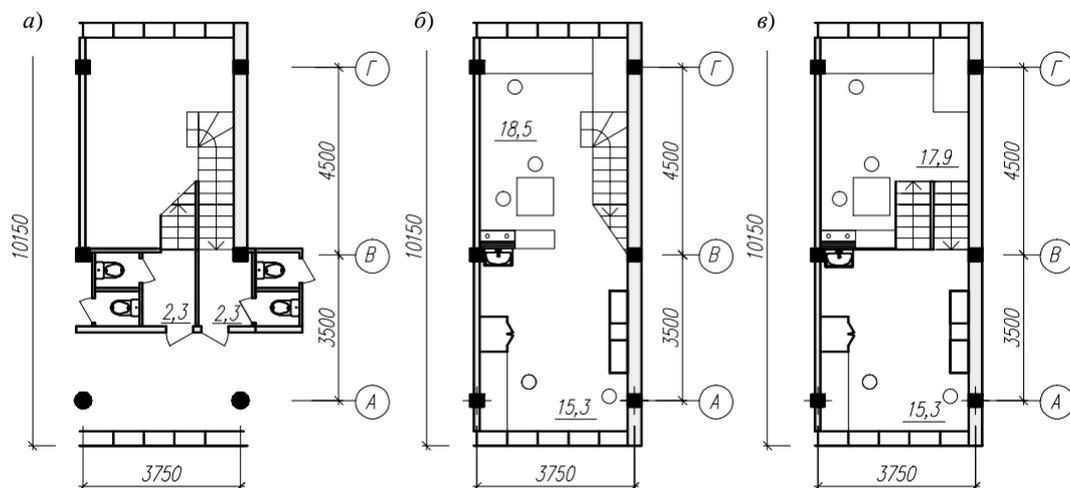


Рис. 3. Жилые ячейки типа F и 2F в доме Наркомфина по проекту М. Гинзбурга, М. Милиниса и инженера С. Прохорова в Москве:
а – средний уровень, ячейки типа F и 2F; б – нижний уровень, ячейка типа F; в – верхний уровень, ячейка типа 2F

Общая площадь каждой ячейки типа F и 2 F составляет 37,0 м². Глубина ячеек 9,5 м (от окна до окна), ширина 3,75 м. Сквозное проветривание – двухстороннее освещение.

Ячейка типа K (рис. 4) – это квартира для большой семьи. В состав нижнего уровня входят: прихожая площадью 6,2 м²; кухня 4,3 м²; общая комната 25 м², которая имеет высоту в два уровня. В составе верхнего – две спальни (12,1 и 19,9 м²), ванная с уборной 5,7 м² и холл 6,0 м². Глубина ячейки на нижнем уровне составляет 5,0 м (от окна до стены), на верхнем – 9,5 м (от окна до окна), ширина по световому фронту – 7,5 м. Сквозное проветривание – двухстороннее освещение. Площадь всей ячейки – 79,2 м². Недостатком данного типа ячеек являются стоящие в общей комнате нижнего уровня и в спальне верхнего уровня колонны.

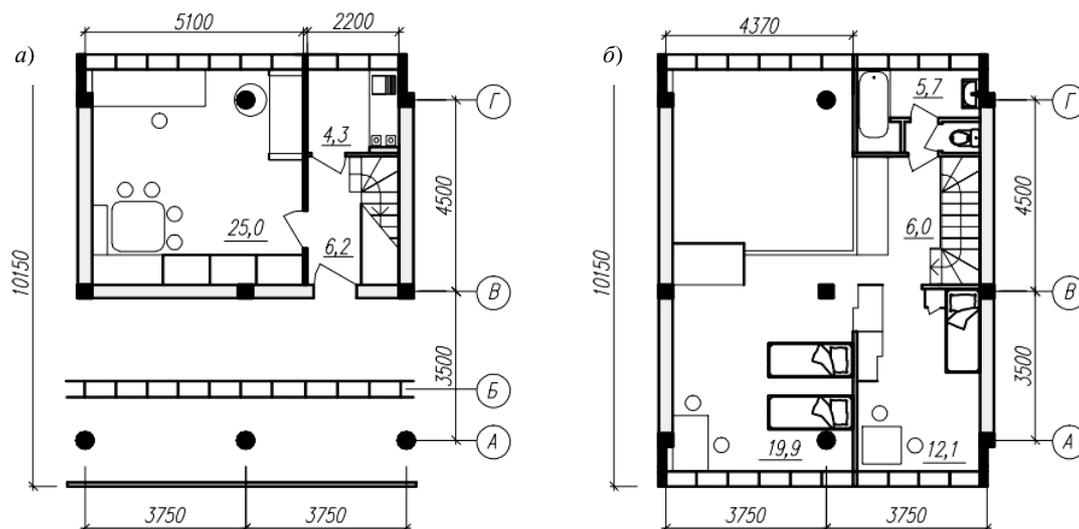


Рис. 4. Жилая ячейка типа K в доме Наркомфина по проекту М. Гинзбурга, М. Милиниса и инженера С. Прохорова в Москве:
а – нижний уровень; б – верхний уровень

По **уровню комфорта** (рис. 5) в домах специализированного типа жилые ячейки могут быть разделены на минимальный, стандартный и высокий.

По **виду освещения** жилые ячейки могут иметь одностороннее, двустороннее и трёхстороннее естественное освещение. Но преобладают жилые ячейки с односторонним световым фронтом.

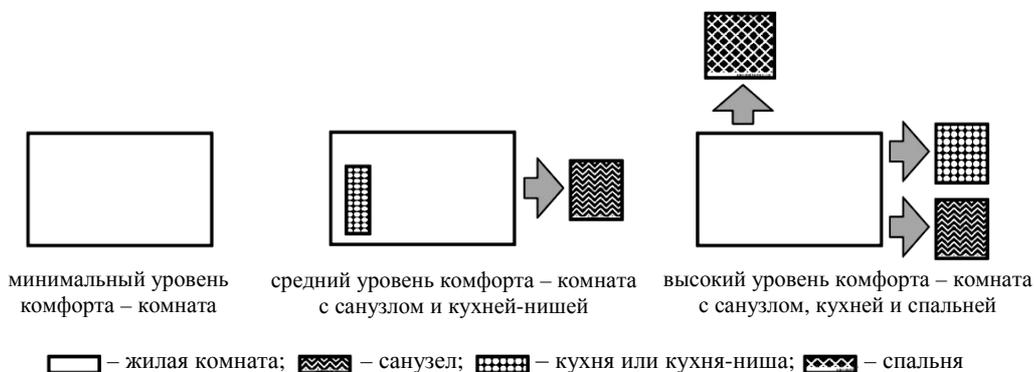


Рис. 5. Типы жилых ячеек по уровню комфорта

Заключение. Развитие жилищного фонда с учетом требований конкретных социально-демографических групп населения будет способствовать решению жилищной проблемы. Размер ячеек должен определяться временем проживания, на которое они рассчитаны, демографическим положением проживающих и их социальным статусом, также необходимо учитывать экономические, политические и экологические обстоятельства в стране в целом. В сложившейся городской застройке восполнить недостаток жилищ специализированного типа целесообразно путем перестроек существующих жилых домов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Змеул, С.Г. Архитектурная типология зданий и сооружений: учебник для вузов / С.Г. Змеул, Б.А. Маханько. – Изд. стереотип. – М.: Архитектура-С, 2004. – 240 с.
2. Современные тенденции развития типологии жилищ специального типа: отчет о НИР «Исследование особенностей развития современной гражданской архитектуры Беларуси. Строительство и архитектура / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. С.А. Сергачёв. – Минск, 2010. – № ГБ 06-291.
3. Жилище. Основные положения: СТБ 1154-99. – Официальное издание. – Введён с 1999.07.01. – Минск: МАИС Респ. Беларусь, 1999. – 13 с. – (Государственный стандарт Республики Беларусь).

Поступила 04.06.2015

TYPES OF LIVING UNITS IN THE SPECIALIZED DWELLING

E. ORLOVSKYA

The typology presented concerns living units in the specialized dwellings that consider the following: the usability of the residence given the time spent in the residence and the specific purpose that it is utilized in; level of comfort; composition of premises; quantity of living persons and the degree of their kinship; the number of levels that living unit includes; and type of lighting. Average parameters of area, depth and width according to the light-wave parameter, which are similar in composition space of living units are identified; as well the most typical types of units for the young people, students, the elderly and dormitories. The main factors that affect the size used in the design of living units have been identified. The research conducted into the planning specifics concerning living units arranged on one and two levels reveals the incremental changes in their comfort levels.

УДК 727.11

**УЧРЕЖДЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДЕТЕЙ
В АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ГОРОДА
(НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА МИНСКА)****Е.Н. КНИГА****(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

Исследуется система учреждений дополнительного образования детей в аспекте архитектурной организации образовательной среды города. На основании нормативных документов Республики Беларусь определены цели и содержание дополнительного образования детей, перечень направлений организации свободного времени детей, типы и виды учреждений, осуществляющих деятельность по данным направлениям. Охарактеризованы учреждения дополнительного образования детей в соответствии с требованиями к их размещению в структуре города. Рассмотрено архитектурно-градостроительное расположение учреждений дополнительного образования в городе Минске, выявлены недостатки и определен потенциал развития системы дополнительного образования. По результатам исследования предложена схема создания системы учреждений дополнительного образования детей в городе Минске.

Введение. Учреждения дополнительного образования Республики Беларусь решают проблемы, связанные с обеспечением необходимых условий для личностного развития, укрепления здоровья, профессиональной ориентации, раскрытия творческих способностей у детей в возрасте от 6 до 18 лет. Будучи открытой, мобильной и гибкой, система дополнительного образования детей обладает способностью быстрого и точного реагирования на образовательные потребности, возникающие в семье и школе, способствует адаптации детей к самостоятельной жизни в обществе, содействует формированию общей культуры, позволяет организовать содержательный досуг.

Требования современного общества к уровню образования человека нельзя удовлетворить исключительно средствами базового образования. Формализованное базовое образование всё больше нуждается в дополняющем его неформализованном образовании, которое на настоящий момент является источником развития способностей и интересов личности, а также фактором, обуславливающим её социальное и профессиональное самоопределение. Концепция непрерывного воспитания детей и учащейся молодежи, утверждённая в Республике Беларусь, предполагает органичное единство учебного и воспитательного процессов в повседневной внеучебной и досуговой деятельности.

На сегодняшний день система учреждений дополнительного образования детей (УчДОД) в Республике Беларусь функционирует недостаточно слаженно, имеет место разрыв между положениями нормативных документов, а именно Кодексом Республики Беларусь об образовании [1], Положением об учреждении дополнительного образования детей и молодежи [2], и реализацией их положений на практике. Нарушаются требования к *архитектурно-градостроительному размещению учреждений дополнительного образования детей в структуре города.*

Размещение УчДОД в архитектурно-градостроительной среде Минска носит хаотичный характер, осуществляется без учёта взаимосвязи деятельности УчДОД республиканского, городского и регионального значения, наблюдается неравномерное распределение УчДОД разных типов на территории города. Часто выбор мест размещения УчДОД не входит в число приоритетных задач руководства города. Как правило, новые учреждения располагаются на реконструированных территориях, в подвальных помещениях и прочих местах, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормам и эстетическим требованиям. Как следствие, снижается качество образовательных услуг, не используется в полной мере потенциал учреждений дополнительного образования детей в целом.

Актуальным является установление взаимосвязи целей, содержания и направлений дополнительного образования детей на основании нормативных документов Республики Беларусь, описание системы УчДОД в соответствии с требованиями к архитектурной организации образовательной среды, определение круга проблем в данной сфере, выявление потенциала их решения в Республике Беларусь.

Изучение системы дополнительного образования детей в городе Минске, типов и особенностей размещения УчДОД на территории города, выявление недостатков и потенциала архитектурной организации УчДОД позволило разработать модель системы учреждений дополнительного образования детей в городе Минске, которая отражает новизну данного исследования.

Основная часть. Ценность дополнительного образования детей состоит в том, что оно усиливает вариативную составляющую общеобразовательных программ, способствует практическому применению знаний и навыков, полученных в школе, стимулирует познавательную мотивацию обучающихся. Важной особенностью дополнительного образования является и то, что оно даёт возможность учащимся развивать творческий потенциал и способствует адаптации в современном обществе. Дети получают возможность самостоятельно планировать досуг, учатся распределять время.

Дополнительное образование называют поисковым образованием, апробирующим иные, отличные от традиционных, пути решения проблем и выхода из различных жизненных ситуаций. Дополнительное образование предоставляет возможность выбора, стимулирует к личностному развитию. Таким образом, в настоящее время более чем актуально рассмотрение условий развития дополнительного образования детей в Беларуси. Понятие «дополнительное образование детей и молодежи», основные его цели, задачи и содержание сформулированы в Кодексе Республики Беларусь об образовании [1], в Положении об учреждении дополнительного образования детей и молодежи [2].

Определение содержания и структуры понятий «дополнительное образование» и «образовательная среда», исследование системы учреждений дополнительного образования детей, а также разработка подходов к архитектуре УчДОД отражены в работах Н.И. Демидовой [3], А.О. Кадуриной [4], М.Л. Козлова [5], Н.В. Микляевой [6] и др. Зонирование и проблемы архитектурной организации образовательной среды учреждений дополнительного образования рассматривали А.Л. Гельфонд [7], И.В. Козлова [8], В.М. Молчанов [9], И.В. Потехина [10], А.В. Степанов, В.И. Мальгин, Г.И. Иванова [11] и др.

В структуре дополнительного образования детей выделяют различные направления, охватывающие множество сфер деятельности человека, в связи с чем дополнительное образование детей способно удовлетворять разнообразные потребности и интересы личности. Вся сеть УчДОД должна способствовать эффективному вовлечению детей в эти учреждения целенаправленной организацией их свободного времени. Как результат, в Беларуси количество детей, охваченных дополнительным образованием, постоянно растёт.

В нашей стране организация свободного времени детей в УчДОД осуществляется по направлениям, определённым Кодексом Республики Беларусь об образовании (статья 229. Образовательная программа дополнительного образования детей и молодежи) [1]: техническому; спортивно-техническому; туристско-краеведческому; эколого-биологическому; физкультурно-спортивному; художественному; социально-экономическому; социально-педагогическому; культурно-досуговому; военно-патриотическому; естественно-математическому; общественно-гуманитарному и иным профилям.

Основными задачами, которые ставит перед собой система дополнительного образования, являются: *развивающая* (развитие творческих способностей, потребности в самосовершенствовании, в активном творчестве, непрерывный рост культурного потенциала); *обучающая* (техническое, эстетическое образование, освоение индивидуальной и коллективной деятельности, начальная профессиональная ориентация); *воспитательная, коммуникативная* (обучение навыкам общения, формирование у детей потребности в групповом и межличностном общении).

К учреждениям дополнительного образования относятся центры и дворцы детского творчества, детские клубы, дома творчества, станции юных техников, школы искусств и др. [12].

В зависимости от количества реализуемых направлений, УчДОД подразделяются на мультифункциональные и монофункциональные. *Мультифункциональные учреждения* организуют работу с учащимися по различным направлениям, они размещаются в жилых микрорайонах, преимущественно там, где расположены школы, детские сады и другие общеобразовательные учреждения. *Монофункциональные УчДОД* организуют работу по определённому направлению дополнительного образования и являются учреждениями городского значения. В Минске и других городах Беларуси наиболее развита система мультифункциональных УчДОД, в первую очередь это Дворцы детей и молодежи городского, районного и республиканского значения.

Внешкольные учреждения по требованиям к их размещению в структуре города делятся на категории:

- *шаговой доступности (микрорайонные)* учреждения, связанные пространственно с общеобразовательными школами и комплексами учебных заведений при жилых образованиях. В них происходит первое знакомство со сферой дополнительного образования. Дети осваивают навыки совместной деятельности и группового общения. Такие объекты располагаются в радиусе обслуживания до 10 минут пешеходной доступности, что составляет 500...700 метров;

- *периодические (районные)*, то есть учреждения районного и межрайонного значения, которые обеспечивают ориентацию в сфере дополнительного образования, знакомство с различными видами культурной деятельности и создают условия для социальной адаптации ребенка. В эти учреждения приходят дети с различным уровнем творческого потенциала. Такие учреждения являются многопрофильными и предоставляют широкий выбор деятельности в различных сферах дополнительного образования. Дети имеют возможность посещать занятия по различным направлениям дополнительного образования, что позволяет им определиться в своих интересах и способностях. Учреждения данного типа расположены, как правило, в жилых районах в радиусе обслуживания до 15 минут транспортно-пешеходной доступности, что составляет 1...1,5 километра;

- *эпизодические (городские, республиканские)* – учреждения республиканского значения (Дворцы и Дома творчества и т.п.), радиус их транспортной доступности составляет 30 минут.

Таким образом, в соответствии с требованиями к размещению внешкольных учреждений в структуре города радиус обслуживания – пешеходный и транспортный – является одним из важных факторов организации сети дополнительного образования города. Учреждений дополнительного образования детей общегородского значения должны быть расположены в радиусе обслуживания не более 30 минут транспортной доступности. Пешеходный радиус обслуживания для внешкольных учреждений варьируется для различных возрастных групп [13, с. 16] и представлен в таблице.

Пешеходный радиус обслуживания

Возрастная группа		Расстояние	
		в минутах	в метрах
Младший школьный возраст	6...9 лет	10...15	500...750
Средний школьный возраст	9...14 лет	10...15	650...1000
Старший школьный возраст	14...16 лет	10...15	1000...1500

В городе Минске УчДОД имеются в каждом районе. В центральной части города в Первомайском, Советском и Московском районах расположены учреждения городского и республиканского значения. В системе города УчДОД этих категорий функционируют и как учреждения шаговой доступности, и как учреждения районного значения. Распределение УчДОД на территории города весьма неравномерно. Наибольшая их плотность фиксируется в Первомайском районе: два УчДОД республиканского значения и одно районного значения; наименьшая – в Партизанском и Ленинском районах: по одному учреждению дополнительного образования районного значения (рис. 1).

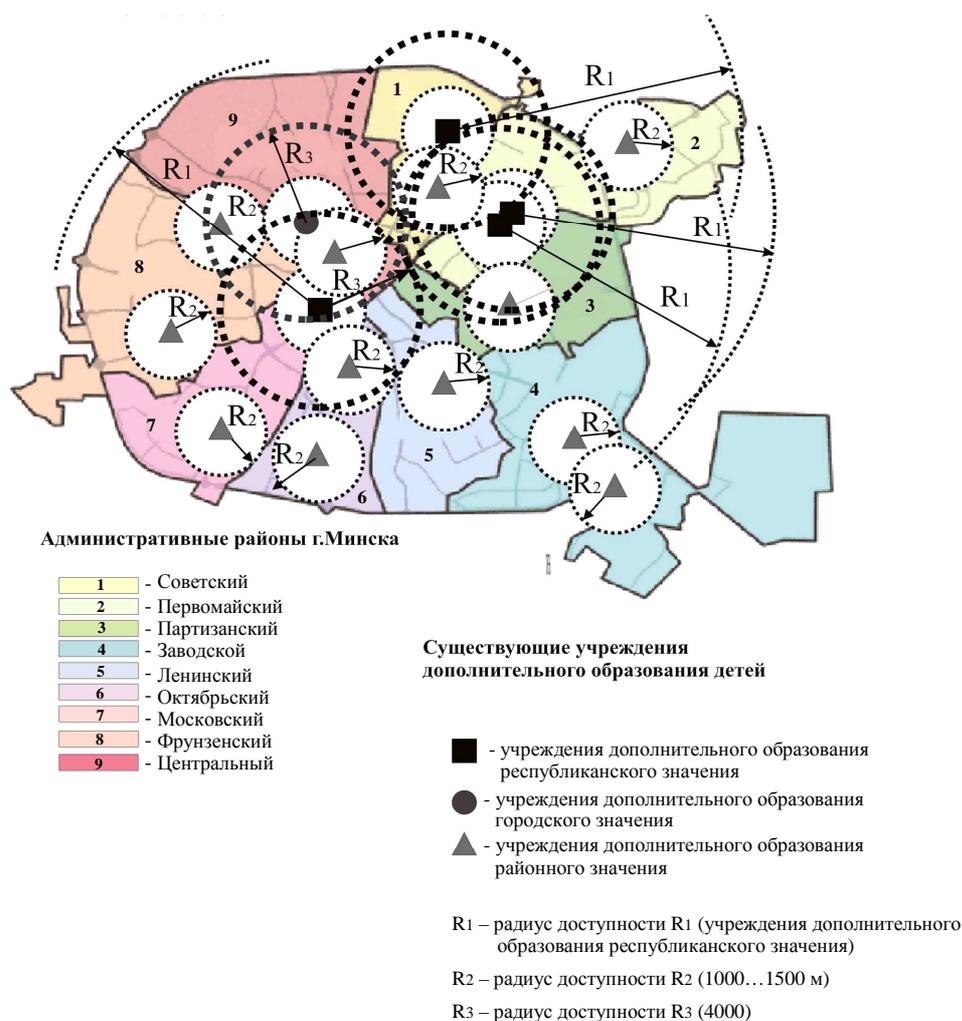


Рис. 1. Генеральный план города Минска: расположение учреждений дополнительного образования детей

В зависимости от градостроительных особенностей города УчДОД рекомендуется размещать в отдельно стоящих зданиях, пристроенных блоках в составе общественных центров и т.п. Учреждения дополнительного образования детей повседневного (микрорайонного) значения целесообразно размещать в жилых образованиях: на первых этажах жилых зданий, в пристройках и вставках между жилыми домами; УчДОД должны быть максимально приближены к месту жительства учащихся – детей младшего и среднего школьного возраста [14].

Повседневное дополнительное образование необходимо кооперировать с общеобразовательным образованием и занятиями в культурно-образовательных центрах, поскольку школа является центром образовательной, воспитательной работы среди детей микрорайона и максимально приближена к месту проживания учащихся. Это позволило бы упростить проектирование, строительство и эффективно использовать материально-технические ресурсы для реконструкции и строительства новых зданий УчДОД.

В системе дополнительного образования детей и молодежи города Минска функционируют 24 учреждения дополнительного образования детей и молодежи (по данным на начало 2014 г). Из них 3 городского подчинения: УО «Минский государственный дворец детей и молодежи», УО «Минский государственный туристско-экологический центр детей и молодежи», УО «Минский городской центр физического воспитания и спорта учащейся молодежи»; 12 районных многопрофильных учреждений дополнительного образования детей и молодежи; 9 районных физкультурно-спортивных центров.

В 2013 году в Беларуси учреждения дополнительного образования детей посещало 392 874 учащихся. Среди них 42,1 % (165 290 учащихся) выбрали художественное образование. В технических и спортивно-технических объединениях занималось 9,9 % (38 795 учеников), в эколого-биологических – 8,6 % (33 600 учеников), в туристско-краеведческих – 10,3 % (40 628 учеников), в физкультурно-спортивных – 14,0 % (54 999 учеников), в других объединениях – 15,2 % (59 562 ученика) от общего количества учащихся в УчДОД Беларуси. Таким образом, приоритетным направлением дополнительного образования детей 5...18 лет является художественный профиль (рис. 2).

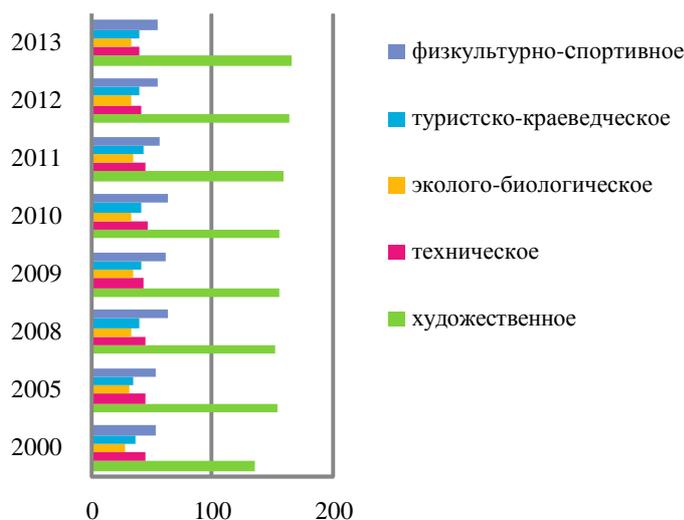


Рис. 2. Количество детей в УчДОД, чел.
(по данным Министерства образования Республики Беларусь)

Анализ системы учреждений дополнительного образования детей города Минска выявил ряд недостатков:

- отсутствие связи и координации деятельности общеобразовательных школ и внешкольных учреждений, что нарушает требования Концепция непрерывного воспитания детей и учащейся молодежи;
- отсутствие единых принципов организации и управления системой учреждений дополнительного образования детей;
- выполнение одних и тех же функций различными внешкольными учреждениями (например, детская художественная школа и детская музыкальная школа) [15, с. 13];
- наблюдается тенденция кооперирования мелких студий, станций детского творчества с общеобразовательными школами и культурно-образовательными центрами. Данный факт важно учитывать при проектировании новых общеобразовательных школ, выделяя в них дополнительные площади для учреждений дополнительного образования;
- большинство УчДОД располагаются в зданиях, приспособленных под учреждения образования, а не специально построенных в этих целях. Исключением являются следующие: Национальный центр

художественного творчества детей и молодежи (ул. Кирова, 16, Московский район); Минский государственный дворец детей и молодежи (Старовиленский тракт, 41, Центральный район); Республиканский эколого-биологический центр, ул. Макаенка, 8, Первомайский район);

- хаотичный характер размещения УчДОД на территории города – перенасыщенность ими одних районов (например, Первомайский район) и нехватка в других (например, Партизанский и Ленинский районы);

- неравномерность обеспечения УчДОД жилых образований.

Таким образом, видим, что система учреждений дополнительного образования детей в архитектурно-градостроительной среде города Минска нуждается в тщательном изучении и реорганизации.

По результатам проведенного нами исследования предлагается схема создания системы учреждений дополнительного образования детей, включающая три стадии (рис. 3).

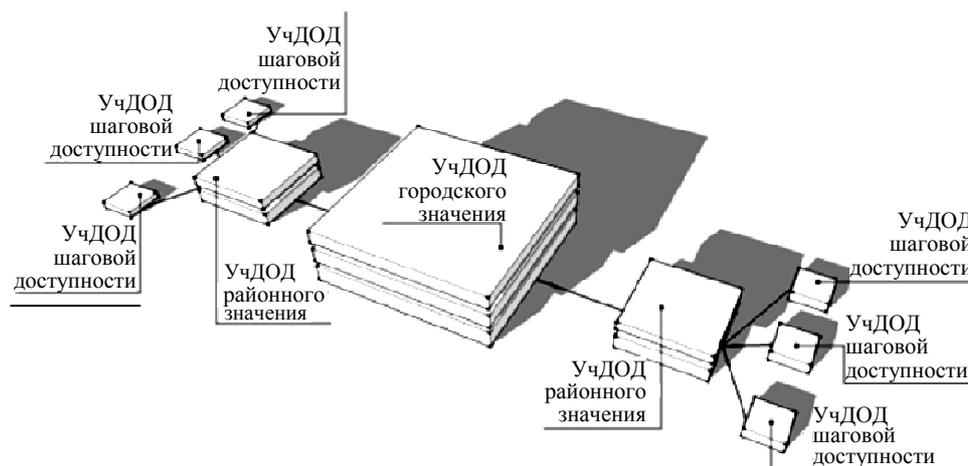


Рис. 3. Система учреждений дополнительного образования детей

На первой стадии предполагается создание многофункциональных УчДОД шаговой доступности, размещение их в зданиях общеобразовательных школ и на первых этажах жилых домов. На данной стадии уже существующая система УчДОД нуждается в реконструкции территорий.

На второй стадии формируется развитая сеть УчДОД районного значения, которые будут функционировать и как учреждения шаговой доступности. В существующих УчДОД районного значения формируются универсальные планировочные ячейки многофункционального назначения. Использование этих ячеек будет происходить в зависимости от реализуемого профиля дополнительного образования.

На третьей стадии предусматривается создание УчДОД городского значения с расширенным перечнем направлений реализуемых программ дополнительного образования детей. Размещение этих учреждений необходимо организовать в непосредственной близости с жилой и садово-парковой зонами. Учреждения дошкольного образования детей городского значения будут функционировать и как УчДОД шаговой доступности, и как УчДОД районного значения.

Заключение. Согласно градостроительной локализации, модель системы УчДОД для города Минска как столицы Республики Беларусь предполагает наличие УчДОД районного, городского и республиканского значения. Учреждения республиканского значения функционируют как координационные центры. Градостроительная модель должна быть основана на взаимодействии учреждений дополнительного образования для детей городского и районного значения с опорой на функционирование УчДОД республиканского значения.

На сегодняшний день система учреждений дополнительного образования Республики Беларусь, являющаяся важным звеном в процессе образования и воспитания личности, нуждается в трансформации и обновлении. Разработанная нами модель системы учреждений дополнительного образования детей в соответствии с основными положениями нормативных документов Республики Беларусь, а также на основании анализа архитектурной организации УчДОД города Минска может стать основой для реформирования сферы дополнительного образования областных центров и других городов Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кодекс Республики Беларусь об образовании: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pravo.by/world_of_law/text.asp?RN=Hk1100243. – Дата доступа: 24.05.2015.

2. Положение об учреждении дополнительного образования детей и молодёжи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pravo.by/world_of_law/text.asp?RN=W21124261. – Дата доступа: 24.05.2015.
3. Демидова, Н.И. Анализ подходов к понятию «образовательная среда» в научной мысли XX века / Н.И. Демидова // Изв. Саратов. ун-та. Серия Философия, психология, педагогика. – 2009. – Вып. 4. – С. 113–116.
4. Кадурина, А.О. Оптимизация поиска архитектурно-художественного образа учебного учреждения / А.О. Кадурина // Вісн. Харк. держ. акад. дизайну і мистец. – 2012. – № 2. – С. 64–72.
5. Козлов, М.Л. Детские образовательные учреждения / М.Л. Козлов // Академ. вестн. УралНИИпроект РААСН. – 2011. – № 3. – С. 92–97.
6. Микляева, Н.В. Группы кратковременного пребывания: педагогическое сопровождение / Н.В. Микляева. – М.: Сфера, 2009. – 96 с.
7. Гельфонд, А.Л. Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений: учеб. пособие / А.Л. Гельфонд. – М.: Архитектура-С, 2006. – 280 с.
8. Козлова, И.В. Организация пространства для детей – одна из задач архитектуры / И.В. Козлова // Прил. к науч.-техн. журналу «Строительные материалы». – 2006. – № 7. – С. 1–3.
9. Молчанов, В.М. Основы архитектурного проектирования: социально-функциональные аспекты: учеб. пособие / В.М. Молчанов. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 160 с.
10. Потехина, И.В. Организация предметно-пространственной среды как условие воспитания интереса к игре / И.В. Потехина // Актуальные проблемы воспитания в практике внешкольного образования: материалы науч.-практ. конф. – Красноярск, 2007. – С. 71–74.
11. Степанов, А.В. Объемно-пространственная композиция: учебник для вузов / А.В. Степанов [и др.]. – М.: Архитектура-С, 2011. – 256 с.
12. Степанов, В.И. Организация сети учреждений для внеучебной работы в городах: рекомендации [Текст] / В.И. Степанов, Л.Б. Мирчевская. – М.: Стройиздат, 1983. – 16 с.
13. Степанов, В.И. Организация сети школ, межшкольных учебно-производственных комбинатов и внешкольных учреждений [Текст] / В.И. Степанов, Л.Б. Мирчевская. – М.: Стройиздат, 1975. – 13 с.
14. Книга, Е.Н. Факторы, влияющие на архитектуру учреждений дополнительного образования / Е.Н. Книга, И.О. Ситникова // Архитектура и строительные науки. – Минск, 2014. – № 1, 2. – С. 17–19.
15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minsk.edu.by/main.aspx?guid=4971>. – Дата доступа: 20.05.2015.

Поступила 27.05.2015

**ESTABLISHMENTS OF SUPPLEMENTARY EDUCATION OF CHILDREN
IN ARCHITECTURAL AND URBAN-PLANNING ENVIRONMENT OF THE CITY
(ON THE EXAMPLE OF MINSK)**

E. KNIGA

The paper considers a system of establishments of supplementary education of children in the aspect of architectural organization of the educational environment of the city. It defines goals and programs of supplementary education of children, based on the normative documents of the Republic of Belarus. Gives a list of potential ways of organizing children's spare time and discusses types and kinds of establishments performing these activities. Establishments of supplementary education are characterized according to the requirements to their placement in the city structure. The paper characterizes the system of supplementary education in Minsk, discusses architectural and urban-planning locations of the establishments of supplementary education in Minsk, highlights current problems and describes potential development of the system of supplementary education. Based on the research, the author suggests a scheme of construction of the system of supplementary education of children in Minsk.

УДК 711.5(1-87)

**ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РЕК:
ОПЫТ СТРАН БЛИЖНЕГО И ДАЛЬНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ****Н.А. МАРТЫСЮК***(Брестский государственный технический университет)*

Рассмотрена проблема формирования понятия «прибрежная территория», а также вопросы, касающиеся определения границ прибрежных территорий рек в современных городах. Основываясь на рассмотренных трактовках понятия «прибрежная территория» и понятий, приближенных к нему по значению, которые используются в законодательстве Республики Беларусь, предложена авторская дефиниция понятия «прибрежная территория реки». Выявлены основные типы определения границ прибрежной территории реки в городе. Рассмотрен опыт проектирования и реконструкции набережных в странах ближнего и дальнего зарубежья, представлены наиболее выразительные примеры формирования прибрежных территорий рек с учетом разнородных факторов, оказывающих влияние на их организацию и эксплуатацию. Выявлены основные тенденции в организации прибрежных территорий рек в городах, предложено их ранжирование в соответствии со значимостью.

Повседневная жизнь человека неразрывно связана с городом и городской средой, состоящей из множества компонентов, различных по своим свойствам и функциям: жилой застройки, общественных и деловых центров, производственных и промышленных объектов, парков, бульваров, набережных, транспортных магистралей и т.д. Неотъемлемой составляющей любого города, имеющего в своей структуре водный объект, являются прибрежные территории.

Исторически сложилось, что наличие акватории являлось одним из основных факторов, располагающих к основанию и возведению на его берегах поселений. Известно множество примеров, когда город основывался в долине реки, рядом с озером или на морском побережье. Зачастую города возникали в местах слияния рек либо при впадении притока реки в главное русло. Такое месторасположение не случайно – оно обеспечивало поселению защиту от нападений. Также река являлась источником пищи и воды для жителей города, воду использовали в хозяйственных целях и на другие нужды. С течением времени поселения увеличивались в размерах и занимали новые земли, куда входили и водные объекты, расширяя тем самым свои границы.

Основная часть. В настоящее время городская территория – это значительные по своим размерам площади, содержащие в себе как природные, так и антропогенные компоненты. Особое место в структуре города занимают водные объекты (моря, реки, озера, пруды, водохранилища и т.д.) и их прибрежные территории.

Само понятие «прибрежная территория» или «прибрежная зона», было предложено Европейской Комиссией: *прибрежная территория* – это пространство, где с особой интенсивностью осуществляется взаимодействие человека с окружающей средой [1].

История отечественного береговедения впервые была рассмотрена в книге В.И. Лымарева «Морские берега и человек». Здесь были обозначены основные проблемы, связанные с динамикой берегов, влиянием на них природных и антропогенных факторов.

В законодательстве Республики Беларусь определения понятия прибрежной территории до сих пор не существует. Однако в Водном кодексе Республики Беларусь имеются такие близкие понятия, как «водоохранная зона» и «прибрежная полоса»:

- *водоохранная зона* – территория, прилегающая к водным объектам, на которой устанавливается специальный режим хозяйственной и иной деятельности для предотвращения их загрязнения, засорения и истощения, а также для сохранения среды обитания объектов животного мира и произрастания объектов растительного мира [2];

- *прибрежная полоса* – часть водоохранной зоны, непосредственно примыкающая к водному объекту, на которой устанавливается более строгий режим хозяйственной и иной деятельности по отношению к режиму хозяйственной и иной деятельности, установленному на территории всей водоохранной зоны [2].

Таким образом, в наиболее общем виде, **прибрежная территория реки** – это территория (поверхность земли), прилегающая к водным объектам (в частности к рекам), с природными и антропогенными комплексами.

Для комплексного исследования организации прибрежных территорий в городах необходимо определить их границы. Выявлено два типа определения границ прибрежных территорий: механический и аналитический. При механическом определении граница представляет собой повторение конфигурации

природного ландшафта реки через определенное расстояние, обусловленное различными факторами. При аналитическом подходе к определению границ приречной территории учитываются параметры рельефа, климатические характеристики, водность реки, геологическое строение берегов, городской каркас и т.д. Сравнивая оба подхода, можно сделать вывод, что наиболее полным с точки зрения учета разнородных критериев, является аналитический тип определения границ прибрежных территорий.

Таким образом, при аналитическом подходе границы приречной территории определяются по антропогенным элементам, границам урбанизированного каркаса либо по природным характерным точкам рельефа. При этом прибрежная территория реки понимается как уникальная подсистема, находящаяся в структуре урбанизированной среды города, где происходит активное взаимодействие человека и окружающей природной среды. Естественное расширение городских территорий и возрастание технологических возможностей преобразования природы сделали привычным изменение ландшафта города и его окружения. В последнее время взаимодействие природной и искусственной среды все чаще приобретает форму нарастающего давления городской застройки на природные компоненты, в том числе и на прибрежные территории, которое сопровождается нерациональным использованием береговой зоны, деградацией зеленых насаждений и т.д. Поэтому сегодня необходим поиск новых стратегий развития и организации прибрежных территорий.

За последние десятилетия в мире реализованы десятки проектов реконструкции. На месте бывших производственных территорий и доков создаются культурные центры и университеты, как, например, в Сиднее, Бильбао или Гамбурге, новые деловые центры, парки, рекреационные пространства и городские пляжи, как в Москве, Перми, Екатеринбурге, Кирове, Пярну, Нью-Йорке, Торонто, Париже, Шанхае.

В каждом городе в зависимости от существующих условий и предъявляемых требований реализованы свои приемы в организации пространства прибрежных территорий.

Реконструкция прибрежной территории Москвы-реки. Крымская набережная, Москва, Россия. Задачей проекта являлась реорганизация набережной в благоустроенную пешеходную зону, которая соединит такие значимые объекты, как «Красный Октябрь», парк искусств «Музеон» и парк Горького. Проект благоустройства самой Крымской набережной подразумевает создание трех зон – входного узла «Зеленые холмы», фонтанной площади и вернисажа для художников. В связи с тем, что автомобильная дорога вдоль реки имеет небольшую интенсивность и мало используется, было принято решение о создании на месте дороги пешеходной зоны с велодорожками. Движение автомобилей на данном участке закрывается, исключение – спецтранспорт, для которого устроен дополнительный проезд. Улучшить дорожную ситуацию в районе помогут запроектированные разворотные площадки и паркинги для автомобилей. Направление движения автотранспорта не пересекается с направлениями движения пешеходов и велосипедистов по набережной. Проектом предусматривается также и перспективное развитие – это так называемая «низкая набережная», где будут продолжены пешеходные и велосипедные дорожки. Благодаря системе пандусов и террас с низкой набережной будут открываться виды на Москву-реку, недоступные с берега.

Согласно задумке, набережная под Крымским мостом будет расширена специально для пешеходов и велосипедистов, которые получают маршрут длиной 10 км от «Красного Октября» до Воробьевых гор. Таким образом, на участке от «Музеона» до парка Горького появятся непрерывный велосипедный и пешеходный маршруты, а объединение территорий «Музеона», Парка Горького и Нескучного сада позволит создать единое городское пространство [3].

Реконструкция прибрежной территории Москвы-реки. Набережная Тараса Шевченко, Москва, Россия. Проект является конкурсным в рамках Международного архитектурного фестиваля «Эко-Берег», проходившего в Москве в 2014 году. Задачей являлось создание комплексной концепции реконструкции набережных Москвы-реки. Набережная Тараса Шевченко стала небольшой частью масштабного проекта. Имея перепад высот 9...15 метров между набережной и верхней площадкой, что естественным образом делится на 3 уровня активности: *верхний уровень* – объединяющаяся с природным комплексом парковая среда с велодромами, скейтдромами, велодорожками и другими видами уличного спорта; *уровень набережной* – привлекает более спокойными и творческими видами активности, а также коммерческими объектами; *уровень причалов и воды* – в летнее время жизнь на набережной может обогащаться плавучими выставками, концертными баржами и т.д. Отличительными чертами проекта являются: высота новых сооружений должна быть не выше уровня верхней площадки; все новые постройки имеют эксплуатируемые, озелененные крыши, развивающие парковые спортивные мотивы благоустройства природной зоны; все передвижения в зоне набережной должны быть безопасны, поэтому все паркующиеся и обслуживающие автомобили съезжают на парковку и подземную сервисную дорогу; все уровни набережной связаны и пригодны для использования маломобильными группами населения; развитая сеть пешеходных и велосипедных дорожек тянется вдоль всей верхней улицы и спускается к набережной, периодически пересекаясь в общем уровне. Помещения спортивного и общественно-культурного

назначения интегрированы в рельеф набережной. Также уделено пристальное внимание экологической составляющей – в проекте используются современные материалы с повышенной теплоизоляцией, много стекла, уменьшающего использование электроэнергии, естественная вентиляция. Много поверхностей облицовано деревом, включая деревянные причалы и мощение части набережной. Вдоль набережной создаются три мини-пристани, через которые организуется челночная перевозка на противоположный берег реки.

Концепция рассчитана на максимальное насыщение территорий набережной функциями общественно-культурного, спортивного и рекреационного назначения, а также на создание запоминающегося образа речного фасада города.

Из анализа вышеописанных примеров можно заключить, что набережные Москвы должны стать сложной, интегрированной, активной городской средой, привлекательной для всех групп населения и туристов [4].

Реконструкция левого берега реки Исеть (Екатеринбург, Россия). Задачей проекта являлась реконструкция левого берега реки Исеть. Набережная расположена в зоне, насыщенной жилыми и общественными зданиями. Согласно проекту на левом берегу реки планируется организовать зоны отдыха с выходом к реке, открытые парковки, детские смотровые площадки, кафе, пешеходные мостики через реку, дорожки для пешеходов и велосипедистов. Зонирование реконструируемой территории набережной было выполнено с учётом архитектурных и планировочных решений исторически сложившейся застройки. Была запроектирована система пешеходных и велосипедных дорожек, обеспечивающая возможность непрерывного транзитного движения для жителей города, туристов и велосипедистов; также предусмотрены смотровые и детские площадки, площадки для отдыха. Для обеспечения пешеходной и велосипедной доступности между существующей и реконструируемой набережной организованы пешеходные и автомобильные мосты, подземные переходы под существующими мостами, консоли над водой, пандусы и лестницы.

В результате комплексного подхода к решению задачи, набережная решена как главное общественное пространство города, отвечающее потребностям всех групп населения города и его гостей [5].

Madrid Rio (Мадрид, Испания). Цель проекта – максимальное включение прибрежной территории реки Манзанарес в городскую среду, восстановление доступа города к реке, объединение районов, разделенных кольцевой автострадой и включение части города, ставшей при строительстве автострады «периферией», а также организация пешеходных связей и искоренение проблем с транспортом и экологией.

Решение большого объема задач было найдено: согласно проекту дороги в центре города были убраны под землю, а на их месте запроектировано рекреационное пространство, которое объединяет некогда разделенные районы. Вместо хайвея по обоим берегам реки Манзанарес было предложено разбить парк протяженностью 10 километров – непрерывное, засаженное деревьями и кустарниками рекреационное пространство. Парк Madrid Rio объединяет пять зон, оформленных в разном стиле с учётом их исторических особенностей и культурного значения. Город органично вписывает в себя как старые здания, так и современную молодёжную спортивную атрибутику. При этом реконструкция пространства вокруг реки не оказала негативного влияния на движение автотранспорта. Вся городская магистраль была опущена под землю, а на крыше тоннеля запроектирован парк. Подземная транспортная инфраструктура включает в себя многополосную автодорогу и парковки. На поверхности остались лишь узкие дороги, чья задача – обеспечить удобный подъезд к отдельным домам. В состав проекта Madrid Rio входят 8 самостоятельных «подпроектов» – парк подразделяется на малые парки и сады, а также зоны, на которых в будущем возможно строительство новых общественных объектов. На территории реконструируемой набережной появилась развитая сеть велосипедных и пешеходных дорожек, детские площадки, пешеходные мостики и маленький «городской пляж». С целью озеленения парка и повышения экологического комфорта среды было высажено порядка 33 000 деревьев.

Итогом проведенных работ стало органичное, экологически комфортное рекреационное пространство с сохранением исторических и культурных особенностей района. Все проведенные мероприятия позволили создать единое городское пространство, привлекательное как для жителей города, так и для туристов [6].

Экопроект реконструкции прибрежной территории. Houtan Park, Шанхай, Китай. Задачей проекта являлась регенерация и восстановление природных ландшафтов, органично включенных в городскую структуру. Houtan Park, построенный на Браунфилд, бывшем промышленном объекте, является регенерированным пейзажем Шанхайской набережной реки Хуанпу. Место расположения парка представляет собой узкую территорию, которая расположена вдоль береговой линии реки Хуанпу в Шанхае.

Ранее на этом месте располагался сталелитейный завод и верфь. Впоследствии производство было закрыто, а территория оказалась заброшена. На момент реконструкции набережной на бывших площадях завода осталось мало промышленных строений, и это место в основном использовалось в качестве свал-

ки. Кроме того, там оставалось много отходов производства от бывшей промышленности. Цель разработки парка заключалась в следующем: создать пространство для Green Expo, приспособить его для большого количества посетителей экспозиции с мая по октябрь и продемонстрировать так называемые «зеленые» технологии, создавая уникальное пространство, чтобы сделать выставку незабываемым событием, а также иметь возможность перевода территории выставки в постоянный общественный Waterfront Park в будущем. Основной задачей было восстановление деградированной окружающей среды. Кроме того, необходимо было разработать защиту от наводнений, так как существующая бетонная стена не отвечала заявленным требованиям. Также сама форма территории диктовала свои условия – длинная и узкая линия парка, расположенная между рекой Хуанпу и городской скоростной трассой, составляла более 1,7 километров в длину, но в среднем только 30...80 метров в ширину. Через центр парка проходят линейные водно-болотные угодья, 1,7 километров в длину и 5...30 метров в ширину, которые были разработаны, чтобы создать механизм естественной очистки загрязненной воды из реки Хуанпу. В структуре парка расположены зоны сельского хозяйства, индустриального прошлого и постиндустриального будущего экоцивилизации. Преобразование рельефа представлено террасированием, историческим сельскохозяйственным китайским ландшафтом, которое было создано, чтобы нивелировать перепад высот. Все растения были выбраны для создания городской фермы, позволяющей людям стать свидетелями сезонных изменений в жизни растений. Таким образом, городские жители могут больше узнать о сельском хозяйстве, не покидая города. Многочисленные платформы и контейнеры, оставшиеся после верфи, интегрированы в пешеходную сеть для создания открытых пространств, где могут собираться небольшие группы людей. Массив зарослей бамбука выступает в качестве экранов вдоль пешеходных связей, чтобы разбить пространство для выставки современного искусства и промышленных артефактов, найденных на месте строительства парка.

Houtan Park демонстрирует не только качественный и гармоничный проект, но и живую, самодостаточную систему, где экологическая инфраструктура может обеспечить множество услуг для человека и природы, а также наглядно продемонстрировать новые экологические методы очистки воды и борьбы с наводнениями [7].

Bao'an Coastal City, Шэньчжэнь, Китай. Территория Bao'an Coastal расположена в дельте реки Перл. Из-за быстрых темпов развития значительная часть ландшафта исчезла, в определенных местах произошел сдвиг первоначально существующей береговой линии на расстояние, примерно равное пяти километрам в сторону реки. Результатом данных событий стало возникновение урбанистического ландшафта, в котором преобладает мощная инфраструктура и низкокачественные городские пространства с незначительными элементами благоустройства. В настоящий момент она включает в себя новые зоны развития, такие как Shenzhen Bao'An Airport (аэропорт Шэньчжэня), основные порты, терминалы, новые железные и автомобильные дороги, а также QianHai, новый район города вокруг залива. Основой структуры развития служит трансформация прибрежной территории размером 33×7 километров – зона между настоящей (2015) и исторической (1994) береговой линией. Проектом предусматривается деление всей территории на пять районов с тремя основными центрами притяжения: New Airport City (новый городской аэропорт), XiWan, QianHai – и создание насыщенной и разноплановой городской структуры [8].

Заключение. На основе рассмотренного опыта организации прибрежных территорий в странах зарубежья сделан вывод, что отличительной чертой данных проектов является комплексный подход. В ходе аналитического обзора вышеперечисленных объектов были выявлены следующие основные тенденции при организации и реконструкции прибрежных территорий городов:

- интегрированность в городскую среду;
- учет исторически сложившейся градостроительной и композиционной ситуации;
- многофункциональная направленность (общественная, культурная, спортивная, рекреационная);
- рациональная транспортная организация (вывод автомобильных дорог за пределы прибрежных территорий, организация дорог в подземном уровне с системой подземных парковок);
- повышение экологической составляющей в городской среде;
- органичное включение озеленения в структуру прибрежных территорий;
- применение экологически чистых технологий и материалов.

Выявленные основные тенденции и особенности при формировании прибрежных территорий рек могут быть адаптированы с учетом специфики городов Беларуси и успешно использованы в нашей стране.

ЛИТЕРАТУРА

1. The Situation in Europe's Coastal Zones [Electronic resource]. – Mode of access: <http://europa.eu.int/comm/environment/iczm/situation.htm>. – Date of access: 15.11.2014.

2. Водный кодекс Республики Беларусь: 15 июля 1998 г. № 191-3: принят Палатой представителей 18 июня 1998 г.: одобрен Советом Респ. 29 июня 1998 г.: в Кодекс с 10 ноября 2008 г. изменения не вносились: информация сверена с Эталонным банком данных правовой информации Республики Беларусь и Национальным реестром правовых актов Республики Беларусь по состоянию на 10 марта 2009 г. – Минск: Амалфея, 2009. – 98 с.
3. Проект пешеходной зоны на Крымской набережной в Москве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zyalt.livejournal.com/731815.html>. – Дата доступа: 23.04.2015.
4. Конкурс «На благоустройство и застройку территории вдоль набережной Тараса Шевченко с учетом существующего природного комплекса» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ecobereg.ru/contest>. – Дата доступа: 29.03.2015.
5. Фестиваль «Белая башня 2013»: итоги тематических конкурсов, гран-при [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tehne.com/event/novosti/festival-belaya-bashnya-2013-itogi-tematicheskikh-konkursov-gran-pri>. – Дата доступа: 03.02.2015.
6. Madrid Rio Project – курорт в центре города [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.etoday.ru/2012/04/madir-rio-project---kurort-v-c.php>. – Date of access: 24.04.2015.
7. Shanghai Houtan Park: Landscape as a Living System. – Mode of access: <http://www.asla.org/2010awards/006.html>. – Date of access: 17.03.2015.
8. КСАР стал победителем конкурса по разработке концепции мастер-плана Bao'an Coastal City в Шэньчжэне, Китай [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kcap.eu/ru/news/2014/kcap_awarded_in_bao_an_coastal_city_masterplan_competition_shenzhen_china. – Дата доступа: 23.04.2015.

Поступила 04.06.2015

FEATURES OF THE ORGANIZATION OF URBAN COASTAL AREAS OF THE RIVERS: EXPERIENCE OF THE COUNTRIES OF THE NEAR AND FAR ABROAD

N. MARTYSIUK

The problem of formation of the concept “coastal territory”, and also the questions concerning delimitation of river coastal territories in the modern cities are considered in the article. Taking into consideration the interpretations of the concept “coastal territory” and concepts close to it in meaning which are used in the legislation of the Republic of Belarus, the author offers her own interpretation of the concept “coastal territory of the river”. The main types of delimitation of city coastal territory of the river are revealed. The experience of embankment design and reconstruction in the countries of the near and far abroad as well as the most expressive examples of coastal territories formation of rivers taking into account various factors that influence their organization and operation are presented. The main tendencies in the organization of city coastal territories of the rivers are revealed and their ranging according to the importance is offered.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.014.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАГМЕНТА ПОЛОГОГО АРОЧНОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ТОНКОЛИСТОВОГО ХОЛОДНОГНУТОГО ПРОФИЛЯ ТИПА МС-120 С ПОПЕРЕЧНЫМИ ГОФРАМИ

*Д.А. ЖДАНОВ; канд. техн. наук, доц. В.П. УЛАСЕВИЧ; канд. техн. наук, доц. И.В. ЗИНКЕВИЧ
(Брестский государственный технический университет)*

Представлен краткий анализ научных работ, посвященных исследованию механизма работы бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутох профилей с поперечными гофрами. Показаны результаты выполненного авторами экспериментального исследования работы фрагмента покрытия, состоящего из профилей типа МС-120, которые согласуются с результатами, полученными другими авторами, отражая при этом особенности работы профилей в составе бескаркасных арочных покрытий.

Введение. В последние десятилетия во многих странах мира отмечается значительный рост объемов строительства с использованием стальных тонкостенных холодногнутох профилей (СТХП) в качестве несущих конструкций, бескаркасных арочных в том числе.

К настоящему времени статическая работа арочных конструкций из СТХП простой геометрии – с плоскими гранями (полками и стенками) – уже отчасти исследована как теоретически, так и экспериментально, что позволяет осуществлять их проектирование с достаточно высокой степенью конструкционной надежности и экономичности [1–3]. Однако работа СТХ-профилей со сложной геометрией сечений – с поперечными складками-гофрами в полках или в полках и стенках – всё еще недостаточно изучена, свидетельством чему являются, с одной стороны, отсутствие на сегодняшний день общепринятых норм и правил их расчета; с другой – случаи обрушения конструкций подобного типа, необоснованно рассчитанных по действующим нормативам для профилей с плоскими гранями [4; 5].

Одна из специфических областей применения СТХ-профилей с поперечными гофрами – *пологие* бескаркасные арочные покрытия, совмещающие в себе несущие и ограждающие функции, с соотношением высоты арочного свода (f) к его пролету (l), равным или меньшим $1/8$. Такие покрытия монтируются на здании или сооружении методом «сухой» сборки из отдельных дугообразных СТХ-профилей или их блоков [6].

Характерной особенностью таких арочных покрытий является то, что в рабочем состоянии они находятся под одновременным воздействием как изгибающих, так и сжимающих усилий, причем с преобладанием последних, что в паре с изначально присущей арочным покрытиям из СТХП повышенной деформативностью (из-за их относительно невысокой жесткости), а также неравномерностью распределения напряжений по сечению профиля (вследствие их тонкостенности, наличия поперечных гофр и различного рода несовершенств) требует особого подхода при оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) и общей устойчивости рассматриваемых конструкций в процессе их проектирования.

В данной работе содержится краткий анализ имеющихся в открытой печати научных публикаций, в которых отражается механизм работы арочных СТХП с поперечными гофрами, представлены результаты собственного экспериментального исследования НДС фрагмента пологого арочного покрытия из СТХП типа МС-120 с поперечными гофрами с целью определения особенностей работы такого рода профилей в составе пологих бескаркасных арочных покрытий.

Обзор предыдущих исследований. Одно из самых ранних комплексных исследований несущей способности бескаркасных арочных сооружений из СТХ-профилей типа МС-120 было проведено Научно-исследовательской инженерной лабораторией Вооруженных сил США [7; 8] в рамках изучения вопроса о применимости данного типа построек в качестве укрытий в случаях экстренной мобилизации. Численные исследования выполнялись на упрощенных КЭ-моделях профилей; экспериментальные – на цельных СТХ-панелях и их фрагментах. Исследования, в частности, показали ключевую роль потери местной устойчивости в запуске механизма разрушения профиля [7]. При этом деформативность испытываемых образцов с поперечными гофрами оказывалась стабильно выше, чем у образцов с гладкими полками и стенками, однако однозначного численного выражения этого различия получить в исследовании не удалось

из-за вариабельности результатов измерений. Следует также упомянуть, что в ходе экспериментального исследования фрагмента арочного покрытия был выявлен, в терминологии авторов отчета, эффект «сильной» и «слабой» стороны, выразившийся в том, что при локальном приложении нагрузки по центру образца напряжения по обеим сторонам от места ее приложения распределялись всякий раз неоднородно и зависели от направления завальцовки верхней полки [8].

Экспериментальные исследования в Российской Федерации, проведенные Д.В. Марцинкевичем [9], на коротких фрагментах СТХП с рифлеными (гофрированными) стенками и полками, изготовленными из стали толщиной 1,0 и 0,8 мм и длиной 1,5 и 0,45 м, в испытаниях на изгиб и сжатие соответственно позволили получить действительные значения НДС профилей на различных этапах их работы под нагрузкой и на этой основе предложить формулы для расчета ряда рабочих параметров и состояний. Измерения, в частности, показали: из-за пониженной жесткости граней, вследствие поперечного рифления, напряжения в широкой полке и нижней части стенок профиля примерно в 8...10 раз ниже напряжений в местах их сочленения (ребрах) при изгибе и в 12...15 раз – при сжатии; прогибы балочных образцов вплоть до достижения значений напряжений, равных пределу текучести стали в ребрах, имеют линейную зависимость. Исчерпание несущей способности профилей выражалось в переломе ребер профиля вследствие развития в них пластических деформаций, до возникновения которых ребра сохраняли местную устойчивость и работали упруго.

В Польше R. Walentyński и другие ученые также провели ряд численных и экспериментальных сопоставительных исследований арочных панелей как с поперечными гофрами, так и без таковых, по результатам которых был сделан общий вывод о том, что наличие поперечных гофр вызывает, с одной стороны, некоторое снижение продольной, изгибной и крутильной жесткости граней профиля, а с другой – повышение их местной устойчивости [10; 11]. Причем испытания на изгиб панелей, состоящих из 6-ти четырехметровых сфальцованных СТХ-профилей, показали, что снижение жесткостных характеристик оказывается более выраженным и носит нелинейный характер в случае, когда широкая (нижняя) полка находится в сжатой зоне [12]. Однако численные значения величины этих изменений в работе не указаны. Тем не менее проведенные исследования позволили выявить наиболее слабые места по несущей способности в профилях данного типа («ахиллесову пята»), по определению авторов), которыми являются те зоны на ребрах сочленения граней, на которых волны рифленостей на широкой полке и стенках профиля периодически совпадают.

Выявленные в результате этих исследований особенности работы профилей типа МС-120 с поперечными гофрами в составе бескаркасных арочных покрытий во многом совпадают с результатами аналогичных исследований поперечно гофрированных СТХ-профилей других типов [13–19]. Однако все из указанных выше исследований, как и полученные в ходе их результаты, касаются бескаркасных арочных покрытий из СТХП с высокой стрелой подъема, и вопрос, в какой мере данные таких исследований справедливы в отношении пологих арок, то есть арок с $f/l \leq 1/8$, работа которых под статической нагрузкой, как уже указывалось выше, характеризуется преобладанием сжимающих усилий над сгибающими, остается открытым. Таким образом, задача экспериментального исследования СТХ-профилей с поперечными гофрами в составе пологих бескаркасных арочных покрытий, учитывая отсутствие на сегодняшний день достоверных данных относительно их действительной работы, является актуальной и обоснованной.

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования включали в себя испытания на сжатие с изгибом фрагмента пологого арочного покрытия из СТХП с поперечными гофрами и испытания на растяжение образцов из материала профиля.

Цель испытаний на сжатие с изгибом заключалась в оценке влияния поперечных гофр на НДС профиля и определении НДС узла крепления профиля к опорам. Цель испытаний на растяжение состояла в определении некоторых механических характеристик материала профиля, необходимых для осуществления экспериментального исследования и оценки его результатов.

Описание опытных образцов и испытательной установки. Расчетная схема испытаний арочного фрагмента представляла собой весьма пологую арку с затяжкой и равномерно распределенной нагрузкой, закрепленную на упругоподатливых опорах.

В качестве опорной части использовались горячекатаные уголки 160×10 мм. Левый уголок закреплялся неподвижно, а правый – располагался на роликовых катках. Профиль крепился к уголкам через холодногнутый элемент сложной формы (опорную пластину) толщиной 2 мм на саморезах диаметром 4,2 мм. Пластина, в свою очередь, крепилась болтами диаметром 8 мм к горизонтальной полке уголка и болтами диаметром 6 мм – к вертикальной. Схема испытательной установки проиллюстрирована рисунком 1.

Фрагмент пологого арочного покрытия состоял из двух дугообразных, с поперечными гофрами, профилей типа МС-120, соединенных между собой посредством завальцовки фланцев. С целью воспроизведения условий работы исследуемого фрагмента в составе реального покрытия и предотвращения по-

тери устойчивости крайних стенок профилей на ранних этапах нагружения верхние крайние полки профилей были соединены между собой металлическими стяжками. Поперечное сечение фрагмента покрытия и его размеры показаны на рисунке 1.

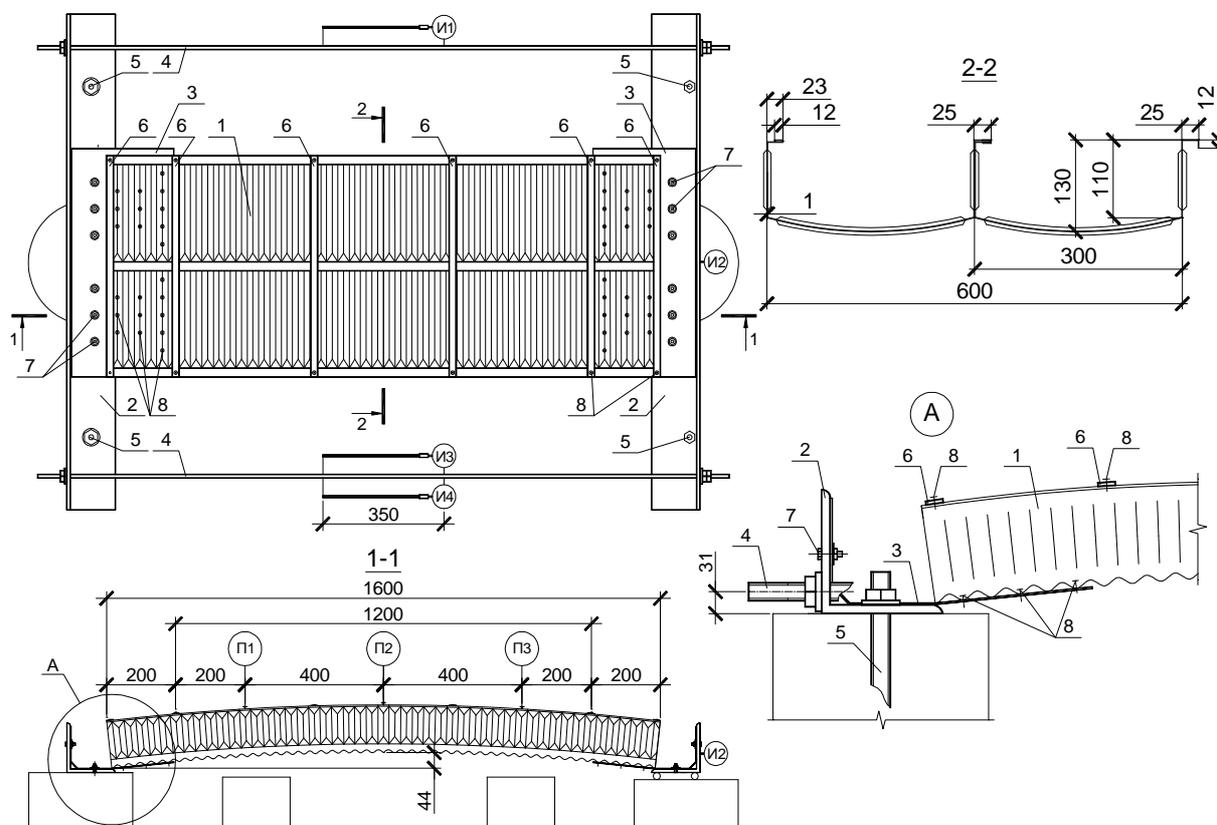


Рис. 1. Схема испытательной установки:

- 1 – испытуемый образец; 2 – опорный уголок 140×10 мм; 3 – опорный холодногнутый элемент $t = 2$ мм;
 4 – стяжка из стержня $\varnothing 20$ мм; 5 – тяга к силовому полю ($\varnothing 24$ мм слева, $\varnothing 16$ мм справа);
 6 – стяжка из полосы 20×1,2 мм; 7 – болт; 8 – саморез

Определение механических характеристик. Было испытано 7 прямолинейных образцов длиной 100 мм и шириной 20 мм, вырезанных из фрагмента арочного покрытия. Испытания проводились на универсальной испытательной машине *Galdabini Quasar 25*. Общий вид образцов после испытаний на растяжение представлен на рисунке 2. Обработка результатов испытания была выполнена в соответствии с СТБ ЕН 1990-2007. Нормативное значение основного предела текучести по результатам испытаний составило $f_{yb} = 305$ МПа.

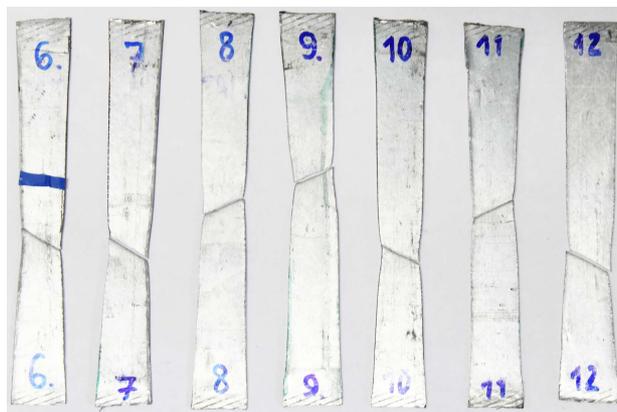


Рис. 2. Общий вид образцов после испытаний на растяжение

Методика и содержание испытаний. Испытания проводились для двух вариантов приложения равномерно распределенной нагрузки, а именно: по верхнему и по нижнему поясу (рис. 3) в соответствии с возможной работой профиля в составе двухслойного и однослойного бескаркасного арочного покрытий.

Оценка НДС осуществлялась как инструментально, посредством прогибомеров, индикаторов часового типа и тензорезисторов, так и визуально. Для измерения вертикального смещения верхней полки профиля в середине пролета и на расстоянии $1/3$ его длины от торцов (см. рис. 1) использовались прогибомеры (П1...П3) с ценой деления 0,01 мм. Для фиксации величины удлинения затяжек и смещения подвижной опоры (см. рис. 1) применялись индикаторы часового типа (И1...И4) с ценой деления 0,01 мм, а для оценки нормальных напряжений – тензорезисторы с базой 5 мм и номинальным сопротивлением 200 Ом. Показания тензорезисторов регистрировались с помощью тензометрического комплекса ТИССА. Обработку показаний проводили на персональном компьютере.

В первом варианте загрузки нагрузка прикладывалась на верхний пояс тарированными грузами по 0,2 кН в четыре этапа: первые 3 этапа – по 12 грузов каждый, последний этап – 6 грузов. Суммарная нагрузка составила 8,4 кН (7 кН/м). Величина нагрузки была предварительно определена путем расчета численной модели с целью обеспечения работы профиля в упругой стадии. Разгрузка конструкции проводилась по такой же схеме, но в обратном порядке.

Во втором варианте – нагрузка в виде мешков с песком и тарированных грузов прикладывалась на нижний пояс в восемь этапов: на первом этапе – 12 мешков по 0,075 кН; на втором – 6 мешков по 0,05 кН; этапы 3...5 – по 12 грузов; этапы 6...8 – по 6 грузов. Суммарная нагрузка составила 12,0 кН (10 кН/м). Нагружение образца было прекращено по соображениям безопасности. Разгрузка проводилась по такой же схеме, но в обратном порядке.

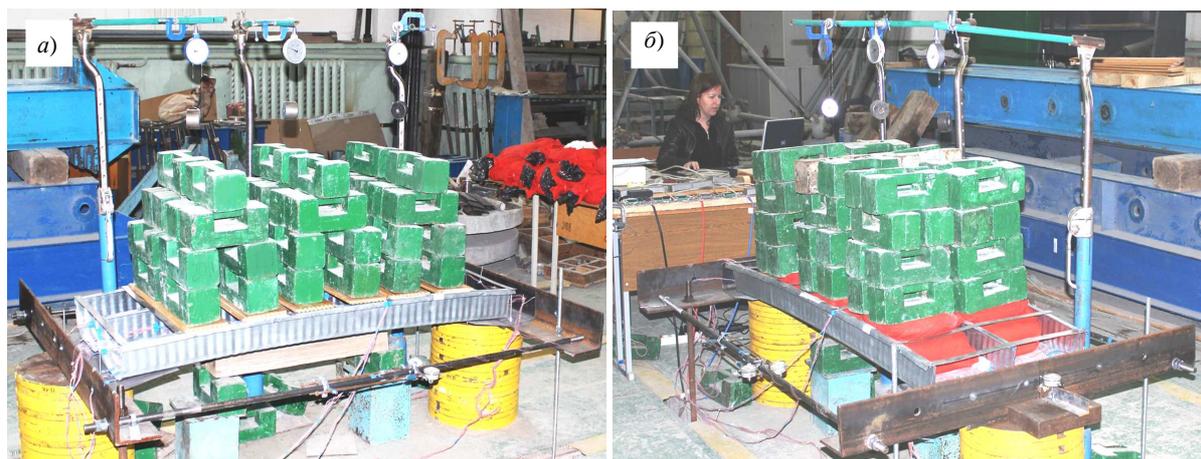


Рис. 3. Общий вид установки и испытуемого фрагмента с загрузением:
а – по верхнему поясу; б – по нижнему поясу

Результаты испытаний и их анализ. В соответствии с поставленными задачами при анализе результатов испытаний основное внимание было уделено исследованию картины распределения нормальных напряжений, прогибам, а также местной устойчивости полок и стенок профиля. Несмотря на выполненные конструктивные мероприятия по обеспечению совместной работы крайних стенок, примыкающие к ним верхние полки остались незавальцованными, что несколько исказило их работу в эксперименте по сравнению с работой в реальной конструкции. Наиболее адекватной работе профиля в составе реальной конструкции оказалась работа центральной части образца.

Кроме того, из-за наличия начальных несовершенств в геометрии профилей идеально симметричного распределения напряжений получить не удалось: одна из сторон поперечного сечения фрагмента, по показаниям индикаторов и тензорезисторов, оказалась более нагруженной, чем другая. Более высокие напряжения возникали на той стороне поперечного сечения, в которую были отогнуты верхние полки, что, возможно, является следствием проявления ранее упомянутого эффекта «сильной» и «слабой» стороны [8].

Качественный вид эпюры нормальных напряжений в средней части пролета поперечного сечения на разных этапах нагружения (рис. 4) был практически одинаковым и характеризовался следующими особенностями:

- максимальные напряжения по сечению возникали в зонах сопряжения стенки и верхней полки (ребрах) и были одинаковыми при различных вариантах приложения нагрузки;

- напряжения в гофрированной части широкой полки были значительно ниже напряжений в зонах сопряжения широкой полки со стенкой;
 - зависимость уровня напряжений в ребрах и верхней полке от нагрузки носила практически линейный характер.

В сечениях вблизи опор при сохранении общей картины распределения напряжений наблюдалась тенденция к снижению сжимающих напряжений в верхних полках и повышению таковых в зонах сопряжения нижней полки и стенки.

Опорные части работали стабильно, однако во втором испытании на последних этапах нагружения напряжения в верхних фибрах опорной пластины, в зоне её контакта с опорным уголком, достигли предела текучести, что может свидетельствовать о её недостаточной конструкционной жесткости.

Максимальные прогибы наблюдались в середине пролета. В первом испытании (при нагрузке на верхний пояс) диаграмма зависимости деформации от нагрузки носила практически линейный характер. Во втором испытании (при нагрузке на нижний пояс) наблюдалась более выраженная нелинейность. Результаты испытаний проиллюстрированы рисунками 4, 5.

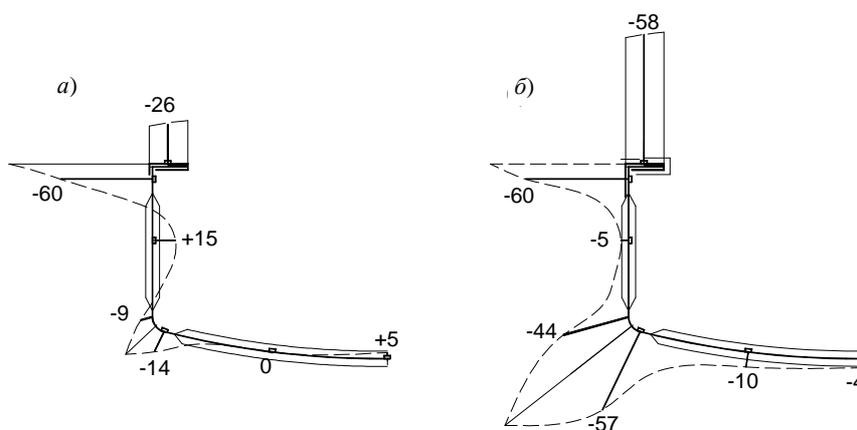


Рис. 4. Эпюры напряжений центральной части поперечного сечения в середине пролета при нагрузке 8,4 кН:
 а – нагрузка по верхнему поясу; б – нагрузка по нижнему поясу

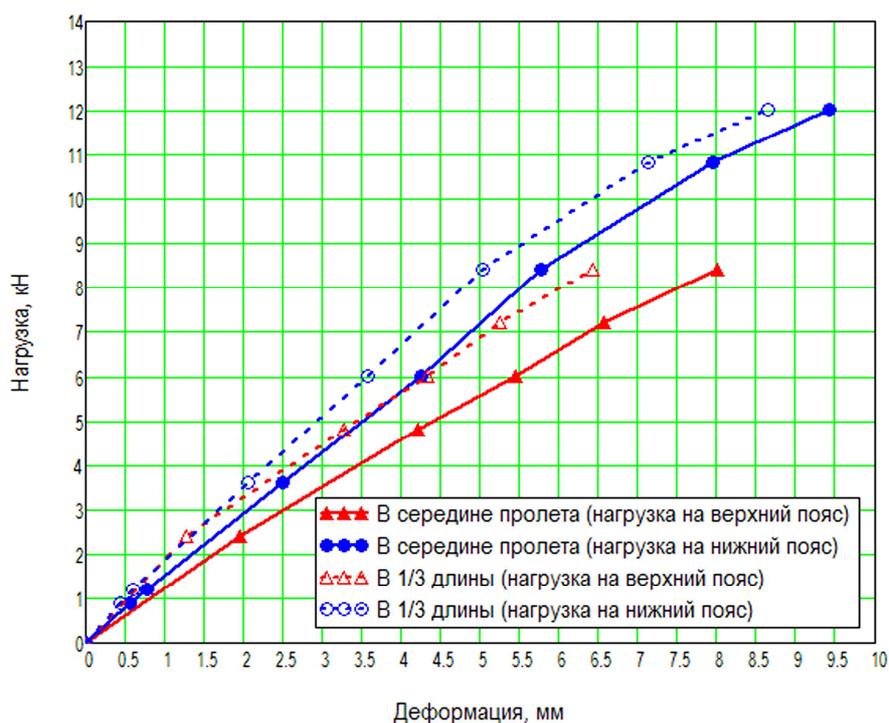


Рис. 5. Вертикальные деформации верхней полки в середине и 1/3 пролета арки

Таким образом, результаты начального этапа исследования НДС профилей с поперечным гофрированием стенок и нижней полки в составе пологих бескаркасных арочных покрытий и результаты проведенных экспериментальных исследований, а также анализ литературных источников позволили сделать следующие **выводы**:

1) наличие поперечных гофр на стенках и полках профиля ведет к весьма неоднородному распределению сжимающих напряжений по сечению: большая часть напряжений воспринимается верхними полками и небольшими зонами в местах сопряжения полок и стенок. Уровень напряжений в гофрированных частях стенок и широкой полки даже в случае сохранения ими устойчивого положения (отсутствия местной потери устойчивости) на порядок меньше напряжений в ребрах и верхней полке;

2) поперечное гофрирование стенок и полок профиля императивно приводит к уменьшению как продольной, так и изгибной жесткости, при этом степень выраженности такого уменьшения зависит от вида нагрузки и способа её приложения;

3) наличие поперечных гофр в стенке профиля приводит не только к повышению её несущей способности при действии касательных напряжений, но и делает ее более устойчивой при действии вертикальной нагрузки на верхний пояс;

4) наличие поперечных гофр в нижней полке профиля увеличивает её несущую способность по местной устойчивости, а также приводит к повышению жесткости в поперечном направлении и обеспечивает стабильность формы поперечного сечения при приложении на нижний пояс распределенной нагрузки до 5 кН/м и более, что превышает максимальную расчетную нагрузку от снега для всех районов Республики Беларусь для арок пологостью $f/l \leq 1/8$;

5) необходимо проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований с целью изучения возможности и условий применения рассмотренного типа профилей в пологих бескаркасных арочных покрытиях, а также разработки эффективного узла их крепления к опорам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уласевич, В.П. Деформационный расчет бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутых профилей / В.П. Уласевич, Д.А. Жданов // Вестн. Брестск. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 1(91): Строительство и архитектура. – С. 66–72.
2. Жданов, Д.А. К определению эффективных сечений стальных бескаркасных арочных покрытий по Еврокоду / Д.А. Жданов, В.П. Уласевич // Строительная наука и техника. – 2013. – № 2(43). – С. 22–26.
3. Жданов, Д.А. Теоретические исследования пологих бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутых профилей / Д.А. Жданов, В.П. Уласевич // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовка инженерных кадров: сб. науч. ст. XIX Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 23–25 окт. 2014 г. – С. 68–75.
4. Biegus, A. Collapse of Halls Made From Cold-Formed Steel Sheets / A. Biegus, A. Kowal // Engineering Failure Analysis. – 2013. – Vol. 31. – P. 189–194.
5. Кузнецов, И.Л. Причины обрушения бескаркасного арочного сооружения пролетом 30 м / И.Л. Кузнецов, А.В. Исаев, Л.Р. Гимранов // Изв. Казан. гос. арх.-строит. ун-та. – 2011. – № 4(18). – С. 166–170.
6. Уласевич, В.П. Особенности напряженно-деформированного состояния гибких пологих арок из стальных тонкостенных гнутых профилей / В.П. Уласевич, Д.А. Жданов // Вестн. Брестск. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 1(73): Строительство и архитектура. – С. 104–110.
7. Determination of the Ultimate Loads for Corrugated-Steel, Barrel-Type Shell Structures: Technical Report / US Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory; D. Briassoulis, A. Kao, S. Sweeney. – Champaign, 1987. – 51 p. – TR M-88/01.
8. Briassoulis, D. Evaluation of K-Span as a Rapidly Erectable Lightweight Mobilization Structure. Construction Engineering / D. Briassoulis, A. Kao, S. Sweeney; US Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory. – Champaign, 1991. – 64 p. – TR M-91/06.
9. Марцинкевич, Д.В. Исследования прочности, жесткости и продольной устойчивости вальцованных профилированных листов с поперечно рифлеными гранями: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Д.В. Марцинкевич; Уральский гос. техн. ун-т. – Екатеринбург, 1995. – 194 с.
10. Walentyński, R. Numerical models of ABM K-Span steel arch panels / R. Walentyński, R. Cybulski, K. Koziel // Architecture, Civil Engineering, Environment. – 2011. – № 4. – P. 105–114.
11. Walentyński, R. Local Buckling and Post-Buckling Investigation of Cold-Formed Self-Supported Elements / R. Walentyński, R. Cybulski, K. Koziel // Recent Advances in Computational Mechanics. – 2014. – P. 23–37.

12. Walentyński, R. “Pięta Achillesa” samonośnych hal łukowych w technologii ABM / R. Walentyński, R. Cybulski, K. Kozieł // Przegląd Budowlany. – № 10(84). – P. 46–49.
13. Mang, H.A. Analysis of Doubly Corrugated Shell Structures by the Finite Element Method: PhD Dissertation / H.A. Mang; Texas Tech University, 1974. – 250 p.
14. Abdel-Sayed, G. Doubly Corrugated Barrel Cold-Formed Steel Shells / G. Abdel-Sayed, G.L. Pierce, W.D. Siddall // Fifth international specialty conference on cold-formed steel structures, St. Louis, Missouri, November 18–19, 1980. – P. 113–143.
15. Xu, Lei. Compressive Tests of Cold-Formed Steel Curved Panels / Lei Xu; Yanglin Gong; Ping Guo // J. of Constructural Steel Research. – 2001. – Vol. 12(57). – P. 1249–1265.
16. Натурные испытания фрагментов панелей из холодногнутых тонколистовых стальных профилей для арочных сводов / П.Г. Еремеев [и др.] // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2004. – № 9. – С. 10–13.
17. Theoretical and Experimental Study on Interactive Local Buckling of Arch-shaped Corrugated Steel Roof / Li-Li Wu [et al.] // Steel Structures. – 2006. – Vol. 6. – P. 45–54.
18. Липленко, М.А. Особенности работы бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей / М.А. Липленко, Э.Л. Айрумян // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 6. – С. 42–44.
19. Жабинский, А.Н. Моделирование арочных покрытий из тонкостенных холодногнутых профилей / А.Н. Жабинский, А.Ф. Старовойтов // Техническое нормирование, стандартизация и сертификация в строительстве. – 2012. – № 5, ч. 2. – С. 27–28.

Поступила 06.05.2015

**EXPERIMENTAL TESTING OF AN ARCHED ROOFING PANEL
MADE OF MIC-120 THIN-WALLED COLD-FORMED STEEL PROFILES
WITH TRANSVERSE CORRUGATIONS**

D. ZHDANOV, V. ULASEVICH, I. ZINKEVICH

The paper contains a brief analysis of research data available on self-supported roofing structures made of arched thin-walled cold-formed steel profiles with transverse corrugations, as well as the results of an original experimental testing of an arched roofing panel made of two MIC-120 profiles.

УДК 624.072

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛОК

канд. техн. наук, доц. Л.С. ТУРИЩЕВ
(Полоцкий государственный университет)

Анализируется метод, позволяющий определять для однопролетных балок с произвольным закреплением концов собственные частоты свободных колебаний без составления и решения дифференциальных уравнений. Свободные колебания балок рассматриваются как вынужденные колебания свободной балки под действием реакций удаленных опорных связей. Для описания этих колебаний по рекуррентной формуле строится так называемая обобщенная динамическая функция Грина. Идея ее построения состоит в том, что динамическая функция Грина свободной балки последовательно «исправляется» при присоединении к ней опорных связей. Приравнивая нулю «исправленные» динамические функции Грина, получаем уравнения, позволяющие найти собственные частоты однопролетных балок с различными закреплениями концов. Метод обобщенной динамической функции Грина следует рассматривать как неявный прием раскрытия определителя, связанного с получением частотного уравнения методом сил.

Современные балочные конструкции под действием высокочастотных динамических нагрузок испытывают вибрации с одновременным возбуждением большого числа собственных форм колебаний. Поэтому определение характеристик высших составляющих свободных колебаний представляет практический интерес.

Известно, что определение собственных частот свободных колебаний балочных конструкций можно осуществлять методом начальных параметров, методами сил и перемещений. Однако применение этих методов к балкам переменного сечения сопряжено с вычислительными трудностями. Рассматриваемый в данной работе метод, основанный на использовании динамической функции Грина [1], позволяет определять для однопролетной балки переменного сечения собственные частоты свободных колебаний без составления и решения дифференциального уравнения.

Известно, что, используя функцию Грина в стержневых конструкциях, возможно определять единичное перемещение в произвольном сечении от действия приложенной в произвольном месте силы, равной единице. Принято считать, что динамическую функцию Грина можно построить только для закрепленных объектов. Однако если в число собственных форм свободных колебаний балки включить формы движения плоского абсолютно твердого тела как собственные формы с нулевыми частотами, то можно построить динамическую функцию Грина для свободной балки.

Смещенное положение балки как плоского абсолютно твердого тела в произвольный момент времени (рис. 1) описывается выражением

$$w(x) = A + B\xi l,$$

где $\xi = \frac{x}{l}$ – безразмерная абсцисса сечения; A, B – произвольные постоянные.

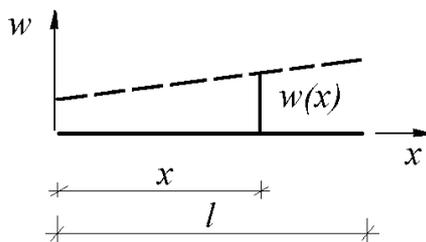


Рис. 1. Смещенное положение балки как плоского абсолютно твердого тела

Используя условия динамического равновесия, можно найти произвольные постоянные A, B .

Тогда нормированные формы движения принимают вид:

- для поступательного движения

$$W_{01} = \frac{1}{\sqrt{l}};$$

- для вращательного движения

$$W_{02} = \frac{\sqrt{3}}{l}(1 - 2\xi).$$

Особенностью этих форм является их взаимная ортогональность и ортогональность к формам колебаний балки как деформируемого тела.

Рассмотрим свободную балку, подверженную действию некоторой возмущающей гармонической силы с круговой частотой θ (рис. 2).

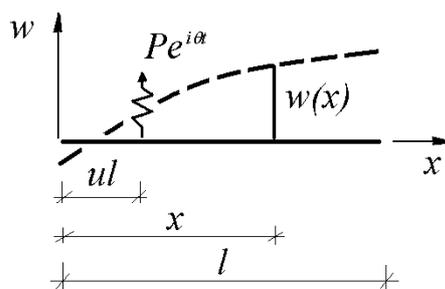


Рис. 2. Свободная балка под действием гармонической силы

Дифференциальное уравнение движения такой балки с учетом деформируемости материала имеет вид

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{m}{EI} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{P(ul)}{EI} e^{i\theta t} \delta(x-ul), \quad (1)$$

где EI – изгибная жесткость поперечного сечения балки; m – погонная масса балки; $\delta(x-ul)$ – дельта-функция.

Для установившегося процесса решение (1) ищется методом Фурье и имеет вид

$$w(x) = W(x) e^{i\theta t}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим уравнение относительно амплитудной функции $W(x)$

$$\frac{d^4 W}{dx^4} - k^4 W = \frac{P(ul)}{EI} \delta(x-ul), \quad (3)$$

где $k^4 = \frac{m\theta^2}{EI}$ – частотный коэффициент.

Амплитудная функция $W(x)$, являющаяся решением уравнения (3), раскладывается в ряд по собственным формам свободной балки, включая в их число формы движения балки как абсолютно твердого тела

$$W(x) = W_{01} + W_{02} + \sum_n A_n W_n, \quad (4)$$

где $W_n = \frac{1}{\sqrt{l}} [(ch\lambda_n \xi + \cos \lambda_n \xi) - \sigma_n (sh\lambda_n \xi + \sin \lambda_n \xi)]$ – нормированные собственные формы колебаний свободной балки как деформируемого тела. Входящие в них коэффициент σ_n и безразмерный частотный коэффициент $\lambda_n = k_n l$ принимают согласно [2] следующие значения:

$$\sigma_1 = 0,98250, \quad \lambda_1 = 4,731,$$

$$\sigma_2 = 1,00078, \quad \lambda_2 = 7,853,$$

$$\sigma_3 = 0,99997, \quad \lambda_3 = 11,033,$$

$$\sigma_4 = 1,00000, \quad \lambda_4 = 14,137,$$

$$\sigma_5 = 1,00000, \quad \lambda_5 = 16,877,$$

$$\sigma_n = 1,00000, \quad \lambda_n = \pi \frac{2n+1}{2} \quad (n > 5).$$

После отыскания коэффициентов A_n получим, что амплитудная функция для установившегося процесса колебаний свободной балки имеет вид произведения возмущающей силы на некоторую функцию

$$W(\xi) = P(u)G_0(u, \xi). \quad (5)$$

Входящая в (5) функция

$$G_0(u, \xi) = \frac{12\xi u - 6(\xi + u) + 4}{-\lambda^4} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{W_n(u)W_n(\xi)}{\lambda_n^4 - \lambda^4} \quad (6)$$

и является динамической функцией Грина свободной балки.

При произвольном количестве возмущающих сил выражение (5) для амплитудной функции примет вид

$$W(\xi) = \sum_i P(u_i)G_0(u_i, \xi). \quad (7)$$

Полученную динамическую функцию можно использовать для определения собственных частот свободных колебаний неразрезных балок. Для этого необходимо воспользоваться приемом, предложенным И.М. Рабиновичем. Его суть заключается в том, что собственные колебания несвободных систем можно рассматривать как вынужденные колебания свободной системы. При этом роль возмущающих сил играют реактивные силы, присущие каждому виду присоединяемого объекта – связь, масса. Частота таких возмущающих сил может принимать значения собственных частот несвободной системы.

Тогда свободные колебания однопролетной балки можно рассматривать как вынужденные колебания свободной балки под действием реакций удаленных опорных связей. Для описания этих колебаний, используя динамическую функцию Грина, строится обобщенная динамическая функция Грина. Идея ее построения состоит в том, что динамическая функция Грина свободной балки последовательно «исправляется» при каждом присоединении к ней опорных стержней. Рассмотрим построение обобщенной динамической функции Грина на примере шарнирно опертой балки.

Прежде присоединим к свободной балке опору в начале координат (рис. 3).

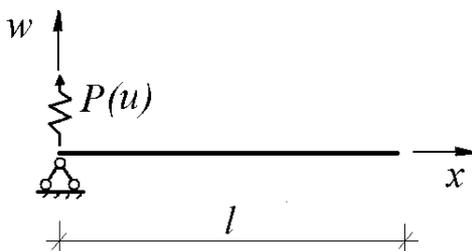


Рис. 3. Свободная балка с присоединенной опорой

Тогда выражение для амплитудной функции, с учетом того, что $u = 0$, примет вид

$$W(\xi) = P(0)G_0(\xi, 0).$$

Затем присоединим вторую опору в конце балки (рис. 4).

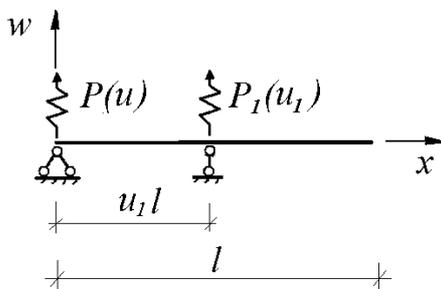


Рис. 4. Шарнирно опертая балка

Выражение для амплитудной функции в данном случае будет иметь вид

$$W(\xi) = P(0)G_0(0, \xi) + P_1(u_1)G_0(u_1, \xi). \quad (8)$$

Используя условие

$$W(u_1) = 0,$$

выразим $P_1(u_1)$ через $P(0)$

$$P_1(u_1) = -\frac{G_0(0, u_1)}{G_0(u_1, u_1)} P(0). \quad (9)$$

С учетом (9) выражение для амплитудной функции примет вид

$$W(\xi) = P(0)G_1(0, \xi). \quad (10)$$

Входящая в (10) функция

$$G_1(0, \xi) = G_0(0, \xi) - \frac{G_0(u_1, \xi)G_0(0, u_1)}{G_0(u_1, u_1)}$$

является динамической функцией Грина для шарнирно опертой балки:

$$G_2(0, \xi) = G_1(0, \xi) - \frac{G_1(1, \xi)G_1(0, 1)}{G_1(1, 1)}. \quad (11)$$

Приравнявая к нулю «исправленную» динамическую функцию Грина (11), получим уравнение, позволяющее найти собственные частоты шарнирно опертой балки с двумя опорами. Это уравнение имеет вид

$$G_1(0, 0) = 0.$$

Таким образом, рассмотренный метод обобщенной динамической функции Грина следует рассматривать как неявный прием раскрытия определителя, связанного с получением частотного уравнения методом сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туровский, Л.М. Исследование свободных колебаний пластин с комбинированным «наполнением» / Л.М. Туровский, Г.П. Мудрый // Механика. Вып. 2. – Воронеж, 1974. – С. 23–31.
2. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Физматгиз «Наука», 1967. – 442 с.

Поступила 18.12.2014

BY THE DETERMINATION OF THE INTRINSIC FREQUENCY OF FREE OSCILLATIONS BEAMS

L. TURISHCHEV

Considered in the paper, the method allows to determine for single-span beams with arbitrary fixing all the natural frequencies of free oscillations without setting up and solving differential equations. Free vibrations of beams are considered as forced oscillations of the free beam by reactions remote support connections. To describe these fluctuations by the recurrence formula is constructed so-called generalized dynamic Green's function. The idea of its construction is that the dynamic Green's function of the free beam series "corrected" in acceding to the reference link. Equating the "corrected" Dynamic Green's functions are obtained equations to find the natural frequencies of the single-span beams with various fixed end. The above method of generalized dynamic Green's function should be considered as an implicit acceptance of the determinant of disclosure necessary to obtain the frequency equation by force.

УДК 624.046.5/624.014

ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.В. НАДОЛЬСКИЙ; канд. техн. наук, проф. Ю.С. МАРТЫНОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается проблема вероятностного описания сопротивления стальных элементов. На основании анализа современных исследований представлены обобщённые статистические показатели прочностных характеристик стали, геометрических характеристик сечений и погрешностей моделей сопротивления стальных элементов. Акцент сделан на модели сопротивления, принятые в Еврокодах. Получены значения частного коэффициента для модели сопротивления при одностороннем оценивании функции состояния исходя из заданных показателей надёжности.

Введение. При введении Еврокодов обязательным этапом является определение значений национально устанавливаемых параметров, в частности частных коэффициентов. Система частных коэффициентов представляет собой один из инструментов регулирования и обеспечения заданного уровня надёжности, поэтому обоснование их значений является первостепенной задачей для каждого государства. Для решения данной проблемы необходимо формирование вероятностных моделей базисных переменных, характеризующих сопротивления и эффекты воздействий. При наличии вероятностных моделей базисных переменных X методами теории надёжности можно определить вероятностно подкреплённые значения частных коэффициентов для заданных (нормируемых) уровней надёжности.

Большинство параметров расчетных моделей имеют неопределённые значения в силу погрешностей измерений, изменчивости физических явлений, недостоверных знаний о физической сущности процессов и т.д. Случайные параметры расчетных моделей и погрешности эти моделей принято называть базисными переменными. Как правило, условно выделяют две группы базисных переменных: одни влияют на модели сопротивления, а другие – на модели эффектов воздействий (усилия, перемещения и др.). К базисным переменным модели сопротивления стального элемента относятся деформационные и прочностные характеристики стали (наиболее часто используемая характеристика – предел текучести), геометрические характеристики сечения и элемента, погрешности моделей сопротивления.

Проблема вероятностного описания базисных переменных занимает особое место в теории надёжности и в вероятностных методах расчета строительных конструкций. По своей сути информация о базисных переменных представляет собой исходные данные для вероятностного расчета. Точность вероятностной модели базисной переменной оказывает существенное влияние на результаты расчетов. Поэтому исследования вероятностной природы базисных переменных постоянно сохраняют свою актуальность.

Особое место занимает вопрос установления закона распределения и статистических параметров базисной переменной. Обычно закон распределения устанавливается на основании доступных экспериментальных данных. Часто наличие экспериментальных данных ограничено, что не позволяет получить статистически достоверные результаты. Поэтому при назначении закона распределения используют теоретические предположения. Для характеристик свойств материалов, сопротивлений элементов конструкции, погрешностей моделей рекомендуется использовать логарифмически нормальное распределение или распределение Вейбулла [1]. Следует отметить, что существует общая проблема использования в теории надёжности любого из законов распределения случайных величин в области весьма малых значений вероятностей, то есть за пределами области, в которой экспериментально обосновывалась применимость закона распределения и определялись его параметры.

Задачей данного исследования является обобщение и анализ информации об изменчивости базисных переменных моделей сопротивления стальных элементов на основании современных исследований в этой области. По результатам исследования рекомендованы вероятностные модели базисных переменных сопротивления, на основе которых получены значения частного коэффициента для модели сопротивления исходя из заданных показателей надёжности.

Прочностные характеристики стали. Источниками изменчивости статистических показателей прочностных и деформационных свойств стали являются вариации химического состава, различия технологий изготовления, методов контроля качества, процедур испытаний, объем выборок и др. Для полноценного и адекватного уточнения (корректировки) фактических законов распределения прочностных и деформационных свойств стали необходимы актуальные экспериментальные данные для различных марок стали, различных видов и толщин проката. Такие работы требуют привлечения широкого круга научных и производственных организаций. Проведение таких исследований на территории Республики Беларусь осложняется тем, что стальной прокат в основном поставляется зарубежными производителями. В сложившейся ситуации представляется целесообразным оценить параметры сталей исходя из наи-

более общих и разнообразных условий поставки проката на основании современных исследований, выполненных за пределами республики. Исследование изменчивости свойств сталей и уточнения их статистических параметров является ближайшей важной задачей.

В работе [2] на основании анализа исследований изменчивости предела текучести, выполненных в разные времена для разных стран [3–10], для вероятностного описания предела текучести при наиболее общих и разнообразных условиях поставки проката рекомендовано использовать среднее значение отношения фактического значения предела текучести к характеристическому (μ_{fy}/f_y), равному 1,10...1,20, а коэффициент вариации $V = 0,05...0,08$. Для определения частных коэффициентов рекомендуется статистические показатели распределения предела текучести принимать в диапазоне равновероятных значений.

Для сравнения приведены статистические параметры предела текучести, принятые в различных работах по калибровкам частных коэффициентов:

- без учета изменчивости геометрических характеристик: $\mu_{fy}/f_y = 1,19$, $V = 0,08$ [11]; $\mu_{fy}/f_y = 1,27$, $V = 0,057$ [12];

- с учетом изменчивости геометрических характеристик: $\mu_R/X_k = 1,25$, $V = 0,1$ [13]; $\mu_R = R_k e^{2VR}$, $V = 0,08$ [14]; $\mu_R/X_k = 1,18$, $V = 0,15$ [15]; $\mu_R/X_k = 1,18$, $V = 0,08$ [16]; $\mu_R = R_k + 2\sigma$, $V = 0,08$ [19].

Статистические показатели предела прочности, относительных деформаций, модулей упругости обобщены в [2].

Для вероятностного описания предела текучести наиболее часто используют нормальный и логнормальный законы распределения [11–17]. Выбор нормального закона распределения обычно обосновывается тем, что свойства стали зависят от суммарного действия независимых случайных величин, ни одна из которых не оказывает преобладающего влияния, тогда согласно предельным теоремам теории вероятности распределение предела текучести можно принять нормальным. Следует обратить внимание, что данная предпосылка справедлива для первоначальной генеральной совокупности, однако из-за процедуры контроля качества стали, отбраковывающего низкосортную сталь, как правило, имеет место отклонение от нормального закона.

Геометрические характеристики поперечного сечения. К геометрическим параметрам поперечного сечения относят размеры сечения и его геометрические характеристики (площадь, момент сопротивления и др.). Допуски геометрических размеров, регламентированные в стандартах на прокат, изготовление и монтаж стальных конструкций, служат подосновой при составлении вероятностной модели отклонений. При этом фактические статистические параметры распределения геометрических размеров поперечных сечений необходимо определять непосредственными измерениями размеров.

Для вероятностных расчетов геометрические характеристики принимают как детерминированные или учитывают их изменчивость. Для сравнения приведены статистические параметры, принятые в различных работах:

$\mu_x/X_n = 1,025$, $V = 0,032$ – для площади прокатного двутаврового сечения IPE 140 [12];

$\mu_x/X_n = 1,0$, $V = 0,04$ – для площади, момента сопротивления, момента инерции прокатных профилей [18];

$\mu_x/X_n = 1,0$, $V = 0,03$ – для момента инерции [19].

Анализ [2] показывает, что в качестве первого приближения с достаточной достоверной вероятностью можно рекомендовать среднее значение отношения фактического значения геометрических характеристик наиболее распространенного сечения (прокатного двутаврового) к его характеристическому значению 0,99...1,03, коэффициент вариации 0,01...0,03.

Погрешность модели сопротивления. Следует отметить недостаточную освещенность в научной литературе проблемы вероятностного описания погрешности расчетных моделей. Анализ показывает, что при вероятностных расчетах во многих случаях игнорируется погрешность моделирования либо данные погрешности учитываются довольно условно. Это положение приводит к тому, что результаты исследований по уточнению моделей сопротивления не находят отражения при нормировании частных коэффициентов и свидетельствуют о приравнивании всех моделей сопротивления к одному уровню с точки зрения их точности.

Основой для оценки погрешностей расчетных моделей выступает база результатов испытаний, в которую должны входить все величины, необходимые для повторения испытания и для определения значений сопротивления по расчетным моделям. В общем случае статистические параметры погрешности модели определяют эмпирическим путём, сопоставляя результаты испытаний с теоретическими расчетами. Существуют различные способы учета погрешности расчетной модели. Наиболее часто используется запись следующего вида:

$$R^*(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \theta \cdot R(X_1, \dots, X_n), \quad (1)$$

где R^* – фактическое сопротивление, полученное по результатам испытаний; $R(\)$ – сопротивление, полученное по модели сопротивления с использованием фактических характеристик базисных переменных

(свойств материала, геометрических характеристик); θ – случайная переменная с некоторым законом распределения вероятностей, характеризующая погрешность моделирования; \mathbf{X} – вектор базисных переменных, входящих в модель сопротивления; \mathbf{Y} – вектор переменных, которые не учитываются моделью сопротивления, но могут влиять на сопротивление.

Обобщение статистических характеристик погрешности моделирования сопротивления осложняется постоянным совершенствованием расчетных моделей. Однако при незначительных различиях моделей сопротивления в качестве приближения можно использовать статистические параметры погрешностей моделей, принятых в других нормативных документах. При этом, как правило, для моделей *сопротивления сечений* их можно использовать в качестве достоверной оценки, для моделей *сопротивления элементов* изгибу и центральному сжатию при проверках устойчивости – в качестве приближенной оценки. Для других моделей сопротивления необходимо непосредственное исследование погрешности на основании обработки экспериментальных данных.

Заметим, что под термином *модели сопротивления сечения* подразумеваются те модели сопротивления, которые связаны только с параметрами конкретного расчетного сечения (например, проверки сечения изгибаемого элемента по нормальным напряжениям), а под термином *модели сопротивления элемента* – связанные с размерами сечения и параметрами элемента (например, проверки устойчивости центрально сжатого элемента).

В документе JCSS [1], на который часто ссылаются при вероятностных расчетах, представлены значения статистических параметров только для модели сопротивления изгибу ($\mu = 1$, $V = 0,05$), сдвигу ($\mu = 1$, $V = 0,05$) и для модели сопротивления сварных ($\mu = 1,15$, $V = 0,15$) и болтовых ($\mu = 1,25$, $V = 0,15$) соединений. Для сравнения приведены статистические параметры погрешностей моделей сопротивления, принятые в работах по калибровке частных коэффициентов Еврокодов:

- погрешность модели сопротивления обобщенного («generic») стального элемента: $\mu = 1,15$, $V = 0,05$ [16; 20]; $\mu = 1,0$, $V_R = 0,05$ [13]; $\mu = 1,1$, $V = 0,07$ [21].
- погрешность модели сопротивления изгибу: $\mu = 1,1$, $V = 0,07$ [18; 22];
- погрешность модели определения прогибов: $\mu = 1,1$, $V = 0,07$ [18];
- сопротивление элемента продольному усилию: $\mu = 1,3$, $V = 0,1$ [18].

В таблице 1 представлены рекомендуемые статистические показатели для вероятностного описания погрешности модели сопротивления на основании обобщения и анализа [23; 24] исследований моделей сопротивления:

- сечений изгибу (проверка «прочности») [25; 27; 28];
- элементов изгибу (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) [26; 29];
- элементов продольному усилию [30–32];
- элементов сдвигу с учетом потери местной устойчивости стенки отсека [24; 29; 33].

Таблица 1

Рекомендуемые значения статистических параметров
для описания погрешности моделей сопротивления стальных элементов

Модели сопротивления	μ / X_k	V
Для пластического сопротивления изгибу при протяженной зоне развития пластических деформаций (наличие протяженной зоны чистого изгиба)	1,0	0,05
Для пластического сопротивления изгибу при локальной зоне развития пластических деформаций	1,15	0,10
Для упругого сопротивления изгибу	1,10	0,05
Для сопротивления изгибу элементов (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с прокатными и эквивалентными (подобными) им двутавровыми сечениями	1,10	0,08
Для сопротивления изгибу элементов (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с другими типами сечений	1,15	0,10
Для сопротивления элементов осевому усилию (проверка устойчивости продольного изгиба)	1,15	0,10
Для сопротивления сдвигу с учетом потери местной устойчивости стенки	1,15	0,15

Определение частных коэффициентов для моделей сопротивления стальных конструкций.

Расчетное значение сопротивления, выраженное непосредственно через его характеристическое значение R_k , можно определить с использованием интегрального частного коэффициента γ_M :

$$R_d = R_k / \gamma_M. \quad (2)$$

Интегральный частный коэффициент γ_M должен учитывать неблагоприятные отклонения свойств материалов, геометрических размеров, неопределенности расчетных моделей сопротивления и т.д. В общем случае частный коэффициент должен быть определен калибровкой исходя из условия обеспечения заданной надежности конструкции с учетом воздействий. Упрощенно интегральный частный коэффициент для модели сопротивления можно определить посредством следующего выражения:

$$1 / \gamma_M = b_R \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R), \quad (3)$$

где

$$b_R = b_z \cdot b_{f_y} \cdot b_\theta.$$

Здесь b_z – среднее значение отношения фактического (измеренного) значения геометрического параметра сечения (например, высота сечения, площадь, момент инерции, момент сопротивления и т.д.) к его характеристическому значению; b_{f_y} – среднее значение отношения фактического (полученного посредством испытаний) значения свойства материала (например, предел текучести, предел прочности и т.д.) к его характеристическому значению; b_θ – среднее значение погрешности расчетной модели, то есть отношения фактического (экспериментального) значения сопротивления к его значению, определенному по расчетной зависимости).

Далее, в формуле (3) α_R – значения коэффициентов чувствительности согласно методом теории надежности 1-го порядка (FORM), рекомендованное значение 0,8 [34]; β – целевое значение индекса надежности, равное 3,8 [34]; V_R – коэффициент вариации значения сопротивления (в случае независимых величин можно принять $V_R = (V_z^2 + V_{f_y}^2 + V_\theta^2)^{0,5}$, где V_z , V_{f_y} , V_θ – коэффициенты вариации геометрических характеристик сечения, свойств материала, погрешности расчетной модели соответственно).

Поскольку значения параметров b_z , V_z и b_{f_y} , V_{f_y} изменяются в диапазоне равновероятных значений, то авторами рассмотрены возможные комбинации наиболее благоприятных и неблагоприятных значений. Значения интегрального частного коэффициента γ_M для модели сопротивления представлены в таблице 2. Для модели сопротивления сдвигу учтен эффект увеличения предела текучести с уменьшением толщины проката, принято $\mu_{f_y}/f_y = 1,15 \dots 1,25$, $V = 0,05 \dots 0,08$.

Таблица 2

Статистические параметры моделей сопротивления

Модель сопротивления	γ_M
Изгибу при протяженной зоне развития пластических деформаций	1,01...1,24
Изгибу при локальной зоне развития пластических деформаций	0,99...1,19
Изгибу при упругой работе материала	0,92...1,13
Изгибу элементов (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с прокатными и эквивалентными им двутавровыми сечениями	0,98...1,19
Изгибу элементов (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с другими типами сечений	0,99...1,19
Осевому усилию (проверка устойчивости продольного изгиба)	0,99...1,19
Сдвигу с учетом потери местной устойчивости стенки	1,14...1,29

Заключение. В итоге выполненного исследования обобщены результаты изучения изменчивости базисных переменных моделей сопротивления стальных элементов. В качестве первого приближения с достаточной достоверной вероятностью можно рекомендовать следующие исходные предпосылки для вероятностного описания базисных переменных, входящих в модели сопротивления:

- для *предела текучести* среднее значение отношения фактического значения предела текучести к характеристическому – 1,10...1,20, коэффициент вариации – 0,05...0,08;

- для *геометрических характеристик сечений* среднее значение отношения фактического значения геометрических характеристик наиболее распространенного сечения (прокатного двутаврового) к его характеристическому значению – 0,99...1,03, коэффициент вариации – 0,01...0,03;

- для *погрешности моделей сопротивления*: сечений пластическому изгибу при протяженной зоне развития пластических деформаций среднее значение погрешности – 1,0, коэффициент вариации – 0,05; сечений пластическому изгибу при локальной зоне развития пластических деформаций среднее значение погрешности – 1,15, коэффициент вариации – 0,10; сечений упругому изгибу среднее значение погрешности – 1,1, коэффициент вариации – 0,05; элементов изгибу (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с прокатными и эквивалентными (подобными) им двутавровыми сечениями среднее значение погрешности – 1,1, коэффициент вариации – 0,08; элементов изгибу (проверка изгибно-крутильной

формы потери устойчивости) с другими типами сечений среднее значение погрешности – 1,15, коэффициент вариации – 0,10; элементов осевому усилию (проверка потери устойчивости продольного изгиба) среднее значение погрешности – 1,15, коэффициент вариации – 0,10; сдвигу с учетом потери местной устойчивости стенки среднее значение – 1,15, коэффициент вариации – 0,15.

При принятых выше предпосылках значения интегрального частного коэффициента для модели сопротивления изменяются в диапазоне от 1,0 до 1,2. Разброс значений, обусловленный возможными комбинациями благоприятных и неблагоприятных значений предела текучести и геометрических параметров сечения, свидетельствует о необходимости уточнения статических параметров базисных переменных, входящих в модели сопротивления (главным образом предела текучести).

ЛИТЕРАТУРА

1. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. – 2001. – Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>. – Date of access: 15.01.2012.
2. Мартынов, Ю.С. Статистические параметры базисных переменных, входящих в модели сопротивления стального элемента / Ю.С. Мартынов, В.В. Надольский // Архитектура и строительные науки. – 2014. – № 1, 2(18, 19). – С. 39–41.
3. Балдин, В.А. Обеспеченность нормативных и расчетных сопротивлений малоуглеродистой стали для строительных металлоконструкций / В.А. Балдин, М.Р. Урицкий // Промышленное строительство. – 1978. – № 6. – С. 19–21.
4. Уваров, Б.Ю. Статистическое исследование свойств и обоснование расчетных сопротивлений низколегированных сталей для строительных металлических конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.Ю. Уваров; МИСИ. – М., 1970. – 16 с.
5. Урицкий, М.Р. Исследование обеспеченности нормативных и расчетных сопротивлений малоуглеродистой стали для строительных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Р. Урицкий; ЦНИИСК. – М., 1975. – 19 с.
6. Ведяков, И.И. Современные принципы нормирования качества материалов и стальных конструкций / И.И. Ведяков // Строительная механика и расчет сооружений. – 2007. – № 2. – С. 62–64.
7. Statistical evaluation of the lateral – torsional buckling resistance of steel I-beams. Part 2: Variability of steel properties / L. Simões da Silva [et al.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – № 4(65). – P. 832–849.
8. Byfield, M.P. Steel design and reliability using Eurocode 3 / M.P. Byfield. PhD thesis, University of Nottingham, 1996.
9. Design characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products / J. Melcher [et al.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2004. – Vol. 60, № 3–5. – P. 795–808.
10. Kala, Z.D. Comparison of Material Characteristics of Austrian and Czech Structural Steels / Z. Kala, J. Melcher, D. Novák // International Journal of Materials and Structural Reliability. – 2005. – № 1(3). – P. 43–50.
11. Sýkora, M. Reliability Analysis of a Steel Frame / M. Sýkora // In: Acta Polytechnica, Vydavatelství ČVUT, Prague, Czech Republic. – 2002. – № 4(42). – P. 27–34.
12. Kala, Z. Influence of partial safety factors on design reliability of steel structures – probability and fuzzy probability assessments / Z. Kala // Journal of civil engineering and management. – 2007. – № 4(XIII). – P. 291–296.
13. Holicky, M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow loads / M. Holicky // Engineering Sciences. – 2007. – № 58. – P. 51–57.
14. Sýkora, M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load / M. Sýkora, M. Holicky // In Li, J. Zhao, Y.G. Chen (eds.) // Reliability Engineering – Proceedings of the International Workshop on Reliability Engineering and Risk Management IWRERM 2008, Shanghai, 21 – 23 August 2008. – Shanghai: Tongji University Press. – 2009. – P. 183–188.
15. Beck, A.T. A first attempt towards reliability – based calibration of Brazilian Structural Design codes / A.T. Beck, Jr. Souza // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2010. – № 2(XXXII). – P. 119–127.
16. Sýkora, M. Comparison of load combination models for probabilistic calibrations / M. Sýkora, M. Holicky // Proceedings of 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering ICASP11, 1–4 August, 2011, ETH Zurich, Switzerland. Leiden (The Netherlands): Taylor & Francis/Balkema. – 2011. – P. 977–985.
17. Gulvanessian, H. Reliability based calibration of Eurocodes considering a steel member / H. Gulvanessian, M. Holicky // Workshop on Reliability Based Code Calibration: Press Release, Zurich, March 21–22, 2002 [Electronic resource] / Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich). – 2002. – Mode of access: http://www.jcss.ethz.ch/events/WS_2002-03/WS_2002-03.html. – Date of access: 08.07.2011.

18. Vrouwenvelder, A.C.W.M. Probabilistic calibration procedure for the derivation of partial safety factors for the Netherlands building codes / A.C.W.M. Vrouwenvelder, A.J.M. Siemes // Delft University of Technology. – 1987. – HERON, 32(4). – P. 9–29.
19. Honfi, D. Reliability of beams according to Eurocodes in serviceability limit state / D. Honfi, A.Mårtensson, S. Thelandersson // Engineering Structures. – 2012. – Vol. 35. – P. 48–54.
20. Nadol'skiy, V.V. Comparison of the reliability levels provided by Eurocodes and by standards of the Republic of Belarus / V.V. Nadol'skiy, M. Holický, M. Sýkora // Вестн. МГСУ. – 2013. – № 2. – С. 7–21.
21. Holický, M. Calibration of Reliability Elements for a Column / M. Holický, J. Markova // Workshop on Reliability Based Code Calibration: Press Release, Zurich, March 21–22, 2002 [Electronic resource] / Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich). – 2002. – Mode of access: http://www.jcss.ethz.ch/events/WS_2002-03/WS_2002-03.html. – Date of access: 08.07.2011.
22. Safety of Structures. An independent technical expert review of partial factors for actions and load combinations in EN 1990 “Basis of Structural Design”: BRE Client Report № 210297 [Electronic resource] / Building Research Establishment. – 2003. – Mode of access: <http://www.europanconcrete.eu>. – Date of access: 10.05.2011.
23. Nadolski, V. Uncertainty in Resistance Models for Steel Members / V. Nadolski, M. Sýkora // Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava. Construction Series. – 2014. – Vol. 14. – P. 26–37.
24. Надольский, В.В. Оценка ошибок моделей сопротивления сдвигу, принятых в EN 1993-1-5 и СНиП II-23 / В.В. Надольский, Ю.С. Мартынов // Вестн. МГСУ. – 2013. – № 5. – С. 7–20.
25. Byfield, M.P. An analysis of the true bending strength of steel beams / M.P. Byfield, D.A. Nethercot // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings. – 1998. – Vol. 128, № 2. – P. 188–197.
26. Mateescu, D. Lateral-torsional buckling of steel beams / D. Mateescu, V. Ungureanu // International Colloquium “Recent Advances and New Trends in Structural Design”, 7–8 mai, 2004 / Editura Orizonturi Universitare. – Timișoara, 2004. – P. 165–174.
27. Kennedy, D.J.L. Limit states design of steel structures-performance factors / D.J.L. Kennedy, M. Gad Aly // Canadian Journal of Civil Engineering. – 1980. – Vol. 7, № 1. – P. 45–77.
28. Galambos, T.V. Load and resistance factor design criteria for steel beams / T.V. Galambos, M.K. Ravindra // Structural Division, Civil and Environmental Engineering Department; Washington University, St. Louis, MO, Research Report No. 27. – 1976.
29. Galambos, T.V. Reliability of the Member Stability Criteria in the 2005 AISC Specification / T.V. Galambos // International Journal of Steel Structures. – 2004. – Vol. 4, № 4. – P. 223–230.
30. Fukumoto, Y. Evaluation of multiple column curves using the experimental data-base approach / Y. Fukumoto, Y. Itoh // Journal of Constructional Steel Research. – 1983. – Vol. 3, № 3. – P. 2–19.
31. Bjorhovde, R. Columns: From Theory to Practice / R. Bjorhovde // AISC Eng. J. – 1988. – Vol. 25, № 1. – P. 21–34.
32. Sfintesco, D. Experimental Basis for the European Column Curves / D. Sfintesco // Constr. Met. – 1970. – Vol. 3. – P. 5–12.
33. Hoglund, T. Design of thin plate I-girders in shear and bending with special reference to web buckling (in Swedish), Bulletin No. 94 of the Division of Building Statics and Structural Engineering, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1981.
34. Еврокод. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990-2011. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2012.

Поступила 11.05.2015

PROBABILISTIC MODELING OF RESISTANCE OF STEEL ELEMENTS

V. NADOLSKI, I. MARTYNOV

In the article the problem of probabilistic description of the resistance of steel elements is considered. Generalized statistics of the strength characteristics of steel, geometric characteristics of sections and uncertainty of resistance models of steel elements are presented based on the analysis of modern research. Emphasis is placed on the model of resistance adopted in the Eurocodes. The values of the partial factor for the resistance model are obtained based on the target reliability levels.

UDC 006.032:658.518.3

TARGET RELIABILITY LEVELS IN EUROCODES AND ISO STANDARDS

M. HOLICKÝ, J. MARKOVÁ, M. SÝKORA
(Czech Technical University, Prague, Klokner Institute)

The target reliability levels recommended in national and international documents vary within a broad range, while the reference to relevant costs and failure consequences is vague only. In some documents the target reliability index is indicated for one or two reference periods (1 year, 50 years or life-time) without providing appropriate links to the design working life. This contribution attempts to clarify the relationship between the target reliability levels, costs of safety measures, failure consequences, reference periods and the design working life. For ultimate limit states of common buildings and bridges (RC2), it is recommended to consider reliability index of 3.8 for a reference period equal to the design working life (50 years for buildings, 100 for bridges).

Introduction

The target reliability levels recommended in various national and international documents for new structures are inconsistent in terms of the values and the criteria according to which the appropriate values are to be selected. In general, optimum reliability levels can be obtained by considering both the relative costs of safety measures and the expected consequences of failure over the design working life (ISO 2394:1998 for the general principles on structural reliability and its approved revision ISO/FDIS 2394:2015). In accordance with this standard the minimum reliability for human safety should also be considered when people may be killed or injured as a result of failure.

The basic aim of this contribution is to clarify the link between the design working life and the reliability index, and to provide guidance for specification of the target reliability level for a given design working life. This contribution is an extension of the previous study [1].

1 Factors affecting target reliabilities

As a measure of safety the reliability index β is related to the failure probability through the inverse of the standardised normal cumulative distribution (EN 1990:2002, ISO/ FDIS 2394:2015). The target levels are commonly differentiated taking into account various aspects:

- Costs of safety measures – These costs should reflect efforts needed to improve structural reliability considering properties of construction materials and characteristics of failure modes. The relative cost of safety measures significantly depends on the variability of load effects and resistances [2];

- Failure consequences – Herein failure consequences are understood to cover all direct and indirect (follow-up) consequences related to failure [3]. When specifying these costs the distinction between ductile or brittle failure (warning factor), redundancy and possibility of progressive collapse should be taken into account. In this way it would be possible to consider the system failure in component design. However, such an implementation is in practice not always feasible and therefore consequence classes are usually related to the use of the structure (EN 1990:2002) or to a number of persons at risk (ASCE 7-10:2010);

- Time aspects – Target levels are commonly related to a reference period or a design working life. The reference period is understood as a period of time used to specify time-variant basic variables and assess the corresponding probability of failure. The design working life is considered here as an assumed period of time for which a structure is to be used for its intended purpose without any major repair work being necessary. The concept of reference period is therefore fundamentally different from the concept of design working life. Obviously, the target reliability should be always linked to a reference period considered in reliability verification.

2 Target reliabilities in normative documents

Indicative values of design working life (10 to 100 years for different types of structures) are given in EN 1990:2002 for basis of structural design. Recommended values of reliability indices are given for two reference periods, 1 year and 50 years (Tab. 1), without any explicit link to the design working life that generally differs from the reference period.

The couple of β -values (for 1 and 50 years) given in Table 1 for each reliability class corresponds to the same reliability level. Practical application of these values, however, depends on the time period considered in the structural verification, which may be linked to available probabilistic information concerning time variant basic variables (imposed load, wind, earthquake, etc.). It should be noted that the reference period of 50 years is also accepted as the design working life for common structures [4].

Table 1

Reliability classification in accordance with EN 1990

Reliability classes	Failure consequences – for loss of human life / economic, social or environmental consequences	β for reference period		Examples of structures
		1 y.	50 y.	
RC3	High or very great	5.2	4.3	Grandstands, public buildings
RC2	Medium, considerable	4.7	3.8	Residences and offices
RC1	Low and small or negligible	4.2	3.3	Agricultural buildings

For example, considering a structure in RC2 having a design working life of 50 years, the reliability index $\beta = 3.8$ should be used provided that probabilistic models of basic variables are available for this period. The same reliability level is achieved when a reference period of 1 year and $\beta = 4.7$ are applied using the theoretical models for a reference period of one year. Thus, when designing a structural member, similar dimensions (e.g. reinforcement area) would be obtained considering $\beta = 4.7$ and basic variables related to 1 year, or $\beta = 3.8$ and basic variables related to 50 years.

A more detailed recommendation concerning the target reliability is provided by ISO 2394:1998 where the target reliability indices are indicated for the whole design working life without any restriction concerning its length, and they are related not only to the consequences, but also to the relative costs of safety measures (Tab. 2).

Table 2

Examples of life-time target reliability indices β in accordance with ISO 2394:1998

Relative costs of safety measures	Failure consequences			
	small	some	moderate	great
High	0	1.5	2.3	3.1
Moderate	1.3	2.3	3.1	3.8
Low	2.3	3.1	3.8	4.3

Note that Table 2 indicates reliability indices related to life-time of a structure and not to one year reference period; $\beta = 0$ is recommended for reversible serviceability limit state, $\beta = 1.5$ for irreversible serviceability limit state. Values $\beta = 2.3$ to 3.1 are considered for fatigue limit state depending on the possibility of inspection and $\beta = 3.1, 3.8$ and 4.3 (given in the last column of Table 2 for great consequences) are recommended for the ultimate limit states.

Similar recommendations are provided in the Joint Committee on Structural Safety Probabilistic Model Code-JCSS PMC [5], overview is given in [6] – based on the study by Rackwitz [7] (Tab. 3). These reliability indices are adopted in ISO/FDIS 2394:2015. The recommended target reliability indices are also related to both the consequences and to the relative costs of safety measures, though for a reference period of 1 year.

Table 3

Tentative target reliability indices β (and associated target failure rates) related to one year reference period and ultimate limit states in accordance with JCSS PMC [5] and ISO/FDIS 2394:2015

Relative costs of safety measures	Minor consequences of failure	Moderate consequences of failure	Large consequences of failure
Large	$\beta = 3.1$ ($p \approx 10^{-3}$)	$\beta = 3.3$ ($p \approx 5 \cdot 10^{-4}$)	$\beta = 3.7$ ($p \approx 10^{-4}$)
Normal	$\beta = 3.7$ ($p \approx 10^{-4}$)	$\beta = 4.2$ ($p \approx 10^{-5}$)	$\beta = 4.4$ ($p \approx 5 \cdot 10^{-6}$)
Small	$\beta = 4.2$ ($p \approx 10^{-5}$)	$\beta = 4.4$ ($p \approx 5 \cdot 10^{-6}$)	$\beta = 4.7$ ($p \approx 10^{-6}$)

The consequence classes in JCSS PMC [5] (similar to those in EN 1990) are linked to the ratio ρ defined as the ratio $(C_{str} + C_f) / C_{str}$ of the cost induced by a failure (cost of construction C_{str} plus direct failure costs C_f) to the construction cost C_{str} :

- Class 1 Minor Consequences: ρ is less than approximately 2; risk to life, given a failure, is small to negligible and the economic consequences are small or negligible (e.g. agricultural structures, silos, masts);
- Class 2 Moderate Consequences: ρ is between 2 and 5; risk to life, given a failure, is medium and the economic consequences are considerable (e.g. office buildings, industrial buildings, apartment buildings);
- Class 3 Large Consequences: ρ is between 5 and 10; risk to life, given a failure, is high, and the economic consequences are significant (e.g. main bridges, theatres, hospitals, high rise buildings).

However, it is not quite clear what is meant by “the direct failure costs”. This term indicates that there may be some other “indirect costs” that may affect the total expected cost. Here it is assumed that the failure costs C_f cover all additional direct and indirect costs (except the structural costs C_{str}) induced by the failure. The structural costs are considered separately and related to the costs needed for an improvement of safety.

ISO 2394:1998, ISO/FDIS 2394:2015 and JCSS PMC [5] seem to recommend reliability indices lower than those given in EN 1990 even for the “small relative costs” of safety measures. It should be noted that EN 1990 gives the reliability indices for two reference periods (1 and 50 years); the latter may be accepted as the design working life for common structures. ISO 2394:1998 recommends indices for “life-time, examples”, thus related to the design working life, without any restrictions while JCSS PMC [5] and ISO/FDIS 2394:2015 provide reliability indices for the reference period of 1 year.

A new promising approach to specify the target reliability based on the concept of Life Quality Index [8–10] is considered in ISO/FDIS 2394:2015. The target annual failure probabilities are dependent on the parameter K_1 (Tab. 4) that is derived from the marginal costs of a safety measure, expected number of fatalities given structural failure and several socio-economic parameters.

Table 4

Tentative minimum target reliability indices β (and associated target failure rates) related to one year reference period and ultimate limit states, based on the LQI acceptance criterion (ISO/FDIS 2394:2015)

Relative life saving costs	K_1	LQI target reliability
Large	$10^{-3} \dots 10^{-2}$	$\beta = 3.1$ ($p \approx 10^{-3}$)
Medium	$10^{-4} \dots 10^{-3}$	$\beta = 3.7$ ($p \approx 10^{-4}$)
Small	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$\beta = 4.2$ ($p \approx 10^{-5}$)

It is noted that the target reliabilities given in standards are commonly derived considering typical failure modes and probabilistic models; see for instance ISO/FDIS 2394:2015. These considerations should be always clearly indicated to allow for comparing target levels among standards and to provide basis for further developments.

3 Target reliability for various reference periods

The target reliability levels provided in various documents are related to different reference periods. Typically one year, 50 years or simply life-time are considered. Assume that the failure probability related to one year $p_1(\beta_1)$ corresponds to the reliability index β_1 , thus

$$p_1(\beta_1) = \Phi(-\beta_1), \quad (1)$$

$\Phi(\cdot)$ denotes the cumulative distribution function of standardised normal distribution. An approximation of the failure probability p_{nk} within n basic periods assuming that the failures during each k reference periods are mutually independent is

$$p_{nk}(\beta_1, n, k) = 1 - [1 - p_1(\beta_1)]^{n/k}, \quad (2)$$

where $n/k \geq 1$. The following values of k may be taken into account:

- $k = 1$ year in many cases; for instance when climatic or traffic actions govern structural reliability,
- $k = 5 \dots 10$ years for office buildings for which reliability is dominated by a sustained component of the imposed load [5], $k = n$ for the cases in which the reliability is insignificantly affected by time-variant phenomena (e.g. structures subjected mainly to permanent actions, masonry or geotechnical structures).

The reliability index β_{nk} corresponding to p_{nk} is then obtained using $\Phi(\cdot)$ in the same way as in Equation (1). Variation of the reliability index β_{nk} with n and k is shown in Figures 1 and 2. Note that $k = 1$ corresponds to the full independence of failures in the reference periods and

$$\beta_{n1}(\beta_1, n, 1) = -\Phi^{-1}(p_{n1}(\beta_1, n, 1)). \quad (3)$$

When $k = n$ then the failures in all the reference periods are fully dependent, $p_{nn} = p_{11}$. This is relevant for the cases when structural reliability is dominated by time-invariant variables (resistance and geometry parameters, permanent actions, model uncertainties); examples might include masonry and geotechnical structures, sub-structures of bridges, underground structures etc.

The reliability index is then

$$\beta_{n1}(\beta_1, n, n) = \beta_1. \quad (4)$$

These relationships together with in Figures 1 and 2 are helpful to compare the target reliabilities indicated in the above mentioned documents.

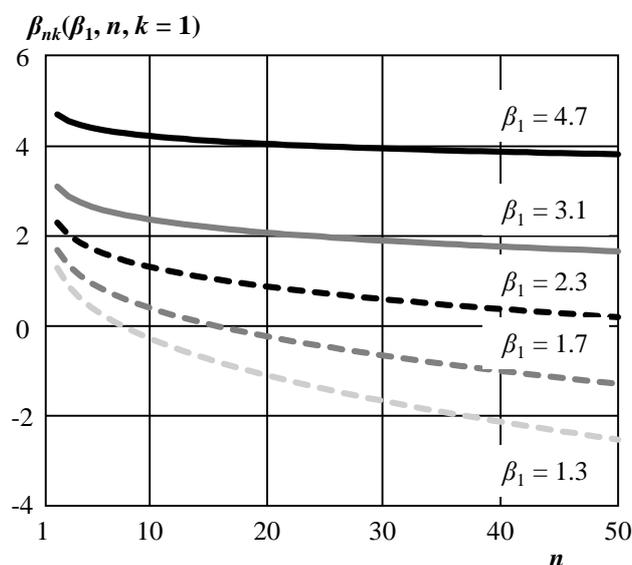


Fig. 1. Variation of β_{nk} with n for $k=1$ and selected β_1 -values (failures during all basic (one year) reference periods are mutually independent)

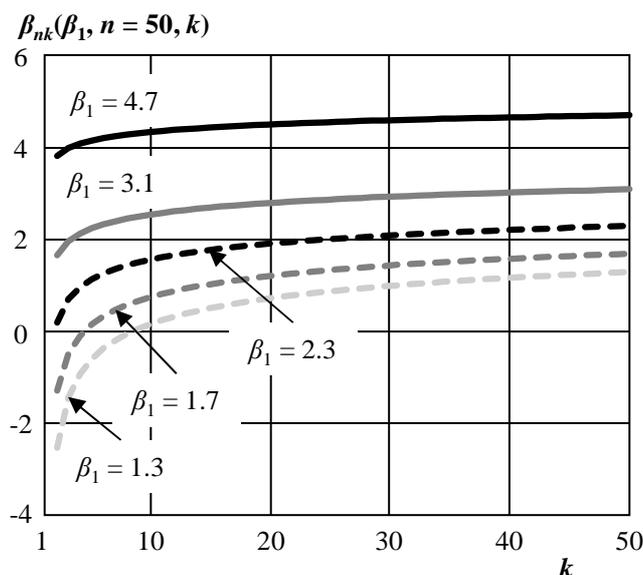


Fig. 2. Variation of β_{nk} with k for $n=50$ and selected β_1 -values (failures during k reference periods are mutually independent)

4 Comparison of target reliabilities

The target reliability indices indicated in Tables 1 to 4 are recalculated for the reference period of 50 years (considered as life-time now) using Equations (1) to (3). Considering ultimate limit states, Figure 3 shows variation of target reliability index $\beta_{50,1}$ (basic reference period $n=50$) with a degree of consequences. Comparable relative costs of safety measures are taken into account, i.e. normal reliability class for EN 1990, moderate for ISO 2394:1998, normal for JCSS PMC [5] and ISO/FDIS 2394:2015 or medium for ISO/FDIS 2394:2015-LQI approach.

It follows from Figure 3 that the target reliability indices indicated in various documents are within a relatively broad range. Obviously it may affect design or specification of partial factors and more detailed instructions how to apply the available recommendations should be provided.

Somehow similar situation is observed for serviceability limit states for which three documents are considered here: EN 1990, ISO 2394:1998 and JCSS PMC [5]. Variation of the reliability index β with relative costs of safety measures is shown in Figure 4. ISO 2394:1998 specifies the target values irrespective of safety measures and the recommended limits are represented in Figure 4 by horizontal lines. JCSS PMC [5] targets for irreversible limit states are related to one year reference period and the corresponding 50 years targets are recalculated assuming the full independence of failures.

It should be noted that the assumption of full independence is, particularly in the case of serviceability limit states, questionable and should be reconsidered. The assumption of a partial or full dependence of failures would obviously lead to more reasonable (greater) target reliability indices, definitely closer to those related to one year reference period. As already suggested in [2] the target level $\beta = 3.8$ could better be interpreted as corresponding to $\beta_1 = 4.5$ for one year as complete independency of resistance and loads in subsequent years is not realistic.

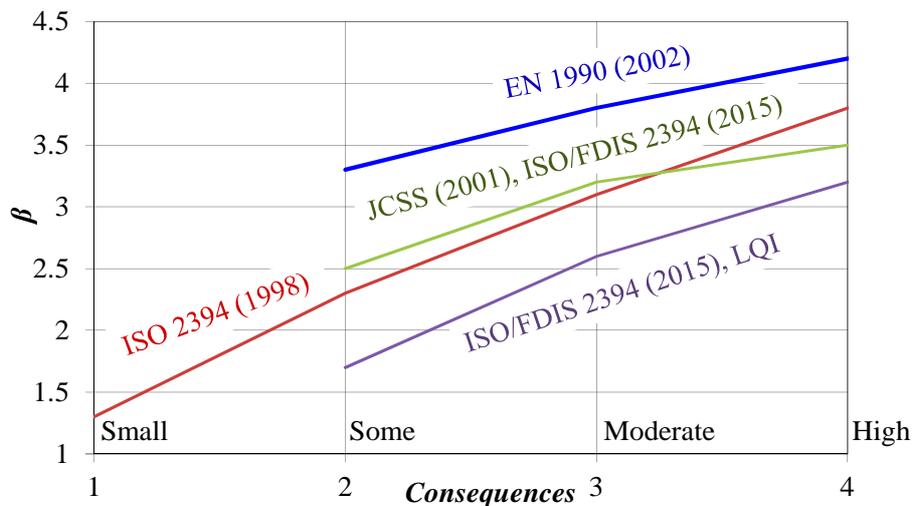


Fig. 3. Variation of $\beta_{50,1}$ for the ultimate limit states with a degree of failure consequences

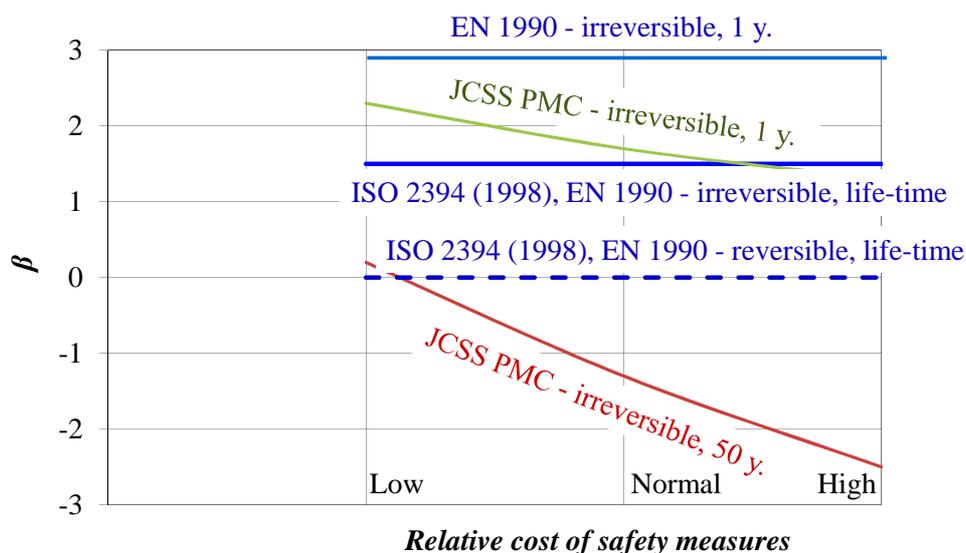


Fig. 4. Variation of the reliability index β for serviceability limit states with a degree of relative costs of safety measures

5 Target reliabilities for existing structures

In the presented study it is tacitly assumed that the target reliabilities are to be applied at a design phase. For existing structures it is in some cases uneconomical to require the same reliability levels as for new struc-

tures [11; 12]. The target level for existing structures usually decreases as it takes relatively more effort to increase the reliability level than for a new structure; see Tables 2 to 4. So for an existing structure one may for instance move from “moderate” to “large” relative costs of safety measures [2].

Two reliability levels are needed in the assessment of existing structures – the minimum level below which the structure is unreliable and should be upgraded, and the target level indicating an optimum upgrade strategy [12–14]. Available experience indicates that the minimum level is often dominated by the human safety criteria whilst the optimum repair level is close to the target level accepted for structural design.

It is noted that recently revised ISO 13822:2010 for the assessment of existing structures does not provide further information for reduction of target reliabilities e.g. for shorter residual life-times. However, detailed discussion concerning the target reliabilities for existing structures is provided elsewhere [15].

6 Recommendations for practical applications

Based on authors' experience the following recommendations are suggested for practical structural design for the reference period equal to a design working life (considering the guidance in EN 1990 and ISO 2394:1998):

- Ultimate limit state: $\beta = 3.3$ (RC1), $\beta = 3.8$ (RC2), $\beta = 4.3$ (RC3);
- Fatigue: $\beta = 1.5 \dots 3.8$ (RC2) depending on the degree of inspectability, reparability and damage tolerance;
- Serviceability limit state: $\beta = 1.5$ (irreversible), $\beta = 0$ (reversible).

As mentioned above these values are to be considered for reference periods equal to design working life of structures; e.g. commonly 50 years for buildings and 100 years for bridges. Shorter periods may be relevant for less important structures such as agricultural structures.

However, similar recommendations need to be provided in normative documents for engineering practice. It is recommended to consult appropriate target reliabilities with experts when:

- the independence of failure events in nearby reference periods is dubious (e.g. when structural reliability is expected to be dominated by time-invariant variables);
- the design situation is not covered by the above recommendations, e.g. fatigue for RC3 structures or reliability of temporary structures.

7 Conclusions

The following concluding remarks are drawn from the present study:

- in the present normative documents the target reliability levels are specified for different reference periods - typically one year, fifty years and life-time;
- recalculation of targets to uniform reference period (say 50 years) is complicated by mutual dependence of failure events;
- with increasing mutual dependence the target reliabilities approach values related to one year (basic) reference period;
- the target reliabilities indicated in available documents are within a broad range and should be revised, carefully considering failure modes and probabilistic models accepted when specifying target levels;
- target reliabilities in standards should be supplemented by clear recommendation on how to use them in practice;
- for ultimate limit states of common buildings and bridges (RC2), reliability index 3.8 can be considered for a reference period equal to the design working life (50...100 years);
- for fatigue the target reliabilities are currently specified in EN 1990 within a broad range and should be further analysed for different types of structures (e.g. high-rise buildings, road and railway bridges).

Acknowledgements

The contribution is a part of the research project LG14012 supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic. Outcomes of CZ/13/LLP-LdV/TOI/134014 supported by the European Commission have been utilised; the contribution reflects the views of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use of the information contained therein.

REFERENCES

1. Holicky, M. Target Reliability Levels in Present Standards. Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava / M. Holicky, J. Markova & M. Sykora // Civil Engineering Series. – 2014. – Vol. 14, Nr. 2. – P. 46–53.
2. Vrouwenvelder, A.C.W.M. Developments towards full probabilistic design codes / A.C.W.M. Vrouwenvelder // Struct Saf. – 2002. – Vol. 24, Nr. 2–4. – P. 417–432.
3. Holicky, M. Determination of Target Safety for Structures (submitted for publication) / M. Holicky, D. Diamantidis, & M. Sykora // In Proc. ICASP15. – Leiden: CRC Press/Balkema, 2015.
4. Load effects on buildings (Guidebook 1) / M. Holicky [et al.]. – Prague: CTU in Prague, 2009. – 214 p.

5. JCSS. JCSS Probabilistic Model Code. Joint Committee on Structural Safety, 2001.
6. Vrouwenvelder, A.C.W.M. The JCSS probabilistic model code / A.C.W.M. Vrouwenvelder // Struct. Saf. – 1997. – Vol. 19, Nr. 3. – P. 245–251.
7. Rackwitz, R. Optimization – the basis of code-making and reliability verification / R. Rackwitz // Struct. Saf. – 2000. – Vol. 22, Nr. 1. – P. 27–60.
8. Nathwani, J.S. Engineering Decisions for Life Quality: How Safe is Safe Enough? / J.S. Nathwani, M.D. Pandey & N.C. Lind. – London: Springer-Verlag, 2009. – 189 p.
9. Pandey, M.D. Life quality index for the estimation of societal willingness-to-pay for safety / M.D. Pandey & J.S. Nathwani // Struct.Saf. – 2004. – Vol. 26, Nr. 2. – P. 181–199.
10. Pandey, M.D., Nathwani, J.S. & Lind, N.C. The derivation and calibration of the life-quality index (LQI) from economic principles / M.D. Pandey, J.S. Nathwani & N.C. Lind // Struct. Saf. – 2006. – Vol. 28, Nr. 4. – P. 341–360.
11. Zwicky, D. SIA 269/2 – A New Swiss Code for the Conservation of Concrete Structures / D. Zwicky // In Proc. 3 rd fib International Congress. – Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2010. – P. 13.
12. Vrouwenvelder, A.C.W.M. Assessment Criteria for Existing Structures / A.C.W.M. Vrouwenvelder & N. Scholten // Struct Eng Int. – 2010. – Vol. 20, Nr. 1. – P. 62–65.
13. Steenbergen, R.D.J.M. Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges / R.D.J.M. Steenbergen & A.C.W.M. VROUWENVELDER // Heron. – 2010. – Vol. 55, Nr. 2. – P. 123–139.
14. Sykora, M. Target reliability levels for the assessment of existing structures – case study / M. Sykora & M. HOLICKY // In Proc. IALCCE 2012. Leiden: CRC Press/Balkema, 2012. – P. 813–820.
15. Target reliability levels for assessment of existing structures based on economic optimisation and human safety criteria (invited contribution, submitted for review) / R.D.J.M. Steenbergen // Struct Concrete. – 2015.

Поступила 09.06.2015

УРОВНИ ЦЕЛЕВОЙ НАДЕЖНОСТИ В ЕВРОКОДАХ И ISO СТАНДАРТАХ

М. ХОЛИЦКИЙ, Я. МАРКОВА, М. СИКОРА

(Чешский технический университет, Прага, Институт имени Клокнера)

Рассматриваются условные уровни надежности, рекомендованные в национальных и международных документах. Показано, что эти уровни варьируются в широком диапазоне, в то время как ссылки на соответствующие затраты и последовательность отказов недостаточно изучена. В некоторых документах индекс целевой надежности определяется для одного или двух базовых периодов (1 год, 50 лет или в течение всего жизненного цикла) без предоставления соответствующих ссылок на проекты. В данной работе делается попытка прояснить отношения между уровнями целевой надежности, затратами на обеспечение безопасности, последовательностью отказов, базовыми периодами и сроком эксплуатации. Для предельных уровней состояния общественных зданий и мостов (RC2) рекомендовано использовать целевой индекс 3.8 для периода, равного проектному сроку службы: 50 лет – для зданий, 100 лет – для мостов.

УДК 692.232.7; 614.841.41

ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ С КАРКАСОМ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ СО СБОРНОЙ ОБШИВКОЙ ИЗ СТЕКЛОМАГНИЕВОГО ЛИСТА**А.И. ДУБАТОВКА***(Института жилища – НИПТИС им. Атаева С.С., Минск)*

Представлены результаты огневых испытаний опытных образцов легких каркасных стеновых панелей на основе стального оцинкованного каркаса из тонкостенных холодногнутых профилей со сборной обшивкой из стекломагнезитовых листов, с заполнением внутренней части целлюлозным утеплителем слоями. По результатам испытаний определен предел огнестойкости конструкции, соответствующий значению RE45; конструкции может быть присвоен класс пожарной опасности К0. Проведенные испытания легли в основу разработки листовой сборной огнезащиты строительных конструкций с применением целлюлозного утеплителя и стекломагнезитовых листов.

Для повышения технологичности возведения каркасных и панельных зданий, сокращения сроков и энергоёмкости строительства в мире всё шире используются технологии легких ограждающих конструкций. Представленная работа освещает результаты огневых испытаний образцов легких каркасных стеновых панелей на основе стального оцинкованного каркаса из тонкостенных холодногнутых профилей с обшивкой из стекломагнезитовых листов (СМЛ), с заполнением внутренней части и отделкой наружной поверхности панели целлюлозным теплоизолирующим материалом (эковата) [1].

Исследовательская часть. Испытания проводились на экспериментально-испытательном полигоне «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» (НИИ ПБиЧС МЧС Республики Беларусь) в период с 2011 по 2013 год¹.

Специалисты частного проектного унитарного предприятия «Моноракурс» при разработке конструкции панели строительной легкой (ПСЛ) руководствовались требованиями ТКП 45-3.02-156-2009 «Здания и сооружения, возводимые с применением изделий поэтапной сборки. Правила проектирования и устройства».

Испытания опытных образцов стеновых панелей проводились с целью определения предела огнестойкости и класса пожарной опасности по ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования»; ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции»; СТБ 1961-2009 «Конструкции строительные. Методы определения пожарной опасности». Всего было испытано 12 образцов.

В Республике Беларусь требования по минимальному пределу огнестойкости к слоистым ненесущим наружным ограждающим конструкциям устанавливает Технический кодекс ТКП 45-2.02-142-2011 «Здания, строительные конструкции, материалы и изделия. Правила пожарно-технической классификации» (табл. 4): «для зданий всех степеней огнестойкости, кроме I, достаточно достижения предела огнестойкости по потере целостности в 30 минут и класса пожарной опасности К0».

При разработке программы огневых испытаний рассматривались три направления для исследования вариантов совершенствования многослойных конструкций и повышения их огнестойкости при снижении количества и толщины слоев:

- применение усилителей стыков сборной обшивки, придающих демпфирующие свойства и увеличивающих податливость конструкции из сборных обшивок в целом для снижения трещинообразования;
- применение дополнительных защитных сухих штукатурных смесей, покрывающих слоем до 3 мм целлюлозный теплоизоляционный слой для повышения его огнестойкости при увеличении огневого и температурного воздействия на его незащищенную поверхность после повреждения наружной обшивки;
- применение дополнительного защитного наружного слоя из гипсокартонных листов и/или гипсокартонных листов с устройством дополнительного слоя стеклоткани поверх основной конструкции для предохранения и защиты поверхностей от трещинообразования.

Предварительная оценка пределов огнестойкости конструкции ПСЛ осуществлялась на основе ТКП 45-2.02-110-2008 «Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости», п. 5.9:

- по несущей способности – «горючесть материалов, из которых выполнена конструкция, не определяет ее предела огнестойкости»;

¹ В подготовке и проведении огневых испытаний принимал участие инженер Р.В. Твердохлебов.

- по теплоизолирующей способности – «предел огнестойкости слоистых ограждающих конструкций принимается равным сумме пределов огнестойкости отдельно взятых слоев. Увеличение числа слоев ограждающей конструкции (оштукатуривание, облицовка) повышает ее предел огнестойкости по теплоизолирующей способности».

Поэтому для удобства проектирования с применением ПСЛ были определены ее составляющие: основная конструкция и защитно-декоративное покрытие (рис. 1).

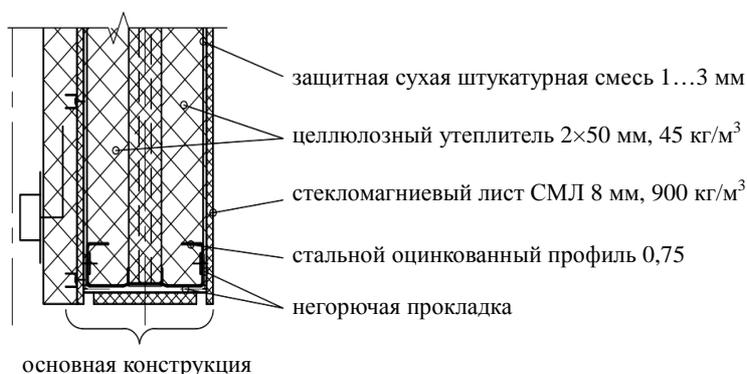


Рис. 1. Схема основной конструкции стеновых панелей

Для испытаний принята основная конструкция (см. рис. 1) по ТУ ВУ 690843910.001-2011 с дополнительными слоями в ряде испытаний из сухих штукатурных смесей для защиты целлюлозного утеплителя, наружных защитных обшивок из гипсокартонных листов и стеклоткани для защиты стекломagneвиевого листа основной конструкции от трещинообразования.

Во всех случаях элементы несущего каркаса панели были выполнены из холодногнутых оцинкованных С-профилей без термоперфораций в стенке толщиной 0,75 мм, установленных с шагом 600 мм. В качестве обшивки использовался стекломagneвий лист плотностью 900 кг/м³ в виде специальных сборных деталей толщиной 8 мм с устройством температурно-деформационных швов. Крепление обшивки выполнено саморезами по металлу с пресс-шайбой и буром 4,2×16 мм с шагом 150...250 мм.

В панели применен трехслойный теплоизоляционный слой: с двух сторон – эффективный целлюлозный утеплитель (эковата), уложенный с плотностью 45 кг/м³ слоями по 50 мм; в середине – температуровлагорегулирующая вставка из экструзионного пенополистирола толщиной 40 мм с внутренними пассивными воздушными каналами.

Для решения вопроса высокой теплопроводности металла и снижения «мостиков холода», а также для дополнительной защиты тонкостенных профилей от агрессивной среды листовых материалов (возможной коррозии) и скорой потери несущей способности под огневым воздействием в конструкции панели использовались специальные теплоизолирующие негорючие прокладки толщиной до 3 мм, расположенные между стекломagneвиевым листом и металлическим каркасом.

Измерение температурного воздействия. Огневые испытания проводились с внутренней, обращенной в направлении защищаемых помещений стороны 1 (рис. 2). С целью регистрации изменения температуры слоев снаружи и внутри испытываемых конструкций были установлены термомпары.

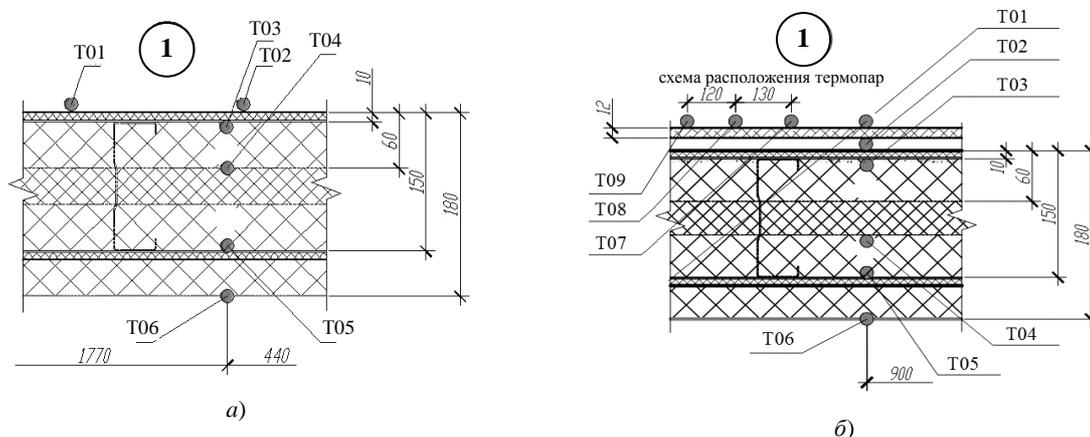


Рис. 2. Схема расстановки термомпар в образцах:
а – основной конструкции; б – с защитным покрытием из гипсокартона

Для основной конструкции со стороны огневого воздействия 1, начиная с наружного слоя (термопары T01 и T02), на границе слоев последовательно расставлялись термопары (см. рис. 2, а):

- T03 – между внутренней стороной первой наружной обшивки и наружной поверхностью первого целлюлозного теплоизоляционного слоя;
- T04 – между наружной частью температуровлагорегулирующей вставки и внутренней стороной первого целлюлозного теплоизоляционного слоя;
- T05 – между тыльной стороной второго целлюлозного теплоизоляционного слоя и внутренней стороной второй наружной обшивки;
- T06 – между фасадной поверхностью наружного целлюлозного теплоизоляционного слоя и воздушной средой.

Для конструкции с дополнительным защитным слоем из гипсокартонных листов со стороны огневого воздействия 1, начиная с термопары T01, на защитном слое и термопары T02, установленной между защитным и первым наружным слоями облицовок, на границе слоев последовательно устанавливались термопары T03...T06 аналогично схеме, описанной выше (см. рис. 2, б).

Регистрация хода огневых испытаний проводилась с применением видео- и фотооборудования. Исследование степени повреждения слоев после завершения огневого воздействия по всем трем направлениям осуществлялось визуально при послыном демонтаже каждого из слоев конструкции.

Проведение испытаний

Определение предела огнестойкости проводилось путем испытания огнем воздействием до 60 минут опытных образцов панелей размером 3,2×3,2×0,19 м без защитного покрытия, но с аналогичной расстановкой термопар (см. рис. 2).

По требованию испытательного центра данное огневое испытание проводилось первым по причине высказанных сомнений в огнестойкости данной конструкции, поскольку в ней применены горючие теплоизоляционные материалы со степенями горючести Г2 у экваты и Г4 у внутренней температуровлагорегулирующей вставки из экструдированного пенополистирола, расположенной между двумя слоями целлюлозного утеплителя. Обычно в подобных каркасных конструкциях применяют минераловатные утеплители со степенью НГ. Но в мировой практике известны примеры эффективного применения целлюлозного утеплителя в качестве материала для огнезащиты строительных конструкций [2].

В традиционных конструкциях легких каркасных стен проблема «мостиков холода» решается путем применения горючих прокладок между обшивкой и металлическим каркасом. Прокладки в таком случае работают только как теплоизоляция. При длительном огневом воздействии они выгорают, образуя полость между обшивкой и каркасом, что ухудшает противопожарные свойства и надежность крепления обшивки. Поэтому предлагается использовать негорючие прокладки толщиной до 3 мм.

В результате обследования испытанных образцов панелей обнаружено образование защитного слоя, похожего на керамику, на внешней поверхности прокладки, контактирующей со слоем обшивки со стороны огневого воздействия.

По результатам испытаний по определению предела огнестойкости конструкции было присвоено значение RE45. Требуемое значение E60 для зданий I степени огнестойкости теоретически легко достигается дополнительным слоем огнестойкого гипсокартона ГКЛО, который добавляет 15 минут огнестойкости.

Определение класса пожарной опасности проводилось путем испытания огнем воздействием до 45 минут опытных образцов панелей размером 2,5×2,5×0,19 м. Термопары установлены по схеме согласно рисунку 2, б. Датчик T03 показал, что первый целлюлозный теплоизоляционный слой начал интенсивно прогреваться только после 16 минуты (рис. 3), что было вызвано началом образования трещин в обшивке из стекломагнезитового листа толщиной 8 мм со стороны огневого воздействия. Данный факт подтверждает хорошие огнезащитные свойства СМЛ плотностью выше 900 кг/м³ – 8 мм этого материала эффективно сдерживали воздействие высокой температуры 600...650 °С в течение первых 16 минут, тогда как на его внутренней поверхности термопары фиксировали температуру в 75...100 °С.

На отрезке 25...30 минут при температуре 325 °С график приобрел вид прямой. Это значит, что, несмотря на продолжение повышения температуры в печи (линии графика T01, T02), температура целлюлозного утеплителя перестала повышаться. С 30-й и до 36-й минуты было отмечено падение температуры в среднем на 15 °С. Данное явление можно, предположительно, объяснить тем, что в целлюлозном утеплителе начался процесс дегидратации – выделения химически связанной воды из антипиреновых добавок, входящих в состав данного утеплителя (борной кислоты и буры). С 36-й минуты испытаний на поверхности первого целлюлозного слоя начался плавный рост температуры, который после 40-й минуты превысил 350 °С. Даже после потери целостности СМЛ толщиной 8 мм датчик T03, расположенный под обшивкой, показывал температуру на 425...450 °С ниже температуры огневого воздействия. Показания датчика T04 указывают на то, что к 24-й минуте середина панели прогрелась всего до 50 °С, при этом к концу испытаний, на 46-й минуте, температура центра не превысила 100 °С. Температурный

режим наружных слоев стеновой панели оставался на начальном уровне без изменений, о чем свидетельствуют показания датчиков T05 и T06.

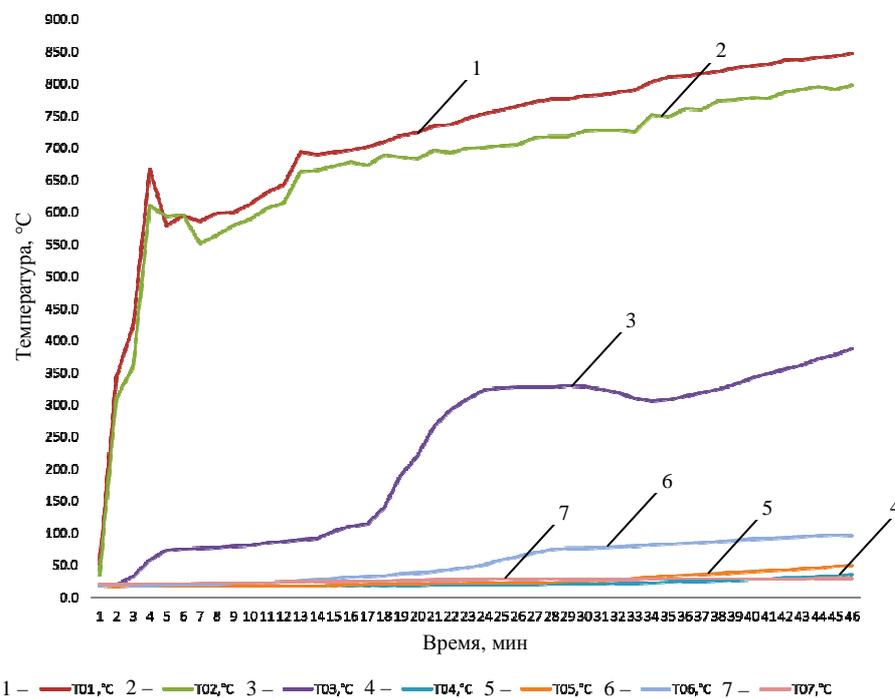


Рис. 3. Показания термопар при огневых испытаниях до 45 минут

Испытание до 45 минут по схеме (рис. 2, а) без защитного слоя ГКЛ. Элементы наружной обшивки в сочетании с теплоизоляционным слоем из эковаты толщиной до 50 мм и средней плотностью 45 кг/м³ показали себя как достаточная огнезащита от огневого воздействия длительностью 45 минут (рис. 4).

Испытание до 45 минут по схеме (рис. 2, б) с защитным слоем ГКЛ и стеклотканью. Для огнестойкости в 45 минут достаточно одного наружного слоя из гипсокартонных листов. Применение дополнительного покрытия в виде армирования стеклотканью для предохранения и защиты поверхностей от трещинообразования показало себя как очень эффективное. В течение 45 минут огневого воздействия проявилось активное трещинообразование поверхностного слоя из гипсокартонных листов. Благодаря армированию из стеклоткани (она находилась под наружным слоем из ГКЛ), которое потемнело, но сохранило целостность, защищаемая поверхность стекломагнезитовой обшивки осталась без трещин, а целлюлозный утеплитель лишь незначительно пожелтел в эпицентре температурного воздействия (рис. 5).



Рис. 4. Образец при испытании 45 минут без защитного слоя гипсокартона



Рис. 5. Образец при испытании 45 минут с защитными гипсокартонными листами и стеклотканью после демонтажа обшивки

Таким образом, в образцах по схеме, аналогичной рисунку 2, а, без защитного слоя гипсокартона при испытании до 45 минут имеют место вздутие и трещинообразование обшивок со стороны огневого воздействия, о чем свидетельствует рисунок 4. Вариант защиты по схеме (см. рис. 2, б) при испытании до 45 минут с защитными слоями гипсокартона и стеклоткани можно считать эффективным, если не брать в расчет его высокую стоимость.

Испытание до 45 минут по схеме (см. рис. 2, б) с защитным слоем ГКЛ. Учитывая вышесказанное, последующие испытания проводились с одним защитным слоем ГКЛ без дополнительного слоя стеклоткани. По результатам обследований образцов с защитным покрытием только из гипсокартонных листов обнаружено небольшое трещинообразование защищаемой поверхности (стекломагнезиевого листа СМЛ) в эпицентре огневого воздействия.

Заключение. Исходя из результатов испытаний на определение класса пожарной опасности стеновой панели ПСЛ может быть присвоено максимальное значение К0. То есть несущая наружная стеновая панель ПСЛ на основе стального оцинкованного каркаса из тонкостенных холодногнутых профилей, с обшивкой из стекломагнезиевых листов СМЛ и заполнением внутренней и наружной части целлюлозным теплоизолирующим материалом эковата соответствует необходимым требованиям пожарной безопасности и может применяться в зданиях любой степени огнестойкости.

Проведенные испытания легли в основу разработки огнезащиты строительных конструкций с применением целлюлозного утеплителя и стекломагнезиевых листов. Вопрос снижения стоимости огнезащиты строительных (особенно металлических) конструкций является весьма актуальным, так как стоимость существующих решений листовой огнезащиты довольно высокая, поскольку для этого используются дорогостоящие импортные материалы.

На основе проведенных огневых испытаний разработан менее дорогостоящий вариант сборной листовой огнезащиты с применением в качестве основных материалов целлюлозного утеплителя (эковата) и облицовки из стекломагнезиевых листов. Производство эковаты в Беларуси освоено уже давно, а стекломагнезиевый лист СМЛ можно изготавливать из местного сырья ОАО «Доломит» (Витебск). Таким образом, предлагаемая огнезащита может быть полностью отечественным продуктом [3]. Огнезащиту предлагается укрупнительно собирать на предприятии и поставлять на объект сборными пакетами. При этом экономия по стоимости, по предварительным расчетам, составит порядка 40 %, по весу – от 15 до 25 %. Следовательно, можно констатировать, что полученные результаты проведенных нами исследований позволят повысить эффективность существующих систем огнезащиты на основе листовых материалов и за счет более рациональной конструкции снизить их стоимость, вес и трудоемкость сборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dubatovka, A. Fire tests of cold-formed steel structures. Wall slab with magnesium oxide assembled cladding / A. Dubatovka, R. Tverdokhlebov, S. Starovoi'tov // Proc. 7th European Conference on Steel and Composite Structures "EUROSTEEL 2014", 10 – 12 September 2014, Naples, Italy, 11/41-395.
2. Kolarkar, P.N. Structural and Thermal Perfomance of Cold-Formed Steel Stud Wall Systems under Fire Conditions: PhD dissertation / P.N. Kolarkar; Queensland University of Technology. – Brisbane, Australia, 2010.
3. Дубатовка, А.И. Конструктивные системы зданий с применением ограждающих конструкций из стеновых панелей на основе стекломагнезитовых листов: дис. ... магистра строительства / А.И. Дубатовка; БНТУ. – Минск, 2012. – 86 л.

Поступила 02.06.2015

FIRE TESTS OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURES WALL SLAB WITH MAGNESIUM OXIDE ASSEMBLED CLADDING

A. DUBATOVKA

The fire test samples have been blank wall slabs for the fire effect. Load bearing framework elements are made of thick C-shaped cross-section steel profiles. External cladding elements of magnesium oxide wallboard thick in combination with the cellulose heat insulating layer proved themselves as sufficient fire protection. Tests have confirmed efficiency of proposed constructive solutions and started the development of complex multilayered system of fire protection for steel and reinforced concrete construction on the basis of magnesium oxide assembled cladding and cellulose insulation.

УДК 624.131.35:624.154.1

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЕСЧАНЫХ ОСНОВАНИЙ ОДИНОЧНЫХ СВАЙ ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ

Б. МОРАДИ САНИ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматриваются зарубежные методы оценки несущей способности свай по данным статического зондирования в грунтовых условиях на одной из площадок строительства в городе Минске. Показаны грунтовые условия объекта со свойствами грунтов и опытными зависимостями для испытанных на нем буронабивных и забивных свай. Оценена достоверность зарубежных и применяемых в Республике Беларусь методов предварительной оценки несущей способности оснований одиночных свай. Полученные результаты для данного объекта проанализированы и сопоставлены с опытными данными сопротивления грунтов по результатам зондирования.

Введение. Современные методы проектирования свайных фундаментов нашли широкое применение при анализе данных полевых испытаний. Одним из путей достижения эффективности фундаментостроения и улучшения качества их проектирования является повышение точности и надежности методов прогноза несущей способности оснований свай. В Республике Беларусь и за рубежом для определения характеристик грунтов и несущей способности свай широко используется метод полевого испытания грунтов статическим зондированием.

В данном исследовании рассмотрены методы определения несущей способности свай, осуществляя сравнение, по данным статического зондирования согласно Еврокоду, Шмертману, Бустаманте и Гианеселли (метод LCPC) и белорусским нормам.

Чтобы предсказать несущую способность оснований свай, по результатам статического зондирования грунтов оценивали взаимосвязь между ними и статическими испытаниями 67 натурных свай на одном из объектов в городе Минске [1]. Для анализа грунтовых условий использовали результаты статического зондирования в точках вблизи испытанных свай [2–4].

Грунтовые условия и результаты испытаний свай статической нагрузкой. В связи с разными свойствами грунтов (табл. 1) и характером напластований (рис. 1) были запроектированы буронабивные вибровштампованные сваи с длинами 4,0; 5,0; 6,0; 9,0 м.

Таблица 1

Нормативные и расчетные значения характеристик грунтов

№ ИГЭ	Наименование грунта	γ_{II} , кН/м ³	e	c_n	c_{II} , кПа	φ_n	φ_{II}	E , МПа	
1	Искусственные отложения	Насыпной грунт	20,1	–	–	–	–	–	
2		Торф, загорфованный грунт	10,1	6,09	20	13	22	19	1,1
3		Супесь с примесью органики	17,3	0,93	13	9	21	18	6
4		Супесь средней прочности	20,7	0,53	15	10	21	18	7
5		Мел, мергель	15,0		16	11	13	10	7,5
6		Песок средний средней прочности	10,2	0,63	1	0,7	35	32	16
7		Песок крупный, гравелистый средней прочности	10,1	0,64	–	–	35	32	16
8	Волноледниковые отложения	Суглинок средней прочности	20,3	0,61	26	17	21	21	11
9		То же, прочный и очень прочный	20,5	0,61	35	30	24	21	24
10		Песок пылеватый средней прочности	10,2	0,63	4	4	31	31	14
11		То же, прочный	11,0	0,51	6	4	34	31	34
12		Песок мелкий средней прочности	10,2	0,63	2	1,3	32	29	16
13		То же, прочный	10,9	0,52	4	2,7	36	33	34
14		Песок средний средней прочности	10,5	0,57	2	1,3	37	34	16
15		То же, средней прочности	11,0	0,50	2	1,3	38	35	34
16		Песок крупный/гравелистый средней прочности	10,5	0,58	1	0,7	39	35	16
17	Моренные отложения	То же, прочный	11,0	0,50	1	0,7	41	37	34
18		Супесь средней прочности	22,9	0,30	40	34	27	26	6
19		Супесь прочная	23,0	0,29	40	34	27	26	17
20		Супесь очень прочная	23,0	0,29	48	32	30	26	26
21		Песок мелкий прочный	11,0	0,50	4	2,7	36	31	34



Рис. 1. Геологические разрезы в точках выполнения опытных свай на площадке

Бурунабивные вибровштампованные сваи устраивали посредством вибропогружения обсадной трубы диаметром 325 мм с тераемым наконечником, погружением каркаса в скважину и заполнением ее бетоном с последующим виброизвлечением обсадной трубы. В грунтовых условиях объекта (см. рис. 1) несущая способность таких свай составляла от 600 до 703 кН [1] при осадках от 6,4 до 16 мм [5].

На объекте были испытаны также забивные сваи, погружаемые СУМ-96 дизель-молотом С-330. Отказ при забивке составлял 0,77...1,1 см. Статическим испытаниям подвергались предусмотренные проектом забивные сваи № 1...34 сечением 300×300 мм с длинами 6,0...12,0 м, что соответствовало несущей способности от 800 до 12 кН. В качестве несущего слоя для свай служили преимущественно пески пылеватые, мелкие, средние и крупные, средней прочности и прочные (ИГЭ-11, 13, 15, 17).

Испытывали сваи статической вдавливающей нагрузкой гидродомкратом ДГ-200 грузоподъемностью 2000 кН, прикладывая нагрузку ступенями по 100 кН.

На объекте для уточнения длины, условий погружения и несущей способности свай выполнены испытания грунтов эталонной сваей динамическими и статическими нагрузками. Свойства грунтов на объекте приведены в таблице 1.

Классификация зарубежных методов оценки несущей способности свай по данным статического зондирования. Для оценки несущей способности свай по данным зондирования используют два подхода – прямой и косвенный. При *косвенном подходе* вначале по данным зондирования определяют прочностные характеристики грунтов (сопротивление недренированному сдвигу S_u и угол внутреннего трения ϕ), а затем используют их для вычисления несущей способности свай. *Прямой подход* предполагает вычисление q_b и f_i с использованием непосредственно параметров статического зондирования (сопротивления грунта под наконечником зонда q_c и по боковой поверхности муфты трения зонда f_s , а также порового давления u).

В зависимости от используемых параметров зондирования прямые методы вычисления q_b и f_i можно разделить на три группы [6]. В *первую группу* входят методы, в которых для вычисления q_b и f_i используют только значения q_c . К ней относятся методы: Бустаманте и Гианеселли (метод LCPC, фр. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), Аоки и Де Аленкара, Филиппоннэта и рекомендуемый европейскими нормами ENV 1997-3:2000. В методах *второй группы* для вычисления несущей способности свай применяют значения q_c и f_s . К ним относят методы: Шмертманна, Тумайя и Фахроо, Прайса и Вэрдла, Клисби и др. Метод Эслами и Феллениуса относится к третьей группе прямых методов вычисления несущей способности свай, в которых используются значения параметров зондирования q_c , f_s и u_2 . Динамическое поровое давление u_2 фиксируют во время погружения зонда.

В данном исследовании для определения несущей способности песчаных оснований свай использовали 3 из вышеназванных методов, а также метод из ТНПА Республики Беларусь.

Метод Бустаманте и Гианеселли (метод LCPC) [7] используют для забивных, набивных, буровых и буроинъекционных свай разных видов в песках, гравии и глинистых грунтах, применяя следующие формулы:

$$q_b = k_b q_{eq,b}, \quad (1)$$

$$f_i = q_{eq,s} / k_s, \quad (2)$$

где k_b и k_s – эмпирические коэффициенты, значение каждого из которых зависит от разновидности грунта и технологии заглубления свай (табл. 2); $q_{eq,b}$ – эквивалентное среднее значение q_c в пределах активной зоны от $1,5D$ выше пяты свай до $1,5D$ ниже нее (D – сторона или диаметр поперечного сечения пяты свай в месте наибольшего уширения); $q_{eq,s}$ – эквивалентное среднее значение q_c , определяемое в пределах i -го слоя грунта, прорезаемого свай.

Таблица 2

Значения коэффициентов k_b и k_s в методе Бустаманте и Гианеселли для набивных свай

Грунт	q_c , МПа	k_b	k_s
Глина	< 1,0	0,50	30
	1,0...5,0	0,45	40
	> 5,0	0,55	60
Пылеватый грунт	≤ 5,0	0,50	60
	> 5,0	0,55	60
Песок	< 5	0,50	60
	5,0...12,0	0,50	100
	> 12	0,40	120

Значение $q_{eq,b}$ определяют в следующей последовательности:

- 1) вычисляют среднее значение лобового сопротивления q'_{ca} в пределах активной зоны от $1,5D$ выше пяты свай до $1,5D$ ниже неё;
- 2) в пределах зоны $1,5D$ выше пяты свай исключают значения q_c , которые больше $1,3 q'_{ca}$ и меньше $0,7 q'_{ca}$;
- 3) в пределах зоны $1,5D$ ниже пяты свай исключают значения q_c , которые больше $1,3 q'_{ca}$;
- 4) вычисляют $q_{eq,b}$ как среднее значение лобовых сопротивлений в пределах активной зоны после исключения экстремальных значений по пунктам 2 и 3.

Значение $q_{eq,s}$ находят следующим образом:

- 1) вычисляют среднее значение лобового сопротивления $q_{ca,s}$ в пределах i -го слоя грунта, прорезаемого свай;
- 2) в пределах i -го слоя грунта исключают значения q_c , которые больше $1,3 q_{ca,s}$ и меньше $0,7 q_{ca,s}$;
- 3) вычисляют $q_{eq,s}$ как среднее значение лобовых сопротивлений в пределах i -го слоя грунта после исключения экстремальных значений по пункту 2.

Метод Шмертманна используют для бетонных, деревянных и стальных свай, заглубляемых в глины и пески за счет их вытеснения [8]. Для вычисления удельной несущей способности грунта под пятой сваи применяют следующую зависимость:

$$q_b = (q_{c1} + q_{c2}) / 2 \leq 15 \text{ МПа.} \quad (3)$$

Осредненные значения q_{c1} и q_{c2} определяют по правилу кратчайшего пути:

- 1) определяют $q_{c2,1}$ – минимальное среднее значение лобового сопротивления в пределах активной зоны от $0,7D$ до $4,0D$ ниже пяты сваи;
- 2) вычисляют $q_{c2,II}$ – среднее значение лобового сопротивления по кратчайшему пути;
- 3) вычисляют осредненное значение лобового сопротивления в пределах активной зоны ниже пяты сваи: $q_{c2} = 0,5(q_{c2,1} + q_{c2,II})$;
- 4) вычисляют q_{c1} – осредненное значение лобового сопротивления в пределах активной зоны $8D$ выше пяты сваи по кратчайшему пути.

При вычислении значений q_{c1} , $q_{c2,1}$ и $q_{c2,II}$ используют значения q_c , соответствующие координатам точек кратчайшего пути. Для определения удельной несущей способности i -го слоя глины по боковой поверхности сваи используют формулу:

$$f_i = \alpha_c f_{sa} \leq 120 \text{ кПа,} \quad (4)$$

где f_{sa} – среднее значение f_s в пределах слоя глины; α_c – коэффициент для глины, значение которого для бетонных и деревянных свай вычисляют по эмпирической формуле:

$$\alpha_c = 0,2049 f_s^5 - 1,1778 f_s^4 + 2,2795 f_s^3 - 1,3222 f_s^2 - 0,7543 f_s + 1,25. \quad (5)$$

Несущую способность песка по боковой поверхности сваи вычисляют следующим образом:

$$Q_s = \alpha_s \left(\sum_{z=0}^{9d} \frac{z}{8d} f_s A_s + \sum_{z=8d}^L f_s A_s \right), \quad (6)$$

где f_s – сопротивление грунта по боковой поверхности зонда; z – глубина, для которой вычисляют удельную несущую способность грунта по боковой поверхности сваи; d – сторона или диаметр поперечного сечения ствола сваи; L – глубина погружения нижнего конца сваи; α_s – коэффициент для песка, значение которого при $L/d \geq 25$ принимают равным 0,83, а при $L/d < 25$ вычисляют по эмпирической формуле:

$$\alpha_s = -0,00009(L/d)^3 + 0,0062(L/d)^2 - 0,151(L/d) + 2,132. \quad (7)$$

Метод Eurocode 7...3 method (process recommended by EC 7-3). В этом методе максимальные боковое и лобовое сопротивления можно получить из уравнений:

$$p_{\max, \text{лоб.}} = \alpha_p \cdot 0,5\beta s \left[\frac{q_{c,I, \text{сред.}} + q_{c,II, \text{сред.}}}{2} + q_{c,III, \text{сред.}} \right], \quad (8)$$

$$p_{\max, \text{бок.}} = \alpha_s \cdot q_{c,z}. \quad (9)$$

Здесь β – фактор, зависящий от формы сваи (рис. Д.3 [9]); s – фактор, зависящий от формы конца сваи:

$$s = \frac{\left[1 + \frac{\sin \phi'}{r} \right]}{(1 + \sin \phi')}; \quad (10)$$

$q_{c,I, \text{сред.}}$ – среднее значение $q_{c,I}$ по глубине, проходящей от нижнего конца сваи до уровня критической глубины, составляющей по крайней мере $0,7D$ и не более $4D$ пяты сваи (критической глубиной считается такая, где расчетное значение $p_{\max, \text{лоб.}}$ становится минимальным):

$$q_{c,I, \text{сред.}} = \frac{1}{d_{\text{крит.}}} \int_0^{d_{\text{крит.}}} q_{c,I} dz, \quad (11)$$

$$0,7D \leq d_{\text{крит.}} \leq 4D;$$

$q_{c,II,ср.ед.}$ – среднее значение наименьшего значения $q_{c,II}$ по глубине, идущей вверх от критической глубины до концов свай, определяется по формуле

$$q_{c,II,ср.ед.} = \frac{1}{d_{ср.ит.}} \int_{d_{ср.ит.}}^0 q_{c,II} dz; \quad (12)$$

$q_{c,III,ср.ед.}$ – среднее значение $q_{c,III}$ на интервале глубин, проходящем от конца сваи к уровню $8D$ пяты сваи. Этот цикл начинается с самого низкого значения $q_{c,III}$, используемого для расчета $q_{c,II,ср.ед.}$;

$$q_{c,III,ср.ед.} = \frac{1}{8D} \int_0^{-8D} q_{c,III} dz; \quad (13)$$

$q_{c,z}$ – есть q_c на глубине z ; α_p – фактор класса сваи по таблице D.5; α_s – фактор класса сваи и грунтовых условий (табл. 3) [9].

Таблица 3

Значение α_s для разных видов грунтов

Виды грунта	Отношение z / D	α_s
Песок мелкий	–	0,006
Песок крупный	–	0,0045
Гравий	–	0,003
Глина/пылеватый ($q_c \leq 1$ МПа)	$5 < z / D < 20$	0,025
Глина/пылеватый ($q_c \geq 1$ МПа)	$z / D \geq 20$	0,055
Глина/пылеватый ($q_c > 1$ МПа)	не применяем	0,035
Торф	не применяем	0

Анализ результатов статического зондирования на объектах. Статистический анализ проводился для того, чтобы определить наиболее достоверный, то есть отражающий реальное взаимодействие свай с грунтами, метод определения их несущей способности по результатам статического зондирования. Установлены критерии оценки с учетом линий наибольшего соответствия соотношений между F_{c3} к F_{cm} , среднего арифметического и стандартного отклонения для F_{c3} / F_{cm} , функции кумулятивной вероятности (CP_i) для относительной величины, нормального распределения F_{c3} / F_{cm} . Такой анализ позволяет достаточно верно оценить различные методы с позиции точности их предсказания.

Однако попытка оценить достоверность методов расчета по результатам зондирования только посредством их статистической обработки может привести к неверному заключению. Поэтому нужно рассмотреть графики сравнения предполагаемых (прогнозируемых) и измеренных значений несущей способности оснований свай вместе с результатами статистического анализа.

Отношение расчетной к измеренной несущей способности основания сваи F_{c3} / F_{cm} находится теоретически в диапазоне от 0 до бесконечности, с оптимальным значением 1. Это приводит к несимметрическому распределению F_{c3} / F_{cm} вокруг среднего. Нами использовано нормальное распределение отношения F_{c3} / F_{cm} , чтобы оценить применяемые методы определения несущей способности оснований свай.

Методы, базирующиеся на статическом зондировании при $F_{c3} / F_{cm} < 1$, бывают заниженными по сравнению с измеренными несущими способностями.

Результаты соотношений прогнозируемой несущей способности F_{c3} к измеренным значениям F_{cm} показаны на рисунке 2. Для каждого метода проводился анализ регрессии, чтобы получить более подходящую линию отношений F_{c3} / F_{cm} . Отношения между F_{c3} / F_{cm} и соответствующий коэффициент детерминации (R^2) были определены применительно к каждому методу статического зондирования.

Далее представлена схема статистической оценки с применением четырёх различных критериев определения достоверности использования различных методов статического зондирования для прогноза несущей способности оснований свай. Нами использованы следующие критерии:

- 1) уравнения для наиболее оптимальной линии отношения расчетной (F_{c3}) к измеренной несущей способности (F_{cm}) с соответствующим коэффициентом детерминации (R^2);
- 2) среднее арифметическое (μ) и стандартное отклонение (σ) для F_{c3} / F_{cm} ;
- 3) 50- и 90-процентные кумулятивные вероятности (P_{50} и P_{90}) для F_{c3} / F_{cm} ;
- 4) 20-процентный уровень точности, полученный из логнормального распределения для отношений F_{c3} / F_{cm} .

Отношения рассчитанных несущих способностей (F_{c3}) к измеренным значениям (F_{cm}) проиллюстрированы рисунком 2. Для каждого метода анализ регрессии проводился с целью получить наиболее

оптимальную линию отношений F_{c3} / F_{cm} . Отношения F_{c3} / F_{cm} и соответствующий коэффициент детерминации (R^2) были определены применительно к каждому методу статического зондирования.

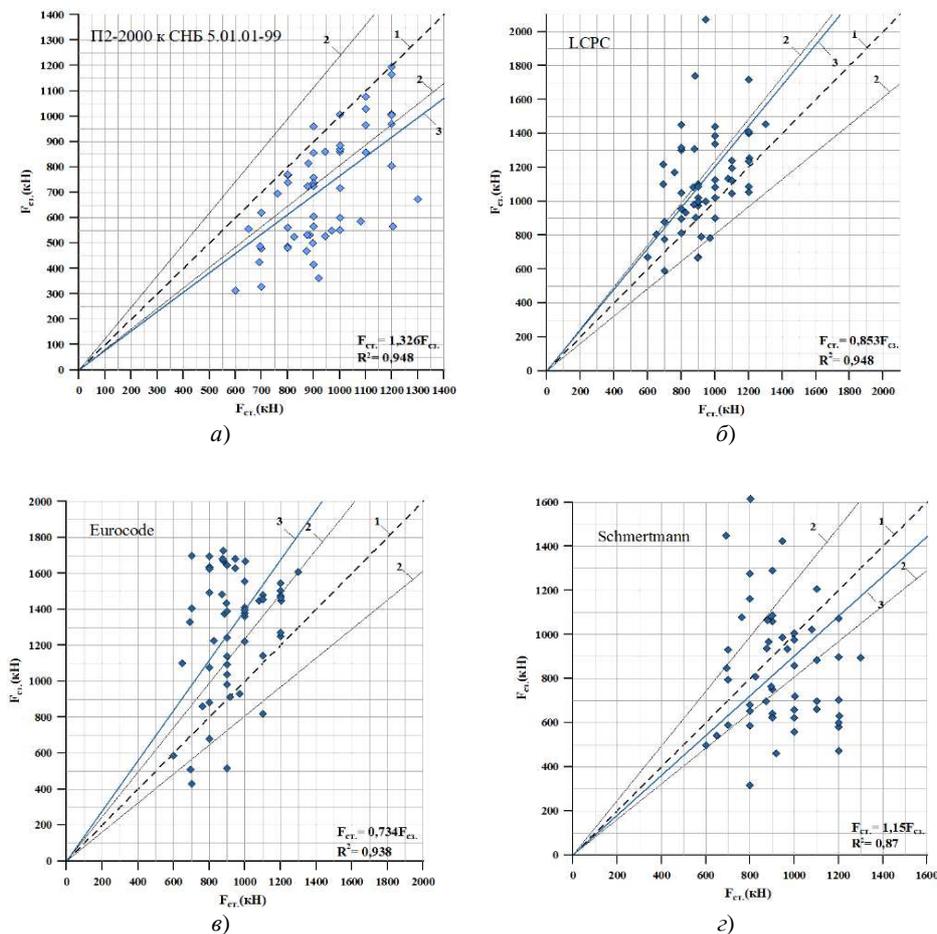


Рис. 2. Отношения, рассчитанные разными методами по данным зондирования (F_{c3}), к определяемым статическими испытаниями (F_{cm}) несущим способностям свай:

1 – линии абсолютной сходимости; 2 – линии отклонений на $\pm 20\%$;

3 – линия, соответствующая заданным критериям, с использованием поправочного коэффициента

Из рисунка 2 видно, что самая оптимальная линия описывается уравнением $F_{cm} = 0,853F_{c3}$ с $R^2 = 0,948$. Этому критерию отвечают методы LCPC, Шмертманна и методы, применяемые в Республике Беларусь (П2-2000 к СНБ 5.01.01-99). Методы Шмертманна и П2-2000 к СНБ 5.01.01-99 имеют тенденцию занижать в среднем на 0,15 % расчетную несущую способность оснований свай по сравнению с фактически измеренной. При этом метод расчета по Еврокоду имеет тенденцию завышать результаты расчета (табл. 4), что нежелательно.

Таблица 4

Параметры статистической обработки
разных методов определения несущих способностей оснований свай (при количестве свай 67)

Методы	Среднее арифметическое(γ)	Стандартное отклонение (s)	Коэффициент вариации (V_6) %	Медиана (Median)	Коэффициент асимметрии (A_3)
Испытания статической нагрузкой	880,54	178,17	20,23	900	0,259
П 2-2000 к СНБ 5.01.01-99	700,89	218,34	31,15	706,5	0,339
LCPC	1106,17	282,94	25,58	1082,4	0,884
Еврокод	1290,88	342,34	26,52	1392,9	-0,903
Шмертманна	843,64	274,66	32,56	801,8	0,672

Рассмотренные наиболее достоверные методы определения несущей способности имеют коэффициент асимметрии меньше 1, что видно из таблицы 5. Это свидетельствует о том, что точки на графиках (см. рис. 2) распределены относительно соответствующих линий симметрично, поэтому при анализе данных нами использованы графики нормального распределения.

Таблица 5

Статистические и вероятностные оценки для разных методов

Методы определения несущей способности	Для оптимальной линии			Геометрические расчеты $F_{расч.} / F_{см.}$			Кумулятивная вероятность $F_{сз} / F_{см.}$			Точность $\pm 20\%$		RI
	$F_{см} / F_{сз}$	R2	R1	s	$V_{\sigma}, \%$	R2	P_{50}	P_{90}	R3	–	R4	
П 2-2000 к СНБ	1,326	0,948	3	0,176	23,60	1	0,78	0,96	3	45,65	2	9
LCPC	0,853	0,948	1	0,297	24,77	2	1,12	1,62	1	47,03	1	5
Еврокод	0,734	0,938	4	0,408	29,09	4	1,35	1,96	4	38,30	3	15
Шмертманна	1,150	0,870	2	0,368	39,31	3	0,84	1,43	2	32,60	4	11

Третий критерий для оценки методов основан на 50 и 90 % кумулятивных вероятностей P_{50} и P_{90} отношений $F_{расч.} / F_{см.}$. Кумулятивные вероятности для разных методов представлены на рисунке 3.

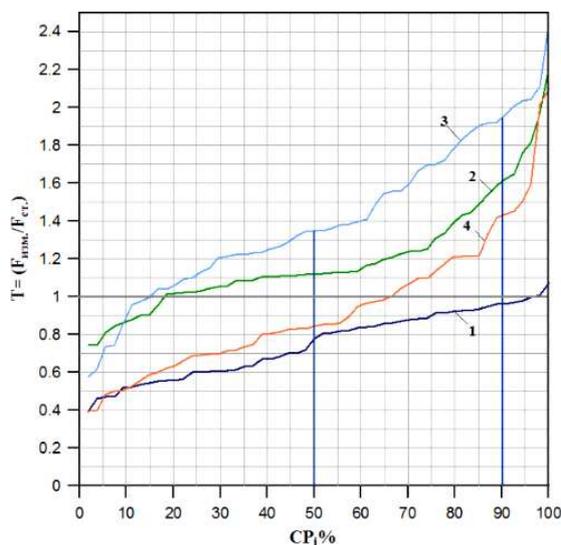


Рис. 3. Функция кумулятивной вероятности (cumulative probability) (CP, %) и отношения между расчётными и измеренными допустимыми нагрузками T ($T = F_{расч.} / F_{см.}$) для разных методов

Величины P_{50} и P_{90} были определены и представлены в таблице 5. Обычно считают лучшими методы при P_{50} ближе к единице и с их низкими значениями в диапазоне $P_{50} \dots P_{90}$.

Основанные на этом критерии методы LCPC при $P_{50} = 1,12$, $P_{90} = 1,62$ и Шмертманна при $P_{50} = 0,84$ и $P_{90} = 1,43$ оказались лучшими.

Четвертый критерий использовали, чтобы оценить эти методы на основе нормального распределения $F_{сз} / F_{см.}$. После определения отношения $F_{расч.} / F_{см.}$, а затем среднего арифметического и стандартного отклонений для каждого метода получали графики их нормального распределения (рис. 4). Эти графики использовали для определения вероятности расчетных допустимых нагрузок с 20-процентной точностью по площади, которая находится под кривой нормального распределения в пределах заданной точности (20 %). Вероятности в пределах 20-процентной точности соответствуют несущим способностям оснований свай в пределах $0,8 F_{расч.} < F_{см.} < 1,2 F_{расч.}$.

Общая площадь под каждой кривой на рисунке 4 равна единице. Основываясь на 20-процентной точности, методы определения несущей способности по LCPC и П 2-2000 к СНБ показывают самую высокую вероятность (47,03 и 45,65 %), поэтому оказались наиболее достоверными, в то время как метод Шмертманна показал самые худшие результаты (32,60 %) по отношению к опытным данным при статических испытаниях свай.

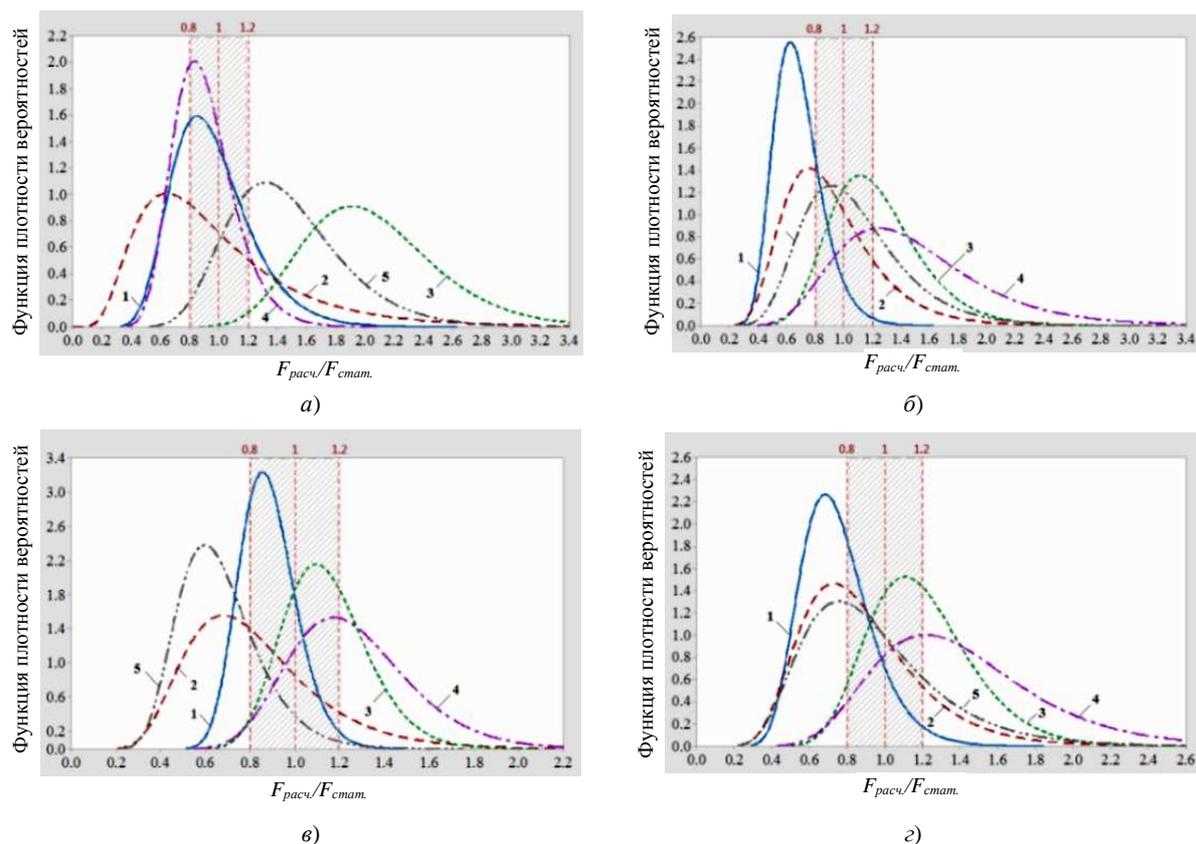


Рис. 4. Нормальное распределение $F_{расч.}/F_{ст.}$ для разных методов:

a – для свай SFA; *б* – для буронабивных свай; *в* – для забивных свай; *г* – обобщенное;

1 – по П 2-2000 к СНБ; 2 – по П 13-19 к СНБ; 3 – по LCPC; 4 – по Еврокоду; 5 – по Шмертманну

Итоговая оценка методов статического зондирования по четырем категориям производилась с использованием рангов (RI). Например, ранг RI для метода Шмертманна определяется суммированием $R1 \dots R4$: ($RI = R1 + R2 + R3 + R4 = 7$). Величины RI для всех методов представлены в таблице 5. В итоге при сравнении RI у всех методов оказалось, что лучшим из них является метод по LCPC ($RI = 5$), а по П 2-2000 к СНБ занимает второе место ($RI = 9$).

Выводы

1. Основываясь на зарубежных методах определения несущей способности свай по результатам статического зондирования и их сравнении с методом, применяемым в Республике Беларусь, путем учета влияния активной зоны на несущую способность свай, можно констатировать, что применяемый в Беларуси метод в целом дает хорошие результаты.

2. Фактические несущие способности оснований свай превышают в среднем в 1,33 раза расчетную несущую способность по П2-2000 к СНБ 5.01.01-99 и при статистической обработке выходят за пределы $\pm 20\%$ от линии абсолютной сходимости, что требует корректировки этого метода.

3. Несущие способности оснований свай, определяемые по Еврокоду, имеют тенденцию завышать результаты расчета по сравнению с П2-2000 к СНБ 5.01.01-99. Одной из причин этого является недостоверное значение коэффициента α_s , который зависит от вида сваи и грунтовых условий, поэтому требуется его уточнение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Объект № 301/11-02 Строительство многофункционального комплекса по проспекту Победителей в городе Минске; ООО «ТЕКТОНИТ». – Минск, 2012–2013.
2. Eslami, A. The bearing capacity of piles from cone penetration test (CPT) data [Electronic resource] / A. Eslami, B.H. Fellenius // International Symposium on Cone Penetration Testion, CPT '95, Linköping, Sweden, 4–5 Oct. 1995 year; University of Ottawa, 1995. – Mode of access: <http://www.fellenius.net/papers/180%20Toe%20Resistance%20from%20CPT%20analysis.pdf>. – Date of access: 15.02.2014.
3. Miller, A. Use of cone penetration test in pile design / A. Miller // Periodica Polytechnica SEB. Civ. Eng. – 2004. – Vol. 47, № 2. – P. 180–197.

4. Cone and piezocone penetration tests, Annex D [Electronic r source] / Eurocode 7: Geotechnical design DD ENV 1997-2:2000, 2007. – Mode of access: <http://www.law.rsource.org/pub/eur/ibr/en.1997.2.2007.html>. – Date of access: 15.02.2014.
5. Грунты. Методы полевых испытаний сваями: ГОСТ 5686-94. МНТКС. – Минск, 1995. – 36 с.
6. Ершов, А.В. Перспективы развития методов расчета несущей способности свай по данным статического зондирования / А.В. Ершов // Геотехника. – 2011. – № 1. – С. 50–65.
7. Bustamane, M. Pile means of static penetrometer CPT / M. Bustamane, L. Gianeselli // Proceedings of the 2nd European Symposium on penetration testing/ ESOPTII. – Amsterdam, 1982. – P. 493–500.
8. Schmertmann, J.H. Guidelines for cone penetration test, performance and design / J.H. Schmertmann // J. of U.S. Department of Transportation. Rep. No. FHWA-TS-78-209. – 1978. – P. 145.
9. Eurocode 7: Geotechnical Design – part 3: Design Assisted by Fieldtesting; 1997-2; 2007 (E). – P. 118–119.
10. Фундаменты и подземные сооружения, возводимые с использованием струйной технологии. Правила проектирования и устройства: ТКП 45-5.01-45-2006 (02250); Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 33 с.
11. Проектирование забивных и набивных свай по результатам зондирования грунтов: пособие П2-2000 к СНБ 5.01.01-99; Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2001. – 23 с.
12. Никитенко, М.И. Некоторые проблемы свайных фундаментов в геотехнической практике Беларуси / М.И. Никитенко, В.Ю. Журавский // Строительная наука и техника. – Минск, 2008. – № 4(19). – С. 44–51.
13. Проектирование забивных свай: пособие П 4-2000 к СНБ 5.01.01-99; Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2001. – 68 с.
14. Проектирование и устройство буронабивных свай: пособие П 13-01 к СНБ 5.01.01-99; Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2002. – 43 с.
15. Проектирование и устройство буронабивных анкеров и свай: пособие П 18-04 к СНБ 5.01.01-99; Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2005. – 79 с.
16. Проектирование и устройство фундаментов из свай с уплотненным основанием: пособие П 19-04 к СНБ 5.01.01-99; Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 88 с.

Поступила 02.06.2015

**PRELIMINARY EVALUATION OF THE BEARING CAPACITY
OF SINGLE PILES IN SANDY SOILS USING
INTERNATIONAL STANDARDS**

B. MORADI SANI

Presented the foreign methods of evaluation the bearing capacity of piles according to the static cone penetration test on the one of the construction sites in Minsk. The article presents the soil conditions of the object with the properties of soils and experimental dependencies for bored and driven piles tested. Estimated and analyzed reliability of preliminary assessment of bearing capacity of single pile foundations through foreign methods and method applied in the Republic of Belarus for the object.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 666.973.2:666.972.1

ПОВЫШЕНИЕ ВОДОСТОЙКОСТИ ЖИДКОГО СТЕКЛА, ПРИМЕНЯЕМОГО В КАЧЕСТВЕ ВЯЖУЩЕГО ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОСТРОСОЛОМЕННЫХ ПЛИТ

Н.В. ДАВЫДЕНКО; канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты экспериментальных исследований по повышению нерастворимости жидкого стекла с целью обеспечения требуемых физико-механических характеристик теплоизоляционного материала на его основе. В качестве модифицирующих добавок для жидкого стекла предложено использовать гексафторсиликат натрия, известь, гипс, мел. Приведено описание методики определения водостойкости жидкого стекла. Проанализированы данные по испытаниям жидкого стекла с различным содержанием одно- и двухкомпонентных добавок. Рассмотрены химические реакции, происходящие в жидком стекле, модифицированном добавками. С учетом экологических и технологических аспектов производства теплоизоляционных плит установлено, что наиболее целесообразным для обеспечения высокой водостойкости жидкого стекла является использование двухкомпонентных добавок.

Введение. Для теплоизоляционных материалов на основе растительных отходов сельскохозяйственного производства, таких как копра конопли и льна, солома зерновых культур, стебли хлопчатника, наряду с применением акрила, латекса, ПВА и т.д. [1; 2] наиболее перспективно использование жидкого стекла в качестве вяжущего компонента. Жидкое стекло позволяет обеспечить низкую плотность утеплителя, существенно повысить огнезащитные свойства и стойкость к вредному воздействию мелких грызунов. Отсутствие отрицательного влияния жидкого стекла на организм человека дает возможность производить экологически чистый теплоизоляционный материал, не выделяющий вредных химических соединений в процессе эксплуатации.

В Республике Беларусь выпускают в основном натриевые жидкие стекла, в меньших масштабах – калиевые жидкие стекла, литиевые и жидкие стекла на основе четвертичного аммония производятся отдельными партиями по специальным заказам. Преимущественное производство натриевых жидких стекол по сравнению с другими видами жидких стекол объясняется большей доступностью сырья и низкой стоимостью при приемлемом уровне некоторых технических свойств стекла. К недостаткам жидкого стекла как клеящего вещества относится разрушение клеевого слоя во влажной атмосфере. Для устранения данного недостатка в работах [3; 4] в жидкое стекло предлагается вводить тростниковый сахар. Также согласно исследованиям [5; 6] использование таких органических добавок, как крахмал, технические лигносульфонаты, спиртодрожжевая бражка, позволяет повысить водостойкость и прочность склеивания жидкого стекла. В Белорусском государственном технологическом университете разработана технология получения и применения в качестве модифицирующей добавки гексафторсиликата натрия, синтезированного из фторсодержащих сточных вод абсорберов цеха химического полирования стеклоизделий, отличающегося низким содержанием несвязанного оксида кремния [7].

Водостойкость силикатных композиций, как правило, снижается с увеличением концентрации жидкого стекла. Это объясняется тем, что в процессе реакции взаимодействия щелочи с отвердителем большая часть щелочи остается свободной. В результате неравномерного протекания реакции в отдельных условиях образуются высокопрочные конгломераты, придающие системе в целом высокую механическую прочность. При увлажнении эти конгломераты разъединяются, и материал оказывается неводостойким. При высокой вязкости жидкого стекла затрудняется диффузия отвердителя в силикатные массы. Таким образом, для обеспечения водостойкости силикатных композиций необходимо присутствие отвердителя и применение жидкого стекла невысокой плотности [8].

Для получения силикатных масс наибольшей прочности необходимо, чтобы наполнитель состоял из фракций крупных и мелких зерен. При этом образующийся минеральный остов обладает наибольшей плотностью. Прочность силикатных масс также повышается, если зерна наполнителя имеют острые углы и шероховатую поверхность, так как благодаря этому жидкое стекло лучше сцепляет их друг с другом [9]. Данному требованию вполне отвечают растительные отходы сельскохозяйственного производства – рубленая солома зерновых культур и копра льна.

В Полоцком государственном университете разработан теплоизоляционный материал на основе смеси рубленой ржаной соломы и костры льна с применением жидкого стекла в качестве вяжущего [10]. По результатам комплекса исследований и проведенных натурных испытаний зарегистрированы технические условия ТУ ВУ 300220696.060-2011 [11].

Теплоизоляционные плиты в процессе эксплуатации периодически могут находиться в условиях повышенной влажности воздуха или подвергаться увлажнению в результате нарушения сплошности и протечек покрытия кровли или вентилируемых фасадов. Для обеспечения долговечности костросоломенных плит в таких условиях эксплуатации, в первую очередь, необходимо обеспечить водостойкость жидкого стекла как вяжущего материала. Из опытных данных [12; 13] следует, что повышение водостойкости жидкого стекла достигается не только введением добавок, но и значительное влияние на данный показатель оказывает модуль жидкого стекла, а также температура и условия твердения.

Методика эксперимента. Растворимость жидкого стекла определяли методом высушивания с использованием фланелевой ткани. Образцы фланелевой ткани размером 100×100 мм пропитывали вяжущим, высушивали в сушильном шкафу при температуре 80...110 °С. По достижении постоянной массы образцы охлаждали и погружали в емкость с водой с температурой 20 ± 5 °С. Через 2 часа образцы фланели с вяжущим извлекали из емкости. Для удаления излишков воды ткань подвешивали в свободном состоянии на 30 минут. После чего образцы фланели помещали в сушильный шкаф и по достижении постоянной массы ткань взвешивали. Далее образцы вновь погружали в емкость с водой, высушивали и взвешивали. Количество опытов определялось постоянством массы трех последовательно высушенных образцов фланели. Изменение массы образцов выражали в процентах. По величине изменения массы пропитанных образцов фланели до и после вымачивания и высушивания определяли относительный показатель растворимости вяжущего и нерастворимый остаток (водостойкость).

Экспериментальные результаты и их обсуждение. В исследованиях применяли натриевое жидкое стекло с модулем 2,9. Образцы сначала выдерживали в закрытой емкости 6 часов, а затем высушивали при температуре 80...110 °С для обеспечения аналогичных условий сушки костросоломенных блоков на жидком стекле. В таблице приведены результаты водостойкости жидкого стекла, содержащего добавки гексафторсиликата натрия, извести, гипса и мела.

Водостойкость жидкого стекла, содержащего добавки

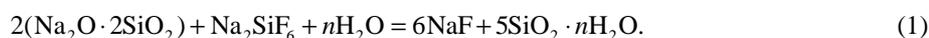
Добавка	Количество добавки, %	Нерастворимый остаток по массе, %, после количества циклов испытаний			
		1	2	3	4
Гексафторсиликат натрия	2	83	76	72	71
	4	87	80	76	76
	6	91	86	83	82
	8	94	90	87	86
	10	96	92	90	89
Известь	2	77	66	61	58
	4	83	73	67	64
	6	86	77	72	69
	8	90	83	78	76
	10	92	86	83	80
Гипс	2	86	76	70	67
	4	89	81	76	74
	6	91	85	81	78
	8	95	90	87	86
	10	96	94	91	90
Мел	2	67	51	43	41
	4	76	60	52	49
	6	81	67	59	56
	8	86	73	65	62
	10	88	77	71	69
Мел + гипс	2	89	83	79	77
	4	91	85	82	80
	6	93	88	86	84
	8	95	92	89	88
	10	97	94	91	90
Известь + гипс	2	91	86	82	81
	4	93	89	86	85
	6	95	92	89	88
	8	97	95	93	92
	10	98	97	96	95

Полученные образцы (см. таблицу) испытывали через 1 сутки после изготовления при полном высушивании. Жидкое стекло без добавок после первого цикла подвергалось значительному растворению, а нерастворимый остаток по массе составлял 24 %. После второго цикла испытаний твердая фаза жидкого стекла незафиксирована.

При введении 2 % гексафторсиликата натрия в жидкое стекло растворимость снижается и после четырех циклов испытаний составляет 29 %. Содержание 6 % гексафторсиликата натрия в жидком стекле приводит к образованию водостойкого остатка, превышающего на 15 % остаток, получаемый при введении 2 % добавки. В этом случае растворимость жидкого стекла уменьшается на 38 %. Введение Na_2SiF_6 в количестве 10 % вызывает повышение нерастворимого остатка на 25 % по сравнению с минимальной дозировкой гексафторсиликата натрия в жидком стекле.

Введение гексафторсиликата натрия, особенно при дозировке 8...10 %, вызывает увеличение вязкости через 30...35 минут с последующим достаточно быстрым твердением жидкого стекла. Следует также отметить достаточно низкую растворяемость гексафторсиликата натрия как в воде, так и в жидком стекле. В результате имеет место равномерное распределение частиц Na_2SiF_6 в массиве жидкого стекла.

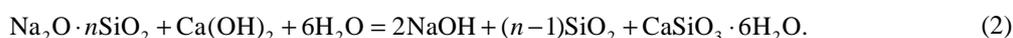
Таким образом, можно предположить, что при взаимодействии жидкого стекла с гексафторсиликатом натрия реакция происходит по уравнению [14]:



Согласно реакции в результате взаимодействия гексафторсиликата натрия и жидкого стекла образуются конечные продукты реакции в виде NaF и SiO_2 .

Добавка извести в количестве 2 % приводит к образованию небольшого водостойкого остатка при растворимости, равной 42 % по массе. Присутствие извести в количестве 6 % приводит к возрастанию водостойкого остатка жидкого стекла на 19 % по сравнению с остатком, содержащим 2 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Растворимость жидкого стекла при содержании 10 % извести в 2,1 раза ниже, чем при введении 2 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а нерастворимый остаток увеличивается на 38 %.

При дозировке $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в количестве 6...10 % через 40...60 минут наблюдается начало повышения вязкости жидкого стекла с дальнейшим ускорением твердения, что, вероятно, является результатом химической реакции, происходящей по уравнению [15]:



Как видно из приведенного уравнения, в результате взаимодействия жидкого стекла и гидроксида кальция образуется гидросиликат кальция.

При введении 6 % CaSO_4 в жидкое стекло нерастворимый остаток возрастает на 16 % относительно остатка с добавкой 2 % гипса. Увеличение водостойкого остатка по массе на 34 % по сравнению с образцами, содержащими минимальное количество добавки, обеспечивается при дозировке гипса в количестве 10 %.

Содержание гипса в количестве 2...4 % практически не влияет на повышение вязкости жидкого стекла в период времени изготовления образцов. При повышении дозировки гипса до 8...10 % уже через 10...15 минут после введения гипса происходит быстрое повышение вязкости с дальнейшим переходом в гелеобразную массу. С гипсом процесс схватывания и твердения жидкого стекла протекает значительно быстрее, что объясняется гидратацией CaSO_4 и, следовательно, обезвоживанием щелочного силиката [6]. Данные химические процессы протекают по следующим уравнениям:



Максимальная дозировка мела, составляющая 10 %, позволяет уменьшить растворимость жидкого стекла на 47 % по сравнению с минимальным процентом вводимого вещества и увеличить нерастворимый остаток на 68 %. При содержании 6 % мела водостойкий остаток оказывается на 37 % больше остатка, образуемого при введении 2 % добавки.

При дозировке мела от 2 до 10 % от массы жидкого стекла не отмечается быстрых изменений вязкости, как в случаях с вышерассмотренными добавками. При замешивании жидкого стекла с тонко-

измельченным порошком мела образуется пастообразная масса, которая, находясь на воздухе, постепенно превращается в твердый монолитный камень [12] по следующему химическому уравнению:



Таким образом, твердение смеси жидкого стекла с углекислым кальцием объясняется образованием силиката кальция и выделением коллоидного кремнезема.

С введением 2 % двухкомпонентной добавки мела и гипса при соотношении компонентов 1:1 уменьшается растворимость жидкого стекла до 23 %. Присутствие двухкомпонентной добавки мела и гипса в количестве 6 % приводит к незначительному возрастанию нерастворимого остатка по массе на 9 % по сравнению с получаемым остатком при введении 2 % добавки в жидкое стекло. Содержание максимального количества добавки $\text{CaCO}_3 + \text{CaSO}_4$ в жидком стекле увеличивает водостойкий остаток на 17 % относительно остатка, образуемого при минимальной дозировке мела и гипса, а растворимость жидкого стекла уменьшается в 2,3 раза.

В процессе перемешивания жидкого стекла с двухкомпонентными добавками сначала вводили мел или известь, а затем гипс. Следует отметить, что при использовании двухкомпонентной добавки извести и гипса при соотношении компонентов 1:1 уже в количестве 2 % происходит образование значительного количества водостойкого остатка при снижении растворимости до 19 %. При содержании двухкомпонентной добавки извести и гипса в количестве 6 % растворимость жидкого стекла снижается на 37 % по сравнению с минимальным количеством вводимой добавки. Введение 10 % $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4$ приводит к формированию нерастворимого остатка, на 17 % превышающего по массе остаток жидкого стекла, образующегося в присутствии 2 % извести и гипса.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют, что наиболее эффективными добавками для получения водостойкого жидкого стекла с модулем 2,9 являются гексафторсиликат натрия, гипс, двухкомпонентные добавки извести и гипса, а также мела и гипса. Оптимальное количество вводимых добавок составляет 8...10 %. При таких дозировках растворимость жидкого стекла с добавкой Na_2SiF_6 составляет не более 14 % с образованием водостойкого остатка в количестве 86...89 %. Введение гипса позволяет получить водостойкий остаток, равный 86...90 % по массе. Двухкомпонентная добавка гипса и мела повышает водостойкость жидкого стекла до 88...90 %, а добавка извести и гипса – до 92...95 %.

Однако при выборе добавки следует учитывать, что количество вводимого гексафторсиликата натрия исходя из санитарных норм и экологической безопасности [7] ограничено и составляет не более 10 % от массы жидкого стекла по сухому веществу. Применение в качестве добавки одного только гипса с учетом быстрого вступления в химическую реакцию и, как результат, перехода жидкого стекла в гелеобразное состояние делает технологически невыполнимым равномерное распределение вяжущего по всему объему костросоломенной смеси на этапе перемешивания. Таким образом, исходя из показателя водостойкости для жидкого стекла с модулем 2,9 наиболее целесообразным является применение двухкомпонентных добавок $\text{CaCO}_3 + \text{CaSO}_4$ и $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмова, В.М. Исследование и разработка технологии изготовления плит из стеблей хлопчатника: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.М. Курдюмова. – Л., 1981. – 21 с.
2. Смирнова, О.Е. Теплоизоляционные материалы на основе костры льна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / О.Е. Смирнова; Новосибирский гос. архит.-строит. ун-т. – Новосибирск, 2007. – 18 с.
3. О влиянии некоторых технологических параметров приготовления жидкостекольных целлюлозосодержащих композиций на водостойкость / В.В. Лисовский [и др.] // Пластические массы. – 1997. – № 4. – С. 23–25.
4. Friedeman, W. // Glasstechn. Ber. – 1985. – Vol. 58, № 11. – P. 315–319.
5. Способ корректирования состава древесно-минеральной смеси: а. с. 1571023 СССР, МКИ C04 B18/24 / А.С. Щербаков, Л.В. Гольцова; опубл. // Открытия. Изобрет. – 1990. – № 22.
6. Арбузов, В.В. Композиционные материалы из лигнинных веществ / В.В. Арбузов. – М.: Экология, 1991. – 208 с.
7. Дубовская, Л.Ю. Разработка композиционного материала целевого назначения на основе мягких отходов деревообработки и модифицированного жидкого стекла: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / Л.Ю. Дубовская; Белорус. гос. технолог. ун-т. – Минск, 2008. – 19 с.

8. Власенко, П.И. Минеральное связующее для отделочных материалов по древесине / П.И. Власенко, В.М. Кулик // Деревообработка. – 1989. – № 12. – С. 6–23.
9. Шульце, В. Растворы и бетоны на цементных вяжущих / В. Шульце, В. Тишер, В. Эттель. – М.: Стройиздат, 1990. – 240 с.
10. Сырьевая смесь для получения теплоизоляционного материала: пат. 14140 Респ. Беларусь, МПК(2009) С 04В 28/00, С 08В 18/04 / А.А. Бакатович, Н.В. Давыденко; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 20091414; заявл. 10.05.2009; опубл. 30.04.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 90.
11. Плиты костросоломенные строительные теплоизоляционные. Технические условия ТУ ВУ 300220696.060-2011. – Введено 12.03.2012. – 2011. – 12 с.
12. Бабушкина, М.И. Жидкое стекло в строительстве / М.И. Бабушкина. – Кишинев: Изд-во «КАРТЯ МОЛДОВЕНЯСКЭ», 1971. – 215 с.
13. Жилин, А.И. Растворимое стекло, его свойства, получение, применение / А.И. Жилин. – М.: Гос. объединенное науч.-техн. изд-во, 1939. – 96 с.
14. Глуховский, В.Д. Грунтосиликаты / В.Д. Глуховский. – Киев: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре УССР, 1959. – 127 с.
15. Разработать и внедрить ускоритель твердения из кубовых остатков производства малеинового ангидрида для жидкостекольных композиций: отчет о НИР (заключ.) / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по защите металлов от коррозии; рук. А.А. Козлов; исполн.: Н.И. Пучков, А.И. Балабанов. – ВНИИЦентр., 1985. – 52 с. – № ГР 01850059573. – Инв. № 02870039881.

Поступила 04.06.2015

**IMPROVEMENT OF WATER-RESISTING PROPERTIES OF LIQUID GLASS
APPLIED AS A BINDING AGENT FOR HEAT-INSULATING
STRAW-BOOM PLATES MANUFACTURING**

N. DAVYDENKO, A. BAKATOVICH

The article provides the results of experimental studies of improvement of liquid glass insolubility to provide a heat-insulating material with required physical and mechanical properties on its basis. Sodium fluorosilicate, lime, gypsum, chalk are to be used as modifying agents for liquid glass. A method of water-resisting properties of liquid glass testing is described in the article as well. Test results of liquid glass with different rate of single- and two-component additives are analyzed. Chemical reactions in liquid glass with modified agents are studied. It is found out that two-component additives provide liquid glass with high water-resisting properties better. Ecological and technological aspects of heat-insulating slabs manufacturing have been taken into account.

УДК 691.316

**EXPERIMENTAL STUDIES OF ECOLOGICALLY-CLEAN THERMAL INSULATION
NON-AUTOCLAVE COMPOSITES BASED ON FLAX SHIVE
AND DIFFERENT KINDS OF LIME CONTAINING BINDERS**

V. TUR, A. PIKULA
(Brest State Technical University)

The main object of the this paper is to study the effect of the mix proportions with flax shive as filling agent in composite system on selected physico-mechanical properties of the light weight composites in influence of new kind of lime-silica binder. The article presents eco-friendly composite thermal insulation materials designed as an alternative to traditional cement-lime binders. When adapted to local raw material resources of a particular region the structural materials can prove to be a promising material for eco-friendly timber frame housing construction in the Republic of Belarus, which is to some extent a revival of the millennial experience in the use of crop waste when constructing low-rise buildings.

Introduction

The phenomenon of global warming and its impact on the environment has called attention to the use of more environmentally friendly processes and the use of agriculture waste as a biomass resource to ensure environmental, social and economical sustainability [2]. Flax shive (hurds) are considered the waste product remaining after cellulose fiber removal from flax straw.

As was shown in [2; 3] the yield of shives is 2,5 tons for every one ton of fiber produced.

The large amount of agri-based biomass produced highlights the need for positioning a material conventionally deemed a waste product of agricultural production as a co-product [3].

As was shown in [3] sustainable development can only be possible when constructions uses renewable natural materials or materials recycled from constructions wastes. Natural materials such as hemp, flax and sisal have been identified as attractive raw materials for lightweight composite manufacturing in many areas of the world. They are cheap, abundant, renewable, non-structural element and have good specific properties due to their low densities. This vegetable material has also low environmental impact.

Natural fibres such as hemp, flax (linen) and sisal have been identified as attractive candidates for the composites production.

Trend in modern research and development of environmental friendly composite materials are focused on "green approach" what is connected with moving from the limited and non-renewable finite material to easily renewable raw materials are materials of plant origin. The use of natural fibers as well as waste from processing of plants as reinforcement of composite materials is one of the most important targets in recent materials research [3; 4].

In context of challenging environmental and a global energy crisis, bio-based materials are attracting increasing levels of research interest, from both academia and industry, because of their numerous advantages: renewable resource usage, low cost, biodegradability, and so on.

As shown in [4] the properties of flax, hemp fiber depend on the chemical composition. The flax fibers contain more amount of cellulose compared to the hurds (shives). Contrary, content of hemicellulose and lignin as a lignin substances are higher in hurds (shive) [1] (table 1).

Table 1

Chemical composition of flax [1]

Component	Flax, [%]	
	fiber	shive (hurds)
Cellulose	65,0	44,2
Hemicellulose	16,0	30,3
Pectin	3,0	
Lignin	2,5	24,4
Proteins	3,0 (proteins only)	
Fats and waxes	1,5	
Ash (minerals)	1,0	
Water	8	

As was noted in [2] only 5 % of flax shive (hurds) is used to preparation of building materials, mainly in production of thermal insulation composites do to their porous structure. For recent thermal insulation materials is used fibrous part of flax stem. Building industry is focussing on the fibers and hurds that originate in the stem of the plant.

While individual products vary in the choice of source material, natural fibre insulation is commonly divided from co-products of other processes, and hence generally has a low environmental impact [3; 4].

Natural fibre insulation is typically processed to form rigid of semi-rigid rolls or loose insulation materials (table 2) for a variety of uses in construction. Typically, natural fibre insulation has to be treated with a fire retardant, often ammonium salt or sodium borax, although the latter may be phased out by forthcoming European legislation. Non-toxic salts are usually added as a evolution to ensure good dispersial.

Table 2

Properties of natural fibre insulation materials [1]

Material	Typical thermal conductivity, [w/mK]	Commonly available format
Natural Wood fibre	0,038...0,050	Boards, semi-rigid boards and batts
Paper (cellulose)	0,035...0,040	Loose batts, semi-rigid batts
Hemp	0,038...0,040	Semi-rigid slabs, batts
Wool	0,038...0,040	Semi-rigid boards, rolls
Flax(linen)	0,038...0,040	Semi-rigid boards, rolls
Cork	0,038...0,070	Boards, granulated

The lightweight composites were developed by using only hemp and flax fibers. The most of the researches are currently focused to the use of the woody core part of the hemp or flax (shives or hurds) as waste material from flax fiber separation process.

The properties of “biocomposites” depend on chemical composition (table 3) and structure of flax material, matrix properties as well as good adhesion in the flax shives – matrix interface.

Table 3

Properties of natural fiber [1]

Fiber	Density, [kg/m ³]	Elongation, [%]	Tensile strength, [MPa]	Young's modulus [GPa]
Cotton	1,5...1,6	7,0...8,0	287...597	5,5...12,6
Jute	1,3	1,5...1,8	393...773	26,5
Flax	–	2,7...3,2	345...1035	27,6
Hemp	–	1,6	690	–
Sisal	1,5	2,0...2,5	511...635	9,4...22,0
E-glass	2,5	2,5	2000...3500	70,0

The object of this work is study the effect of the mix compositions with flax shive (hurds) as filling agent in composites system on selected physico-mechanical properties of the lightweight composites in influence of new kind of lime-silica binder.

The results of measured parameters (density, compressive strength, thermal conductivity coefficient, shrinkage strains) of developed composites are presented in dependence on a hardening time.

1. The methodology of the research

1.1 The main criteria for the selection of mineral binders compositions and organic fiber fillers of plant origin

The aim of the conducted researches was to obtain composite materials that meet the following criteria:

- 1) ecological compatibility;
- 2) development of strength under natural conditions;
- 3) possibility of high repeatability during construction in local conditions without the using of specific, less-common equipment;
- 4) use of renewable and (or) the available components of the mixture;
- 5) minimal negative environmental impact of the entire lifecycle (LCA according to DIN ISO 14040 [5]) of the obtained material in comparison with traditional materials (with a high content of cement or autoclave hardening);
- 6) high thermal insulation properties with possibility to obtain R-value of enclosure structure up to 50 sm thick which is equal to 3,2 m²C/W (according to the requirements of technical code of common practice 45-2.04-43-2006 [6]);

- 7) using of the materials with low possibility of an alternative using or industrial wastes in the compositions;
- 8) durability;
- 9) active hydroregulation;
- 10) fire safety corresponding to regional standards;
- 11) satisfactory sound insulation and acoustic comfort;
- 12) frost-resistance;
- 13) suitable technological properties: adhesion, workability, etc.;
- 14) no less than 1,5 times smaller payback period in local conditions compared to traditional materials.

Chemical production waste, slags, ashes, non-technological clays, associated rocks, waste of glass processing, waste of metals and alloys machining, waste of ceramic industry, waste of silicate manufacturing are the most promising materials in terms of the possibility of their use in the building composite materials. The use of these materials in construction can be carried out in two directions:

1) *passive* (waste utilization, change in physical properties with very little impact on the chemical processes of hardening);

2) *active* (participating in chemical processes as a reactive component or a binder with a significant change in the physico-mechanical properties, imparting special properties).

The first direction allows to use at least half of the capacity of materials or resources invested in them in very rare cases, therefore the principal modern direction is just using them as active ingredients, such as binders.

In this paper sludge of water cleaning generated during grinding and polishing the glass on one of the local businesses was used according to the active scheme. Cement binders were used in minimally required amount in certain compositions for the primary fixing of the structure and shrinkage decrease during hardening.

Organic fibrous fillers of plant origin (flax shive, rye straw, wheat straw) were used according to the passive scheme.

Flax shive is practically unusable waste of flax fiber production with a low possibility of an alternative use (only as fuel).

Produced part of straw is directly chopped in the fields and scattered as an organic fertilizer. Most of the straw in rolls or bales is delivered to the farms from the fields, where it is stored in haystacks and further used for the cattle feeding or as a bedding. In practice, due to the high volume of production, up to 30...45 % of the straw is not used and it rots in haystacks in the open fields or in the territories of livestock complexes. In practice up to 30...45 % of the straw is not used and it rots in haystacks in the open fields or in the territories of livestock complexes. This is due to the high volume of production. Such storage leads to rotting of a straw and its germination after the winter season. As a result a significant portion of the straw becomes unfit for use and it can not be used.

1.2 Experimental program

Based on results of previous study experimental optimal compositions was selected and program was developed (table 4).

Table 4

Designation and general description thermal insulating and structural composites (own research)

Sample	Kind of composite	Approximate composition	The expected dry density in the wall structure, ρ [kg/m ³]
FRA-1ALS	Fiber reinforced thermal insulating composite with organic fibrous fillers of plant origin and blended lime – aluma – silica binder	Hydraulic lime, non-hudraulic (unslaked) lime, metakaolin or clay suspension, Ca-, Si-containing water treatment wastes (fine or crushed quartz sand), flax shive, straw, mineralizer, alkali	550...1000
FRA-2LS	Fiber reinforced thermal insulating composite with organic fibrous fillers of plant origin and blended lime- silica binder	Hydraulic lime, non-hudraulic (unslaked) lime, Ca-, Si-containing water treatment wastes (fine or crushed quartz sand), flax shive, straw, mineralizer	550...1000
FRA-3CLS	Fiber reinforced non-autoclaved composite with blended cement-lime-silica binder and organic filler of plant origin	Hydraulic lime, non-hudraulic (unslaked) lime, metakaolin or clay suspension, cement CEMI-42.5R, Ca-, Si-containing water treatment wastes (fine or crushed quartz sand) flax shive, straw, mineralizer, gazifier	350...550
FRA-4LS	Fiber reinforced non-autoclaved composite with lime- silica binder and organic filler of plant origin	Hydraulic lime, non-hudraulic (unslaked) lime, Ca-, Si-containing water treatment wastes (fine or crushed quartz sand) flax shive, straw, mineralizer, gazifier	350...550

Three kind of thermal insulation and construction material for external wall was investigated. As shown in table 4 all type of experimental specimen includes composite materials with a predominant content of lime, flax shive and active fillers (two types M and G) that meet the criteria listed in paragraph introduction, at the stage of review and previous preparation of experimental studies. Designation of prepared composites based on various composition and proportions of components is shown in table 4, 5.

The next kind of binders was used in experimental research: lime-alumina-silica binder, lime-silica binder and lime-cement-silica binder.

Table 5

Approximate composition of thermal insulating and structural composites in own research

N	Sample	Component								
		hydraulic lime	non-hydraulic (unslaked) lime	metakaolin or clay suspension	quartz sand	flax shive, straw	mineralizer	alkali	gazifier	cement
1	FRA-1ALS	+	+	+	+	+	+	+	-	-
2	FRA-2LS	+	+	-	+	+	+	-	-	-
3	FRA-3CLS	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	FRA-4LS	+	+	-	+	+	+	-	+	-

Samples FRA-(1...4)XX

Preparatory operations

Before mixing non-hydraulic lime (quick lime) was slaked by water. Amount of water was corresponded to the lime mass. The straw was cut to 2...7 cm length fractions in straw cutter. Flax shive was preliminarily separated and sifted through vibrating sieve with the mesh up to 5 mm. Flax shive and straw was mixed in the ratio 3:5, washed by the water and soaked in 30 % liquid glass for 2 to 4 hours. Water was changed 3...4 times. Then the mixture was squeezed and packed.

1.3 Research methods

The density, thermal conductivity coefficient, compressive strength and water absorption were measured on composite after 28...40 days of hardened. Density was determined in accordance with standard STB EN 12390-7 and GOST 12730.0, GOST 12730.1. The thermal conductivity coefficient of composite samples, as one of the main parameters of heat transport was measured by the device ISOMET 104 in accordance with Standard of the Republic of Belarus STB 1618.

Compressive strength of all initial materials (binders) and composites was determined using the testing machine CONTROLS (Italy) in accordance with National Standards GOST 10180, GOST 310.1, GOST 310.4.

Water absorption was specified in accordance with standard STB EN 12087/A1. Compressive strength of the all composites was tested on standard cube specimens 100×100×100 mm. Compressive and flexural (bending) strength of binder materials was tested on standard beam specimens 40×40×160 mm.

Dry density of the all composite materials was tested using the specimens of regular geometric shape in accordance with national standards.

Shrinkage strain of the all composite material was calculated from the measurement results of beam specimen tests 40×40×160 mm and 50×50×200 mm in accordance with Standard of the Republic of Belarus STB 1570. Standard beam specimens (40×40×160 mm and 50×50×200 mm) and standard cube (100×100×100 mm) were made in steel molds which were covered with film immediately after remolding to prevent drying.

Possible variability intervals of the components' mass ratio were not preset and were chosen anew after each experiment. The optimal value was determined by the parallel production of at least 2 series (no more than 6 specimens in each) of prototypes under the same conditions.

Composite materials' composition (table 4) was optimized through conducting the experiment with mean values of variable parameters. For this purpose two parameters were changed simultaneously compared to the initial composition.

For each of the following materials were made at least two optimization cycles.

2. Results and brief discussion

Selected properties of hardened composite materials based on flax shive with various compositions of mixes were compared.

In table 6, density, thermal conductivity coefficient, shrinkage strains and compressive strength of 28 days hardened composites are given.

According to the measurements, dry density values of composites were in range of 375...770 kg/m³.

The obtained composite FRA-1ALS is characterized by high density and thus the highest value of thermal conductivity coefficient among all the composites, which can be up to 0.21 W/m°C under operating conditions B

of Technical Code of Common Practice TCP 45-2.04-43-2006 [6]. However the given composite is also characterized by the highest compression strength $f_{c,28}$ which means that this construction material can bear complementary loading in addition to its own weight. The shrinkage strains of given composite FRA-1ALS was the lowest among all composites.



Fig. 1. Samples of lime-silicate heat insulating fiber-reinforced concrete with organic fiber fillers of vegetable origin



Fig. 2. Surface samples from the lime-silicate heat insulating fiber-reinforced concrete with a density of 800...900 kg/m³



Fig. 3. Surface samples from the lime-silicate heat insulating fiber-reinforced concrete with a density of 600...700 kg/m³

Table 6

Result of experimental studies of thermal and nonstructural wall composites

N	Sample seria	Density, ρ [kg/m ³]	Thermal conductivity coefficient in dry state, λ W/m ² °C	Compressive strength, $f_{c,28}$ N/mm ²	Shrinkage strain [mm/m] binder/composite	Thickness of the wall, d_N for $R = 3,2$ m ² C/W, [mm]	Approximate mass for insulation of 1 m ² of the wall, kg
1	FRA-1ALS	770	0.21	1.2...2.2	3/7.0	640	490
2	FRA-2LS	650	0.15	0.5...0.8	4/8.0	480	312
3	FRA-3CLS	375	0.10	0.3...0.6	3/9.0	320	120
4	FRA-4LS	435	0.11	0.15...0.4	4/14.0	355	155

Notes: 1. Range for the tested specimen in sample seria.
2. Value d_N without additional thermal insulation.

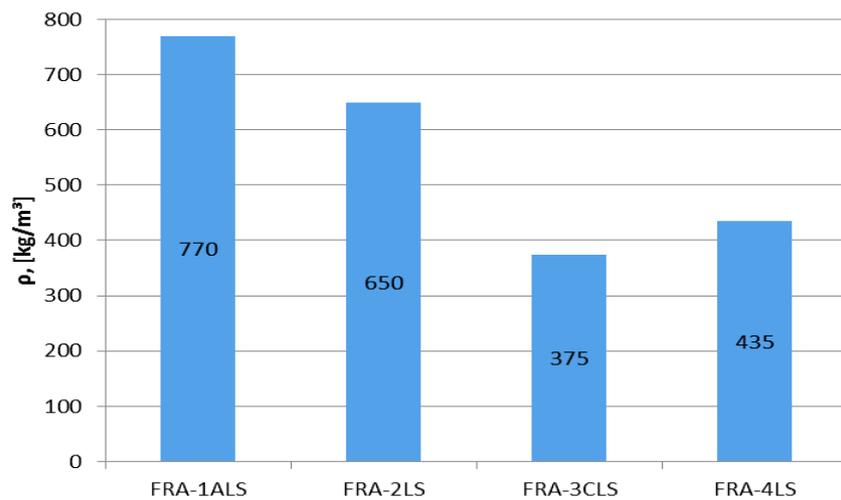


Fig. 4. Density of composites in dry conditions

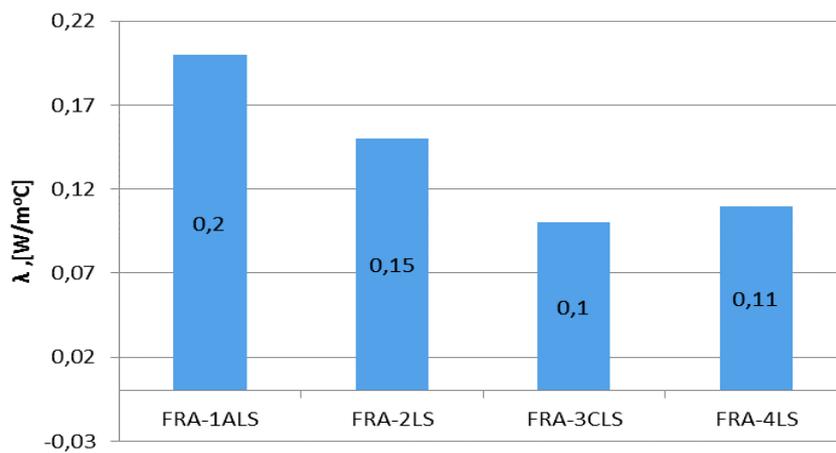
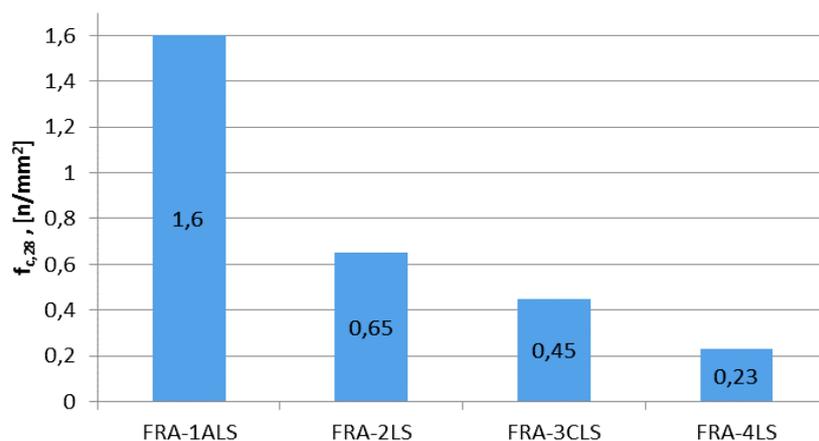
Fig. 5. Values of the thermal conductivity coefficient λ 

Fig. 6. Compressive strength at 28 days

According to requirements of Technical Code of Common Practice TCP 45-2.04-43-2006 [6] the thickness of the wall d_N , necessary for the required thermal resistance can reach 480...640 mm, which is not an acceptable result for criteria. However, this composition can be used in sandwich constructions with a separate external thermal-insulating layer increasing the temperature resistance of premises due to the its own greater heat capacity.

The composites FRA-3CLS, FRA-4LS are characterized by low density and thus low thermal conductivity coefficient, which can be up to 0,10 W/m°C. Herewith composite with this which makes it only a heat-insulating composite material, which can bear only its own self-weight.

Due to use of the Portland cement this composite material shrinkage strains and shorter strength development time compared to the composite FRA-1L (table 6). According to Technical Code of Common Practice TCP 45-2.04-43-2006 [6] the thickness of the external wall d_N necessary for the required thermal resistance can reach 320...360 mm, which is an acceptable result for the criteria.

3 Recommendations for use the selected thermal and construction composite

The composite FRA-1ALS, FRA-2LS sample is suitable for manufacturing of blocks for load-bearing walls. It is a porous cement-free load-bearing structural and thermal-insulating material.

The composite FRA-3CLS, FRA-4LS are suitable for manufacturing of blocks for non-load-bearing external walls or solid structural element which can be moulded on-site. It is a high-porous thermal insulating material with minimal use of cement. This kind of composite can be used in panels with bearing timber frames.

REFERENCE

1. Eco-efficient construction and building materials / F. Pacheco-Torgal [et al] // Life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case/studies Woodhead Publishing Limited, 2014.
2. Stevulova, N. Lightweight composites containing hemp hurds / N. Stevulova, L. Kidalova, J. Cigasova // Procedia Engineering, 65/2013.
3. Stevulova, N. Influence of binder nature on properties of lightweight composites based on flax / N. Stevulova, L. Kidalova // International journal of Modern Manufacturing Technologies. – 01/2013. – 5(2). – P. 27–31.
4. Stevulova, N. Innovative use of biomass based on Technical hemp in building industry / N. Stevulova, J. Cigasova // Chemical Engineering Transformations. – 2014. – Vol. 37. – P. 685–690.
5. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization: ISO 14040 (2006).
6. Technical Code of Common Practice: TCP 45-2.04-43-2006. Construction thermal engineering. Rules and Regulations for Building Design.

Works were carried out in the framework of the project “Development of technology for the construction of environmentally friendly and energy-efficient homes are filled with composite structures” (registration number – IPBU.02.01.00-06-704/11-00) implemented within the framework of cross-border cooperation “Poland – Belarus – Ukraine 2007-2013”.

In the project participate Educational establishment “Brest State Technical University” (Brest, Belarus) and the Higher State School. Pope John Paul II (of Biala Podlaska, Poland).

Поступила 08.06.2015

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ НЕАВТОКЛАВНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КОСТРЫ ЛЬНА И ИЗВЕСТКОВОГО ВЯЖУЩЕГО

д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР, А.И. ПИКУЛА
(Брестский государственный технический университет)

Исследуется влияние льняной костры как наполнителя в легких композитах на различные физико-механические свойства материалов на основе кальцево-силикатного связующего вещества. Рассматриваются варианты разработанных экологичных составов композитных теплоизоляционных материалов на альтернативных вяжущих в сравнении с традиционными цементно-известковыми. Сделан вывод о том, что представленные варианты после адаптации к местным сырьевым ресурсам конкретного региона могут быть перспективным материалом для экологичного каркасного домостроения в условиях Республики Беларусь, что в определённой степени является возрождением тысячелетнего опыта применения отходов растениеводства при строительстве малоэтажных зданий.

УДК 625.861

АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ И БЛОКИРОВАНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

*А.О. КАЛЫСКА; д-р техн. наук, проф. А.В. БУСЕЛ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Исследуется сульфатная активация электросталеплавильных шлаков Белорусского металлургического завода при использовании сульфата алюминия – отхода химического производства, а также их химический и минералогический состав. Полученные результаты свидетельствуют о возможности активации процессов твердения в строительных смесях на основе данного вида шлаков в качестве основного вяжущего с образованием гидросульфоалюминатов кальция, что дает возможность получать самоотверждающиеся смеси для укрепленных оснований дорожных одежд марок М20-М40. Проведены исследования миграции ионов тяжелых металлов из электросталеплавильных шлаков и самоотверждающихся смесей на их основе в жидкие среды, результаты которых позволяют говорить о блокировке опасных компонентов в затвердевших смесях.

Введение. Известно, что электросталеплавильные шлаки в составе бетонов по ряду причин используются менее активно чем, например, доменные. Основные причины этому следующие: низкая гидравлическая активность, склонность к распаду и существенные колебания химического состава [1].

В настоящее время электросталеплавильные шлаки Белорусского металлургического завода (БМЗ) используются в строительстве в качестве инертных материалов (основания дорожных одежд, наполнитель для асфальтобетона, дренаж и др.) [2]. На БМЗ установлено дробильно-сортировочное оборудование, с помощью которого шлак из отвала перерабатывается в фракционированные смеси, шлаковые щебень и песок. Следует отметить, что мелкая его фракция (0...5 мм) является маловостребованной. Между тем, по нашим данным, она обладает потенциальными вяжущими свойствами.

Исследование сульфатной активации электросталеплавильных шлаков. В НИИЛ бетонов и строительных материалов Белорусского национального технического университета проведены исследования мелкой фракции шлака БМЗ, который хранился в отвале более 2 лет. Свежеобразованный шлак в экспериментах не использовался, так как имеет неустойчивую структуру, для стабилизации которой необходимо выдерживание в отвале не менее года. Массовую долю элементов, входящих в состав шлака БМЗ (табл. 1), определяли рентгеноспектральным методом, используя электронный микроскоп марки «Jeol». Рентгенограмма представлена на рисунке 1.

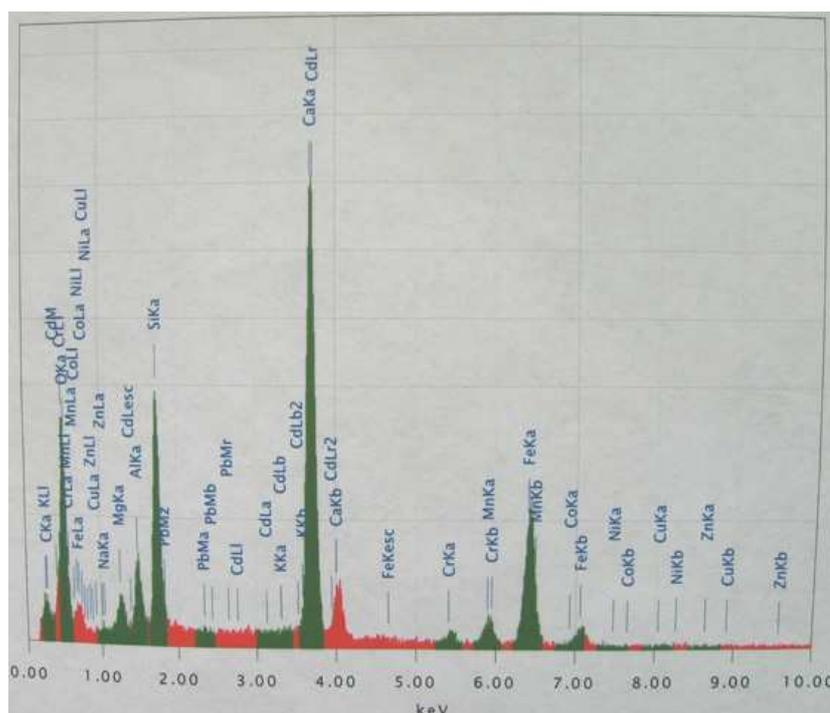


Рис. 1. Рентгенограмма шлака

Анализируя результаты рентгеноспектрального анализа можно сделать вывод, что в шлаке БМЗ содержатся преимущественно следующие элементы (масс. %): кислород – 41,37; кальций – 19,29; железо – 14,58; углерод – 8,01; кремний – 7,41; марганец – 3,19; алюминий – 2,59; магний – 1,42; кадмий – 0,56. Присутствуют в небольших количествах (менее 1 %) также тяжелые металлы: кадмий, цинк, свинец, медь. Полученные нами данные подтверждаются сведениями о составе оксидов в шлаке, полученными в заводской лаборатории БМЗ (табл. 2).

Таблица 1

Элементный состав шлака БМЗ

Элемент	Масс, %	Элемент	Масс, %	Элемент	Масс, %
Углерод (С)	8,01	Калий (К)	–	Никель (Ni)	–
Кислород (О)	41,37	Кальций (Ca)	19,29	Медь (Cu)	0,06
Натрий (Na)	0,16	Хром (Cr)	0,82	Цинк (Zn)	0,33
Магний (Mg)	1,42	Марганец (Mn)	3,19	Кадмий (Cd)	0,56
Алюминий (Al)	2,59	Железо (Fe)	14,58	Свинец (Pb)	0,20
Кремний (Si)	7,41	Кобальт (Co)	–		

Таблица 2

Средний химический состав пробы шлака БМЗ

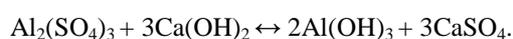
№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Состав оксидов в шлаке</i>										
SiO ₂	19,3	18,2	18,9	19,0	21,2	18,4	20,9	20,0	18,6	18,5
CaO	47,9	48,5	48,2	48,0	46,5	50,5	45,7	47,6	47,3	44,2
MgO	3,6	3,6	3,4	3,6	4,4	4,4	3,5	4,0	3,6	3,4
Al ₂ O ₃	5,4	5,5	5,1	4,5	5,8	7,5	6,2	5,9	5,6	5,3
FeO	18,1	18,2	18,3	18,2	16,4	14,6	17,7	17,1	18,5	22,3
MnO	4,6	4,4	4,7	4,5	4,0	3,5	4,6	4,3	4,6	4,2
P ₂ O ₅	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,7
S	0,17	0,19	0,15	0,18	0,19	0,38	0,18	0,18	0,15	0,6
Cr ₂ O ₃	0,8	0,8	0,9	0,8	0,6	0,6	0,8	0,7	0,8	0,8

Анализ химического состава исследуемого шлака показывает, что он схож с составами цементного клинкера [3], что подтверждает потенциальную возможность получения вяжущего вещества.

Минералогический состав той же пробы шлака исследовали методом рентгенофазового анализа. Запись дифрактограмм проводилась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7. Рентгенофазовый анализ показал, что наиболее сильные дифракционные отражения в рентгеновских спектрах образца шлака принадлежат кварцу SiO₂. Дифракционные максимумы меньшей интенсивности принадлежат: кальциту CaCO₃; магнезиту MgCO₃; энстатиту MgSiO₃; магнетиту Fe₃O₄; фаялиту Fe₂SiO₄; Zn-Fe-шпинели ZnFe₂O₄; форстериту 2MgO·SiO₂; β-ортосиликату кальция β-Ca₂SiO₄ (ларниту); γ-ортосиликату кальция γ-Ca₂SiO₄ (шеннониту); ранкиниту 3CaO·2SiO₂; окерманиту 2CaO·MgO·2SiO₂; монтичеллиту CaO·MgO·SiO₂; мервиниту Ca₃Mg(SiO₄)₂; гелениту 2CaO·Al₂O₃·SiO₂; мелилиту Ca₂(Al, MgSi)Si₂O₇; гиллебрандиту 2CaO·SiO₂·H₂O.

Минералогический анализ пробы не обнаруживает составляющих с высокой гидравлической активностью в нормальных условиях (20 °С при атмосферном давлении). Основной причиной тому, очевидно, можно считать условия охлаждения и хранения шлаков, которые способствуют практически полной кристаллизации его составляющих (медленное остывание и хранение на открытой площадке).

Один из способов химической активации металлургических шлаков – применение сульфатного компонента (сульфатная активация), в результате чего при гидратации могут образовываться минералы с вяжущими свойствами, например этtringит. Известно, что этот минерал может образовываться в присутствии гипса и гидроксида кальция [3]. Гидроксид кальция может появляться в шлаке в результате гашения свободной CaO, присутствующей в свежем шлаке, и неполного перехода его в CaCO₃ при хранении в отвале. При затворении шлака сульфатным активатором (в качестве активатора применяли раствор сульфата алюминия, являющегося побочным продуктом Гомельского химического завода) происходит следующая реакция:



Для проверки высказанного предположения контрольные образцы дробленого шлака (состав 1) затворялись водой, а основные – раствором сульфата алюминия (составы 2...6).

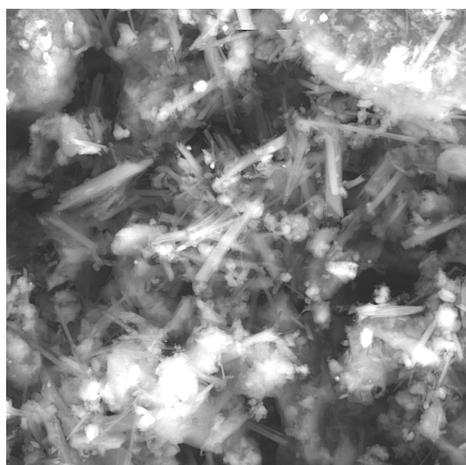
Результаты определения прочности в возрасте 7 суток нормально-влажностного твердения показывают, что происходит набор прочности основных образцов до 3 МПа (табл. 3). Контрольные образцы в этих условиях набирают очень малую прочность. В возрасте 28 суток прочность основных образцов немного увеличилась – до 5 МПа, что может свидетельствовать о том, что интенсивный набор прочности завершается в первые дни после затворения.

Таблица 3

Прочность образцов шлака

№ состава	Количество активатора, % от $m_{\text{шлака}}$	Возраст, сут			
		7	14	21	28
1	0	0,6	1,1	1,2	1,3
2	1,0	2,4	2,5	2,8	2,4
3	1,5	3,3	3,5	3,8	3,1
4	2,0	3,2	3,8	4,0	4,5
5	2,5	3,3	3,8	4,3	5,5
6	3,0	3,2	3,6	4,6	5,5

При работе со смесью шлака с активатором наблюдалось быстрое схватывание смеси, которое, по нашему предположению, может быть результатом образования, в первую очередь, сульфата кальция (гипса) и гелеобразного гидроксида алюминия, связывающих значительное количество воды. Дальнейшее твердение вызвано медленным процессом возникновения гидратных новообразований, в частности гидросульфалюмината кальция.



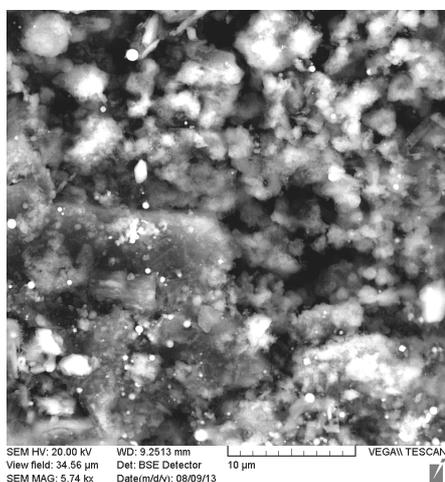
SEM HV: 20.00 kV WD: 6.4522 mm
View field: 34.63 μm Det: BSE Detector
SEM MAG: 5.73 kx Date(m/d/y): 08/09/13

Рис. 2. Шлак, затворенный сульфатным активатором

Оптимальный расход активатора должен обеспечить количество $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в интервале 2,0...2,5 % от массы шлака. Снимки структуры затвердевшего активированного шлака, сделанные при помощи сканирующего электронного микроскопа «Vega II LMU» (Tescan, Чехия) представлены на рисунке 2.

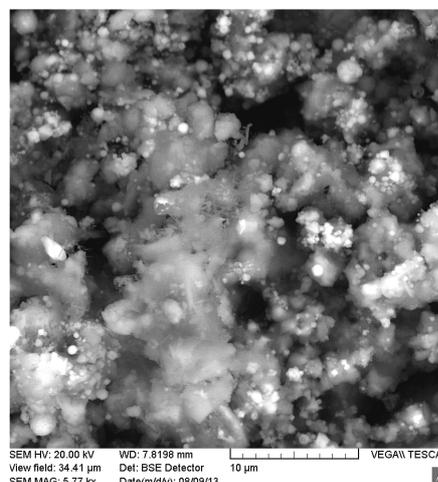
В отличие от исходного шлака (рис. 3) и шлака, затворенного водой (рис. 4), при твердении электросталеплавильного шлака с активатором хорошо видны образования игольчатой структуры, которые пронизывают объем материала по разным направлениям. Такое строение возникает при образовании гидросульфалюмината кальция [3], который вносит положительный вклад в рост прочности материала за счет механического переплетения кристаллов. В этом случае можно говорить об армировании структуры затвердевшего шлака.

На снимках образцов шлака, затворенного водой, такое явление не наблюдается, а появляются только комплексы частиц, связанных рыхлыми новообразованиями (рис. 4).



SEM HV: 20.00 kV WD: 9.2513 mm
View field: 34.56 μm Det: BSE Detector
SEM MAG: 5.74 kx Date(m/d/y): 08/09/13

Рис. 3. Исходный шлак



SEM HV: 20.00 kV WD: 7.8198 mm
View field: 34.41 μm Det: BSE Detector
SEM MAG: 5.77 kx Date(m/d/y): 08/09/13

Рис. 4. Шлак, затворенный водой

Рентгенофазовый анализ затвердевшего активированного шлака показал появление характерных для гидросульфаломината кальция пиков ($d = 9,79; 5,64$) на дифрактограмме (рис. 5).

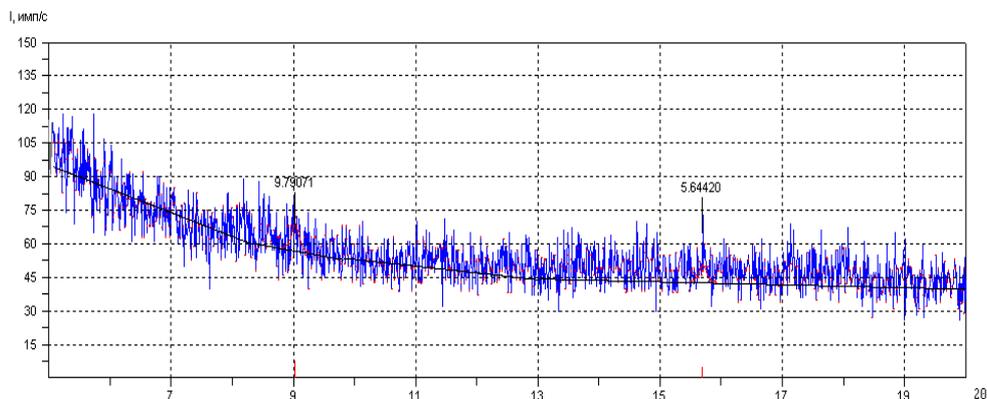


Рис. 5. Дифрактограмма затвердевшего шлака с активатором

По совокупности полученных данных авторы считают перспективной сульфатную активацию электросталеплавильных шлаков БМЗ. При этом возникает реальная возможность получить самоотверждающую шлаковую смесь, которую можно использовать в основаниях дорожных одежд в случаях, где требования допускают марку по прочности укрепленных смесей М20-М40 [4].

В экспериментальных составах самоотверждающихся смесей на основе электросталеплавильных шлаков БМЗ с сульфатным активатором также дополнительно вводился дробленый бетон (переработанные цементобетонные изделия) [5]. При наличии такой возможности это позволяет, среди прочего, повысить количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в смеси, так как в шлаках долгое время хранившихся в отвалах на открытом воздухе, она в основном количестве подвергается карбонизации.

Исследование миграции ионов тяжелых металлов из шлаковых смесей в жидкие среды. Поскольку шлаки содержат ионы тяжелых металлов (см. табл. 1), при их массовом использовании в дорожном строительстве необходим контроль миграции этих загрязнителей в водную среду при выпадении осадков. Содержание тяжелых металлов определяли методом инверсионной вольтамперометрии [6] в водной вытяжке после контакта образцов из затвердевшего шлака, площадь поверхности которых составляла $0,4 \text{ дм}^2$, с дистиллированной водой и водой, подкисленной хлороводородной кислотой (объем 100 см^3), с выдержкой в течение 48 часов. Полученные значения содержания тяжелых металлов для всех исследованных проб водных вытяжек приведены в таблицах 4 и 5. Представленные данные пересчитаны на 1 дм^2 площади поверхности образца.

Таблица 4

Содержание тяжелых металлов в водных вытяжках после контакта дистиллированной воды (рН 5,0) с образцами затвердевшего шлака в течение 48 часов

Образец	Содержание металлов в водной вытяжке, мг/л		
	Zn	Pb	Cu
Шлак БМЗ с активатором	$1,08 \pm 0,03$	$0,047 \pm 0,003$	$1,30 \pm 0,04$
Шлак БМЗ	$1,41 \pm 0,04$	$0,86 \pm 0,02$	$1,43 \pm 0,04$

Таблица 5

Содержание тяжелых металлов в водных вытяжках после контакта дистиллированной воды, подкисленной хлороводородной кислотой (рН 4,0), с образцами шлака в течение 48 часов

Образец	Содержание металлов в водной вытяжке, мг/л		
	Zn	Pb	Cu
Шлак БМЗ с активатором	$0,35 \pm 0,01$	–	$0,49 \pm 0,02$
Шлак БМЗ с водой	$0,42 \pm 0,02$	–	$0,54 \pm 0,02$

Анализируя результаты, представленные в таблицах 4 и 5, можно отметить следующее. Переход цинка и меди из образцов в дистиллированную воду в 2...3 раза больше, чем переход этих металлов в

воду, подкисленную хлороводородной кислотой. По-видимому, кислота расходуется на реакцию взаимодействия с оксидом кальция. Образующийся хлорид кальция закрывает поры образца, что приводит к уменьшению площади контакта с водой, в результате чего уменьшается скорость растворения компонентов. В свою очередь, это снижает содержание тяжелых металлов в водных вытяжках, полученных при использовании воды, подкисленной хлороводородной кислотой, по сравнению с дистиллированной водой. Следует также отметить, что в дистиллированную воду из образцов переходит также свинец (0,047 и 0,86 мг/л), в то время как в воду, подкисленную хлороводородной кислотой, этот металл не мигрирует. Присутствие в образцах активатора, хотя и в небольшой степени, уменьшает миграцию тяжелых металлов как в дистиллированную воду, так и в воду, подкисленную хлороводородной кислотой. Например, из смеси, содержащей шлак БМЗ и активатор, цинк мигрирует в дистиллированную воду в количестве, равном 1,08 мг/л, а из смеси, содержащей только шлак БМЗ, – в количестве 1,41 мг/л, что существенно ниже предельно допустимых концентраций этих металлов в воде хозяйственного назначения.

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- введение в дробленый шлак активатора в виде сульфата алюминия приводит к образованию этtringита, армирующего структуру затвердевшего материала;
- применение сульфатной активации к электросталеплавильным шлакам БМЗ является перспективным способом получения на их основе строительных самоотверждающихся смесей;
- при внедрении в практику таких смесей одновременно со снижением стоимости строительных материалов будет решаться экологическая задача по безопасному использованию крупнотоннажного отхода БМЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворкин, Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности: учеб.-справ. пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 368 с.
2. Костенко, А.К. Оценка эколого-экономической эффективности использования электросталеплавильного металлургического шлака в дорожном строительстве / А.К. Костенко // Вестн. БНТУ. – Минск, 2008. – № 2.
3. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
4. Автомобильные дороги. Основания из материалов, укрепленных неорганическими вяжущими. Правила устройства: ТКП 028-2006. – Введ. 01.01.07. – Минск: Департамент «Белавтодор» М-ва транспорта и коммуникаций, 2007. – 80 с.
5. Бусел, А.В. Применение самоотверждающихся шлаковых смесей для устройства слоев дорожных одежд / А.В. Бусел, А.О. Калыска, А.И. Смыковский // Автомобильные дороги и мосты. – 2011. – № 1. – С. 65–68.
6. Бусел, А.В. Инверсионно-вольтамперометрическое определение миграции тяжелых металлов из шлака металлургического производства / А.В. Бусел, Н.П. Матвейко, А.О. Калыска // Вести Нац. акад. наук Беларуси. Серия химических наук. – 2011. – № 1. – С. 14–17.

Поступила 26.05.2015

ACTIVATION OF SETTING PROCESS OF ELECTROSTEEL-SMELTING SLAGS AND BLOCKING HEAVY-METAL ION

A. KALYSKA, A. BUSEL

Results of researches of sulphatic activation of electrosteel-smelting slags of the belarusian Metallurgical Plant are resulted at use of sulphate of aluminium – a waste of chemical production. The chemical and mineralogical structure of slags is investigated. Results testify to possibility of activation of processes hardening in building mixes on the basis of the given kind of slags as the core knitting with formation calcium hydrosulphoaluminate that gives the chance to receive hardening mixes for the strengthened bases of road clothes of marks M20-M40. Researches of migration of ions of heavy metals from electrosteel-smelting slags and hardening mixes on their basis in the liquid environments which results allow to speak about blocking of dangerous components in the hardened mixes are conducted.

УДК 691:620.1

**АММИАК И ЕГО СОЕДИНЕНИЯ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ:
ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДИК И РЕЗУЛЬТАТЫ
ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО И ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ****К.В. ХАЛЕЦКАЯ; канд. техн. наук, доц. Н.П. ЯЛОВАЯ; Ю.С. ЯЛОВАЯ
(Брестский государственный технический университет)**

Анализируется проблема миграции аммиака в воздух жилых и общественных помещений из железобетонных изделий в процессе эксплуатации. Рассматриваются различные методы определения ионов аммония в водных растворах. Представлены данные потенциометрического и спектрофотометрического определения ионов аммония в добавках в бетоны, а также в самих образцах бетона. Предложена методика подготовки проб к химическому анализу. Показано, что потенциометрический метод может служить основой экспресс-методики для определения содержания аммония. Предполагается, что добавки-модификаторы могут выступать в качестве потенциальных источников эмиссии аммиака из бетона как конечного продукта.

Введение. Строительная промышленность является одним из быстро развивающихся сегментов национальной экономики Республики Беларусь. Только за первый квартал 2015 года в нашей стране было введено в строй 1 568,0 тыс. м² жилья [1].

Широко используемым продуктом строительной промышленности являются бетонные смеси, для улучшения технических характеристик которых вводят различные добавки, в том числе аммонийсодержащие пластифицирующие добавки. Однако в ходе эксплуатации помещений, построенных с использованием бетонных смесей, содержащих в значительных количествах эти добавки, возникают проблемы, связанные с их конверсией в форму аммиака. В результате в воздухе жилых и рабочих помещений наблюдаются повышенные концентрации аммиака, которые делают их непригодными для использования по назначению. Учитывая серьезность проблемы, в Беларуси и других странах существует потребность контроля содержания соединений аммония в бетонных смесях [2; 3].

Актуальность исследований наличия аммиака в бетоне, а также сырьевых материалах его производства, применяемых на территории Республики Беларусь, обуславливается токсическим действием аммиака на организм человека при хроническом отравлении вследствие пребывания в помещениях с эмиссией аммиака в воздух.

Последствия хронического отравления человека аммиаком серьезны. Круглосуточное вдыхание 2 и 5 мг/м³ сопровождается нейтропией, моноцитозом и лимфоцитозом; увеличивается выделение мочевины и аммиака с выдыхаемым воздухом, нарушается кислотно-щелочное равновесие; отмечены явные признаки активации симпатоадреналовой системы – увеличение содержания в крови адреналина и оксикортикостероидов [4].

В водных растворах аммиак находится в виде гидратированных молекул (NH₃·aq) или в виде ионов аммония (NH₄⁺). Твёрдые соли, образованные аммиаком, также содержат в своём составе ионы аммония. В связи с этим становится очевидной необходимость исследования содержания ионов аммония не только в бетонных образцах, но и в химических добавках, регулирующих различные стадии создания материалов: конструирование состава бетонной смеси, замес и транспортировку бетонной смеси, её уплотнение и формование, а также сроки схватывания и твердения.

1 Обзор аналитических методик определения иона аммония NH₄⁺ в водных растворах

В настоящее время существуют различные методики определения ионов аммония в водных растворах [5, с. 166–172; 6, 7]. Данные методики можно условно разделить на три основные группы.

1.1 Титриметрические методы

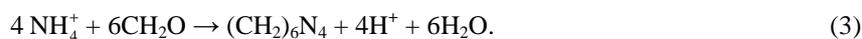
Определение массы аммиака в солях аммония обратным титрованием. К анализируемому раствору соли аммония, например NH₄Cl, добавляют точно известный избыток стандартного раствора натрия гидроксида (титрант 1):



Избыток щелочи оттитровывают стандартным раствором хлороводородной кислоты (титрант 2) в присутствии индикатора метилового оранжевого:



Определение массы аммиака в растворе соли аммония формальдегидным методом (косвенное титрование). При взаимодействии солей аммония с избытком формальдегида в водном растворе образуется гексаметилентетрамин (уротропин) и выделяется эквивалентное количество сильной кислоты:

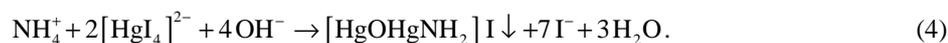


Выделившуюся кислоту (заместитель) титруют стандартным раствором натрия гидроксида с индикатором фенолфталеином в щелочной среде. Объем щелочи, который пошел на титрование кислоты, эквивалентен содержанию аммиака в соли аммония.

Титриметрические методы – одни из методов экспрессного анализа, относительно просты в выполнении, не требуют сложного аппаратного оформления, имеют низкую себестоимость определения. Однако они чувствительны к значению водородного показателя исследуемого раствора. Чувствительность данной группы методов невысока.

1.2 Спектрофотометрические методы

Спектрофотометрическое определение аммиака, основанное на взаимодействии солей аммония с реактивом Несслера (несслеризация). Фотометрическое определение аммиака основано на взаимодействии солей аммония с реактивом Несслера (щелочной раствор соли $\text{K}_2[\text{HgI}_4]$) с образованием оранжево-коричневого соединения в виде коллоидного раствора. Химическая реакция взаимодействия иона аммония со щелочным раствором йодистого меркураммония протекает по уравнению:



При стоянии раствор коагулирует, поэтому сравнение окраски необходимо производить до коагуляции. В то же время нельзя приступать к колориметрическому определению сразу же после добавления реактива Несслера, так как реакция идет не мгновенно. Если содержание аммиака превышает 5 мг/л, выпадает красно-коричневый осадок, определение аммиака не проводится. При меньшей концентрации аммиака получается раствор, окрашенный в различные оттенки – от желтого до светло-коричневого. При содержании аммиака менее 0,05 мг/л окрашивание раствора не происходит.

Ионы магния, кальция и железа, содержащиеся в воде, осаждаются реактивом Несслера и мешают анализу, поэтому перед добавлением реактива Несслера прибавляют раствор сегнетовой соли, которая удерживает в растворе эти ионы. Данная реакция является единственной реакцией на ионы аммония, которая не реагирует на наличие ионов первой группы (калия и натрия).

Метод спектроскопии, основанный на оптическом поглощении (аппаратный, используется в датчиках). Применяется в наиболее чувствительных и селективных датчиках для определения аммония в окружающей среде. Для реализации данного метода используют оптический когерентный генератор и спектрограф. Метод дорогостоящий.

Метод спектроскопии, основанный на дифференциальном оптическом поглощении (аппаратный). Служит для определения концентраций следовых количеств газов (аммиака) путем измерения их узкой полосы частот поглощения в ультрафиолетовом и видимом спектре.

Метод спектроскопии, основанный на оптическом поглощении регулируемым полупроводниковым лазером (аппаратный). Базируется на том, что при сканировании очень узкого диапазона частот в инфракрасной области, где нет мешающей интерференции, поглощение инфракрасного излучения искомым газом (аммиаком) пропорционально его концентрации.

Спектрофотометрические методы позволяют определять содержание в воде не только аммиака, но и других азотсодержащих соединений, например карбамида [8]. Такие методы отличаются точностью определения, они наименее чувствительны к присутствию посторонних ионов. Однако проведение анализа требует сложной и дорогостоящей аппаратуры, а также накладывает требование на квалификацию персонала.

1.3 Потенциометрические методы

Методы, основанные на использовании ионоселективного электрода на аммонии. Аммоний-селективный электрод использует гидрофобную газопроницаемую мембрану для отделения раствора образца от раствора, заполняющего электрод. В любом образце парциальное давление аммиака пропорционально его концентрации. Растворенный аммиак проходит через гидрофобную мембрану ионоселективного электрода. Изменение рН раствора электролита с другой стороны мембраны, вызванное прошедшим газом, улавливается внутренним рН-электродом ионоселективного электрода. Изменение рН пропорционально количеству растворенного аммиака, может быть измерено рН-метром или иономером и приведено к концентрации аммиака. Аппаратура для данного метода должна калиброваться, не дает достаточной точности.

Потенциометрический метод отличается относительной простотой и возможностью определения низких концентраций ионов; стоимость оборудования и реактивов невысока. Более того, при определении ионов можно использовать лабораторные иономеры производства Республики Беларусь (ОАО «Гомельский завод измерительных приборов»). Недостаток метода обусловлен влиянием на результаты определения мешающих ионов. Кроме того, для определения ионов аммония в воде в отдельных случаях можно использовать и другие методы, например метод капельного электрофореза [9, с. 14].

Однако определение ионов аммония как в железобетонных изделиях, так и в добавках в бетоны имеет свою специфику. Во-первых, при анализе образцов бетонов необходимо разработать методику подготовки пробы, предусматривающую извлечение соединений аммония из образца. Во-вторых, и водные вытяжки из бетонов, и добавки представляют собой сложные многокомпонентные системы. Причём состав добавок в бетоны зачастую является коммерческой тайной изготовителя. Это затрудняет оценку влияния посторонних ионов при проведении анализа.

Анализ рассмотренных методов показал целесообразность применения для исследований потенциометрического и спектрофотометрического методов определения иона аммония NH_4^+ в водных растворах.

2 Результаты потенциометрического и фотометрического определения ионов аммония в железобетонных изделиях

2.1 Методика потенциометрического определения иона аммония

Для проведения исследований использовали иономер лабораторный И160-МП (ТУ РБ 14694395.003-97), производства ОАО «Гомельский завод измерительных приборов». В состав электрохимической ячейки (рис. 1) входили:

- электрод ионоселективный «Экон- NH_4 » (ТУ 4215-002-41541647-2006), изготовитель Научно-производственное предприятие «Эконикс» (г. Москва, Российская Федерация);
- электрод хлорсеребряный ЭВЛ-1М3.1 (ТУ 25-05.2181-77), изготовитель ОАО «Гомельский завод измерительных приборов».

Определение водородного показателя (рН) осуществлялось с помощью рН-метра Hanna HI 211, изготовитель Hanna Instruments (Венгрия) с диапазоном измерений от 0,00 до 14,00 рН, с разрешением 0,01 рН и с автоматической термокомпенсацией.

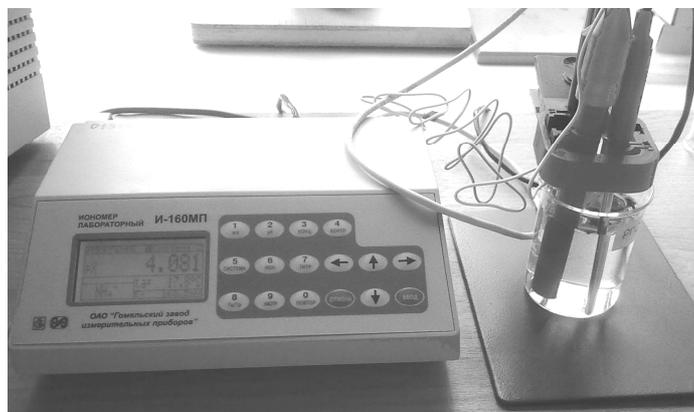


Рис. 1. Электрохимическая ячейка для потенциометрического определения ионов аммония

Градуировку иономера проводили непосредственно перед выполнением измерений в анализируемых растворах. Последовательно измеряли электродвижущую силу (ЭДС) электродной системы (Е, мВ) в градуировочных растворах с известной молярной концентрацией ионов аммония NH_4^+ (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика градуировочных растворов

Раствор	рСм	См, моль/дм ³	См, мг/мл	рН	Температура, °С
РГ5	4,3	$5 \cdot 10^{-5}$	0,00268	5,70	19,1
РГ4	4,0	$1 \cdot 10^{-4}$	0,00535	5,59	19,2
РГ3	3,0	$1 \cdot 10^{-3}$	0,0535	5,64	19,2
РГ2	2,0	$1 \cdot 10^{-2}$	0,535	5,61	19,1
РГ0	1,0	$1 \cdot 10^{-1}$	5,35	5,11	19,2

В стакан вместимостью 100 см³ вносили 45 см³ градуировочного раствора и пипеткой 5 см³ фонового раствора (раствор нитрата натрия с молярной концентрацией 1 моль/дм³), перемешивали, измеряли температуру, погружали в раствор ионоселективный электрод и электрод сравнения, затем измеряли ЭДС электродной системы с помощью иономера. По полученным данным строили калибровочный график зависимости ЭДС электродной системы от отрицательного логарифма молярной концентрации ионов аммония в градуировочных растворах (рис. 2).

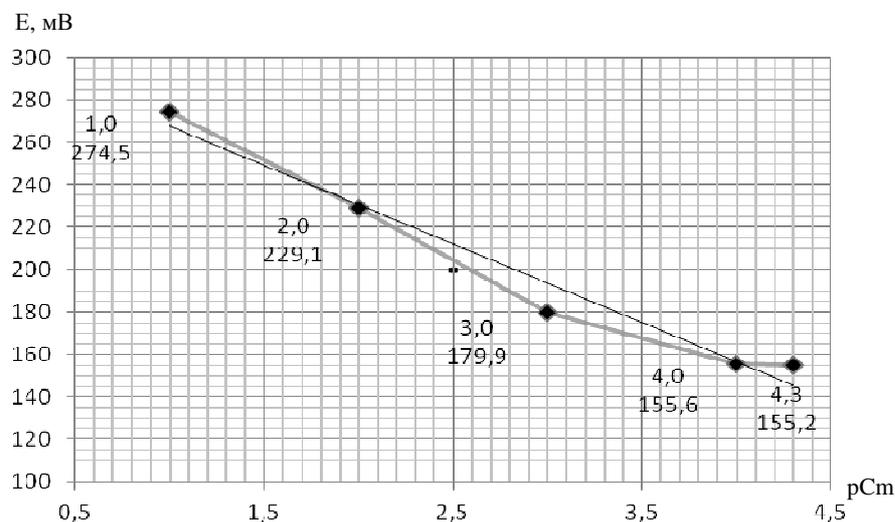


Рис. 2. Калибровочный график для потенциометрического определения

Диапазон выполнения измерений для ионоселективного электрода на ионы аммония составляет: $pH = 3 \dots 8,5$; $pNH_4^+ = 1 \dots 4,3$, что и обуславливает подбор концентраций градуировочных растворов.

2.2 Методика спектрофотометрического определения иона аммония

Для спектрофотометрического определения использовали спектрофотометр ПЭ-5300ВИ (ТУ 9443-001-5627822-2009), изготовитель ООО «Экохим» (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), с однолучевой оптической схемой и спектральным диапазоном 325...1000 нм.

При проведении спектрофотометрических исследований анализируемые растворы и растворы сравнения готовились непосредственно перед определением в затемненной посуде с использованием искусственного освещения. Исследование проводилось при длине волны 410 нм при толщине пропускающего свет слоя 30 мм.

Спектрофотометрическое определение ионов аммония в градуировочных растворах проводили для того же диапазона концентраций, что и для потенциометрического определения. Величины оптической плотности (A) и пропускания (T) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для построения калибровочного графика по градуировочным растворам при спектрофотометрическом определении

Раствор	pCm	pH	Температура, °C	A	T, %
РГ5	4,3	9,31	20,8	0,430	37,2
РГ4	4,0	9,27	20,8	0,766	17,1
РГ3	3,0	9,16	20,2	0,0*	0,0*
РГ2	2,0	9,26	20,0	–	–
РГ0	1,0	9,13	19,8	–	–

* значения A = 0,920 и T = 12,0 % фиксируются лишь при длине волны 560 нм, но рабочий диапазон длин волн метода 400...425 нм. Для растворов РГ2 и РГ0 при данном разбавлении значения величин A и T не фиксируются.

2.3 Результаты потенциометрического и спектрофотометрического определения иона аммония в исследуемых добавках-модификаторах

Химические примеси широко применяются в индустрии бетона для повышения его эффективности. Добавки-модификаторы представляют собой пластификаторы I...IV категории или комплексные добавки, включающие в свой состав пластификаторы. Суперпластификаторы нового поколения позво-

ляют создавать новые типы цементных смесей и обеспечивают дополнительные преимущества. Производитель вправе не указывать химическую природу добавки, обозначив лишь торговое название и основной эффект действия, что значительно усложняет анализ. Добавки используют в жидком (вязкие непрозрачные жидкости) или порошкообразном виде (от светло-серого до темно-коричневого цветов). Зная категорию пластификатора, можно предположить его химическую природу и, таким образом, подобрать методику для определения ионов аммония.

Для определения содержания ионов аммония в добавках к бетонам были исследованы пять образцов химических добавок, используемых в Республике Беларусь на заводах КПД: Универсал-П-4; Хидетал-ПГ-9а; Полипласт СП-1; Реламикс Т-2; Линамикс СП-180. Характеристики анализируемых добавок приведены в таблице 3.

Таблица 3

Характеристики анализируемых добавок для бетона

Добавка	ТНПА	Механизм действия	Изготовитель
Универсал-П4	ТУ 5745-020-57330160-13	Пластификатор	ООО «НПП «Стандарт – Э.С.Т.»
Полипласт СП-1 (в форме порошка)	ТУ 5870-005-58042865-05	Суперпластификатор	ООО «Полипласт Северо-Запад»
Реламикс Т-2 (в форме порошка)	ТУ 5870-002-14153664-04	Суперпластификатор и ускоритель твердения	
Линамикс СП-180 (в форме порошка)	ТУ 5870-016-58042865-06	Суперпластификатор	
Хидетал-ПГ-9а	ТУ ВУ 490681049.707-2010	Пластификатор I группы	ООО «НПП «Стандарт – Э.С.Т.»

Результаты потенциметрического определения по данным калибровочного графика содержания ионов аммония в добавках к бетонам приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты потенциметрических исследований добавок в бетоны*

Добавка	Код	pH вытяжек	Потенциал E, mV	Температура (режим ta), °C	Концентрация Cm**, моль/дм ³	pCm
Универсал-П-4	П4	7,22***	162,7	20,2	$1,462 \cdot 10^{-4}$	3,835
Универсал-П-4 (Минск)	П4М	10,16	141,6	21,0	Не обнаружено ($3,944 \cdot 10^{-5}$)	–
Хидетал-ПГ-9а	ПГ9а	6,64	не пригодна для работы с ИСЭ			
Полипласт СП-1	СП1	6,77	144,8	19,8	Не обнаружено ($4,811 \cdot 10^{-5}$)	–
Реламикс Т-2	Т2	6,97	139,0	19,9	Не обнаружено ($3,356 \cdot 10^{-5}$)	–
Линамикс СП-180	СП180	7,13	141,6	19,8	Не обнаружено ($3,944 \cdot 10^{-5}$)	–

* 1 %-ный исходный раствор без дополнительного разведения; проба = 45 м³ анализируемого раствора + V раствора для регулирования pH + (5 – V) см³ фонового раствора; Δt < 1,5 °C;
 ** расчет проводили по данным калибровочного графика;
 *** доводили РР2 (3 мл) до рабочего диапазона ИСЭ (подкислением).

В добавках Полипласт СП-1, Реламикс Т-2 и Линамикс СП-180 содержание ионов аммония оказалось за пределами обнаружения. В добавке Универсал-П4 содержание ионов аммония в 1 %-ном водном растворе составило $1,462 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, что соответствует 263,16 мг ионов NH₄⁺/кг добавки. В добавке Хидетал-ПГ-9а согласно паспортным данным содержатся органические соединения. Данные соединения способны вывести материал мембраны электрода из строя, поэтому потенциметрическое определение для данной добавки не проводилось.

Дополнительно для определения общей концентрации электролитов в растворах добавок была определена удельная электропроводность водных вытяжек. Определение проводилось на портативном кондуктометре Hanna HI 9033, изготовитель Hanna Instruments (Румыния) с диапазоном измерений от 0 до 199,9 мСм с автоматической термокомпенсацией. Для измерений готовились водные растворы добавок с содержанием 1 масс. %. Объем пробы 100 см³.

Целесообразность определения электропроводности раствора обусловлена необходимостью оценки суммарного количества ионов электролитов, некоторые из них (Na^+ , K^+ , Fe^{3+}) могут мешать потенциометрическому определению ионов аммония. Измерения показали, что наибольшая концентрация электролитов соответствует добавке «Универсал-П-4», в других исследуемых добавках содержание электролитов ниже и находится на приблизительно одинаковом уровне (табл. 5).

Таблица 5

Электропроводность исследуемых добавок

Наименование добавки	Электропроводность κ , мСм
Универсал-П-4	7,22
Универсал-П-4 (Минск)	8,16
Хидетал-ПГ-9а	0,17
Полипласт СП-1	2,89
Реламикс Т-2	3,55
Динамикс СП-180	3,26
Дистиллированная вода	0,0056

Подготовку проб для спектрофотометрического определения ионов аммония в добавках проводили следующим образом: 2 мл 1 %-ного водного раствора переносили в мерную колбу объемом 200 мл и доводили до метки дистиллированной водой. Из полученных разбавленных растворов отбирали аликвоту в качестве раствора сравнения и аликвоту для анализа, в которую прибавляли сегнетову соль и реактив Несслера. Помимо этого, в качестве раствора сравнения также выступал холостой раствор, приготавливаемый из дистиллированной воды, сегнетовой соли и реактива Несслера. Однако результаты прямого фотометрического определения неоднозначны, поскольку даже разбавленные растворы добавок имеют желтоватую окраску, близкую к окраске аналитического сигнала – коллоидного раствора комплексного йодомеркурата $[\text{Hg I}_4^-]$.

Таким образом, проведённые исследования показывают, что потенциометрический метод может быть использован для прямого определения ионов аммония в добавках, применяемых в производстве бетонов. Добавка-суперпластификатор Универсал-П-4 (IV категория) содержит свободные ионы аммония, что делает её потенциальным источником аммиака.

2.4 Результаты потенциометрического и спектрофотометрического определения иона аммония в водных вытяжках из бетона

При изготовлении бетонных стеновых панелей и перекрытий практикуется как их предварительное изготовление в заводских пропарочных камерах в условиях тепловлажностной обработки (ТВО), так и непосредственно локализованная монолитная заливка в условиях естественного твердения (ЕТ). На базе заводской лаборатории КПД КУП «Брестжилстрой» и химической лаборатории БрГТУ была воссоздана технология производства бетона для исследования влияния условий обработки и добавок на наличие аммонийных соединений. Для этого заводом-изготовителем железобетонных конструкций и изделий были подготовлены в промышленной лаборатории 18 образцов бетона с введением и без введения добавок разных категорий, схватывание, твердение и набор прочности которых протекали в условиях ТВО или ЕТ. Из них было отобрано 12 образцов – исследовались на 14-е сутки и 28-е сутки твердения; 6 остальных образцов – контрольные. В данной работе представлены данные, полученные при исследовании образцов на 28-е сутки.

После 7-ми суток твердения в условиях ТВО и ЕТ образцы герметично упаковывались в полиэтиленовую пленку для предотвращения попадания загрязнений и иных воздействий (механических сколов краев граней), а также для предотвращения миграции аммиака из них, затем транспортировались в химическую лабораторию. Образцы бетона подвергались механическому измельчению с извлечением образцов высокодисперсной бетонной пыли с разных глубин относительно поверхности для отбора средней пробы. Бетонная пыль сразу упаковывалась в герметичные полиэтиленовые пакеты для хранения более 2-х часов перед проведением анализа.

Из каждого образца бетонной пыли отбирались различные навески (1; 2; 5; 10 г) и готовились водные вытяжки (4 образца). После чего проводилось исследование отфильтрованных растворов методом спектрофотометрии (эталонный) и потенциометрии (альтернативный).

В качестве анализируемого использовался раствор, состоящий из аликвоты пробы (50 мл), раствора сегнетовой соли (2 мл) и раствора реактива Несслера (2 мл); в качестве растворов сравнения – 1) дистиллированная вода (ДВ) (50 мл), 2) дистиллированная вода (50 мл) с добавлением раствора сегнетовой соли (2 мл) и раствора реактива Несслера (ГР) (2 мл).

Сравнение анализируемого раствора с аликвотой пробы производилось для устранения погрешности в случае возникновения окрашивания. Сравнение анализируемого раствора с дистиллированной водой с введением раствора сегнетовой соли и реактива Несслера проводилось для устранения погрешности, вызванной окрашиванием в желтый цвет реактива Несслера под воздействием естественного дневного света. На практике окрашивание не наблюдалось, поскольку имеющийся реактив Несслера готовился непосредственно перед использованием, и не допускалось попадание прямых солнечных лучей на анализируемый раствор и растворы сравнения.

Данные, полученные при спектрофотометрическом анализе, представлены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты спектрофотометрического определения ионов аммония в пробах бетона

№ образца	Наличие добавки	Условия твердения	Масса БП в 200 мл водной вытяжки	pH	T, °C	T, % ГР	T, % ДВ	Концентрация, моль/дм ³ ГР	Концентрация, моль/дм ³ ДВ	РС ГР	РС ДВ	Концентрация, мг NH ₄ ⁺ /кг
Образец 1	б/д	ЕТ	1,0001	11,78	19,1	94,0	81,7	–	–	–	–	–
			2,0000	12,07	19,1	87,3	76,9	–	–	–	–	–
			5,0007	12,29	19,2	76,2	65,8	–	–	–	–	–
			10,0010	12,41	19,1	72,1	61,5	–	–	–	–	–
Образец 2	б/д	ТВО	1,0003	11,76	18,8	84,4	74,2	–	–	–	–	–
			2,0002	12,00	18,9	83,8	77,0	–	–	–	–	–
			5,0003	12,21	18,6	83,0	69,8	–	–	–	–	–
			10,0004	12,37	19,3	78,4	64,2	–	–	–	–	–
Образец 3	Образец П-4	ЕТ	0,9976	11,76	19,1	92,1	83,9	–	–	–	–	–
			1,9970	11,97	18,9	91,6	83,8	–	–	–	–	–
			5,0004	12,27	18,7	83,1	73,8	–	–	–	–	–
			9,9990	12,48	20,4	42,8	37,0	3,29·10 ⁻⁵	3,30·10 ⁻⁵	4,483	4,482	11,9
Образец 4	Образец П-4	ТВО	0,9999	11,66	19,3	95,9	83,6	–	–	–	–	–
			2,0001	11,80	19,4	90,8	78,9	–	–	–	–	–
			5,0001	12,04	18,9	90,0	78,5	–	–	–	–	–
			10,0006	12,31	19,2	86,3	75,8	–	–	–	–	–
Образец 5	Образец П-9а	ЕТ	1,0000	11,87	18,9	94,6	77,7	–	–	–	–	–
			1,9996	11,94	18,8	87,7	77,0	–	–	–	–	–
			5,0002	12,13	19,0	85,9	76,2	–	–	–	–	–
			10,0000	12,38	18,7	84,1	74,8	–	–	–	–	–
Образец 6	Образец П-9а	ТВО	1,0009	11,53	20,0	85,1	77,8	–	–	–	–	–
			2,0006	11,83	19,1	79,3	73,3	–	–	–	–	–
			5,0004	12,11	19,0	75,2	69,0	–	–	–	–	–
			10,0003	12,26	18,7	71,0	64,6	–	–	–	–	–

Образцы 1 и 2 изготовлены без химических добавок, согласно полученным экспериментальным данным в водных вытяжках образцов, выдержанных как в условиях ТВО (в случае изготовления ЖБК на заводе), так и в условиях ЕТ (в случае локальной монолитной заливки), ионы аммония в них отсутствуют. Можно также констатировать отсутствие ионов аммония в активной минеральной добавке, которую вводят в портландцемент в целях экономии.

Спектрофотометрическими исследованиями установлено наличие свободных ионов аммония в образце 3 с добавкой суперпластификатора Универсал-П-4 (IV категория) в условиях естественного твердения (монолитная заливка) при навеске пробы бетонной пыли 10 г.

Результаты потенциометрического определения представлены в таблице 7. Потенциометрическим следованием установлено наличие свободных ионов аммония в образцах с добавкой суперпластификатора Универсал-П-4 (IV категория) в условиях естественного твердения (монолитная заливка), а также и в условиях тепловлажностной обработки, осуществленной на заводе.

Таблица 7

Результаты потенциметрического определения ионов аммония в пробах бетона

№ образца	Наличие добавки	Условия твердения	Масса БП в 200 мл водной вытяжки	pH ¹	pH ²	T, °C	Концентрация, моль/дм ³	РС	Концентрация, мг NH ₄ ⁺ /кг
Образец 1	б/д	ЕТ	1,0001	11,78	7,15	19,1	–	–	
			2,0000	12,07	7,16	19,1	–	–	
			5,0007	12,29	6,95	19,2	–	–	
			10,0010	12,41	7,26	19,1	–	–	
Образец 2	б/д	ТВО	1,0003	11,76	6,89	18,8	–	–	
			2,0002	12,00	7,26	18,9	–	–	
			5,0003	12,21	6,92	18,6	–	–	
			10,0004	12,37	7,12	19,3	–	–	
Образец 3	Образец П-4 Универсал-П-4 0,5 % по массе; СП	ЕТ	0,9976	11,76	6,97	19,1	–	–	
			1,9970	11,97	7,16	18,9	–	–	
			5,0004	12,27	6,94	18,7	–	–	
			9,9990	12,48	6,83	20,4	6,52·10 ⁻⁵	4,186	23,5
Образец 4	Образец П-4 Универсал-П-4 0,5 % по массе; СП	ТВО	0,9999	11,66	6,91	19,3	–	–	
			2,0001	11,80	7,21	19,4	–	–	
			5,0001	12,04	7,27	18,9	–	–	
			10,0006	12,31	7,17	19,2	4,96·10 ⁻⁵	4,304	17,9
Образец 5	Образец ПГ-9α Хидетал-ПГ-9α 0,7 % по массе; КД	ЕТ	1,0000	11,87	7,26	18,9	–	–	
			1,9996	11,94	7,17	18,8	–	–	
			5,0002	12,13	7,08	19,0	–	–	
			10,0000	12,38	7,18	18,7	–	–	
Образец 6	Образец ПГ-9α Хидетал-ПГ-9α 0,7 % по массе; КД	ТВО	1,0009	11,53	7,11	20,0	–	–	
			2,0006	11,83	7,08	19,1	–	–	
			5,0004	12,11	7,00	19,0	–	–	
			10,0003	12,26	7,11	18,7	–	–	

Следует отметить высокую корреляцию между собой данных потенциметрического и спектрофотометрического анализа. Несколько завышенные результаты для потенциметрии могут быть объяснены возможным мешающим действием ионов щелочных металлов в системе. Меньшее количество ионов аммония в образце, полученном в условиях ТВО, вероятно, обусловлено потерями аммиака в результате обработки.

Заключение. Проведенные исследования по определению иона аммония в добавках и водных вытяжках из бетона показали следующее:

1) потенциметрический метод может служить основой экспресс-методики для определения содержания аммония в железобетонных изделиях. Для разработки методики требуется дополнительное изучение влияния мешающих ионов калия и натрия на точность определения ионов аммония. Требуется также проведение исследования составов с искусственно введенным фиксированным количеством соединений аммония;

2) метод спектрофотометрии для определения ионов аммония можно считать эталонным, поскольку он базируется на реакции с реактивом Несслера, стабилизированным сегнетовой солью. Данная реакция является единственной реакцией на ионы аммония, протеканию которой не мешают присутствующие в растворе ионы калия и натрия (мешающие ионы). Однако при использовании спектрофотометрии невозможно определить малые концентрации иона аммония в растворах (при содержании аммиака менее 0,5 мг/л окрашивание раствора не наблюдается). Кроме того, метод неприменим для прямого определения ионов аммония в добавках, имеющих желтую окраску, поскольку цвет добавки близок к цвету аналитического сигнала;

3) добавки-модификаторы могут выступать в качестве потенциальных источников эмиссии аммиака из бетона как конечного продукта. Определяющим фактором здесь является категория и химический состав добавки.

Проанализированные добавки-пластификаторы I...III категории или комплексные добавки, сочетающие в себе пластификатор I...III категории с иными компонентами, регулирующими различные стадии образования искусственного камня, не содержат в своем составе соединений азота, которые могли

бы стать источником аммиака, и поэтому не являются источником эмиссии аммиака из бетонных строительных конструкций.

Добавка-суперпластификатор Универсал-П-4 (IV категория) содержит в водном растворе свободные ионы аммония, что делает её потенциальным источником эмиссии аммиака из бетонных строительных конструкций.

В бетонных образцах, не содержащих химических добавок-модификаторов, изготовленных как в условиях ТВО, так и в условиях ЕТ (в случае локальной монолитной заливки), ионы аммония отсутствуют.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные социально-экономические показатели Республики Беларусь в I квартале 2015 г.: экспресс-информация [Электронный ресурс] / Нац. стат. комитет Респ. Беларусь. – Режим доступа: <http://belstat.gov.by/novosti/osnovnye-sotsialno-ekonomicheskie-pokazateli-respubliki-belarus/>. – Дата доступа: 06.05.2015.
2. Emission of ammonia from indoor concrete wall and assessment of human exposure / Z. Bai [et al.] // *Environmental International*. – 2006. – Vol. 32. – P. 303–311.
3. Tidy, G. Ammonia concentrations in houses and public buildings / G. Tidy // *Atmospheric Environment*. – Part A: General Topics. – 1993. – Vol. 27. – Issue 14, Oct. – P. 2235–2237.
4. Вредные химические вещества. Неорганические соединения V–VIII групп: справ. изд. / А.Л. Бандман, [и др.]; под ред. В.А. Филова [и др.]. – Л.: Химия, 1989. – 592 с.
5. Лурье, Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод / Ю.Ю. Лурье. – М.: Химия, 1984. – 448 с.
6. Water quality. Determination of ammonium. Distillation and titration method: ISO 5664:1984(en). – Введ. 01.05.1984. – 3 с.
7. Water quality. Determination of ammonium. Potentiometric method: ISO 6778:1984(en). – Введ. 01.05.1984. – 5 с.
8. Фотометрическое определение карбамидов в бетонных смесях / А.В. Булатов [и др.] // *Аналитика и контроль*. – 2012. – Т. 16, № 3. – С. 281–284.
9. Реестр методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении измерений в области охраны окружающей среды: в 3 ч. – Минск: РУП «БелНИЦ «Экология», 2009. – Ч. II: Поверхностные воды, сточные воды, подземные воды; Кн. 3: Подземные воды. – 192 с.

Поступила 22.05.2015

AMMONIA AND ITS COMPOUNDS IN CONCRETE: REVIEW OF ANALYTICAL METHODS AND THE RESULTS OF POTENTIOMETRIC AND PHOTOMETRIC DETERMINATION

K. KHALETSKAYA, N. YALAVAYA, Y. YALAVAYA

The problem of migration of ammonia in the air of residential and public buildings from reinforced concrete products during exploitation is discussed in the article. The different methods of determining the ammonium ions in aqueous solutions are reviewed by the authors. The data of potentiometric and spectrophotometric determination of ammonium ions in concrete admixtures, as well as within the concrete samples are presented in the article. A method for the preparation of concrete samples for chemical analysis is proposed. It is shown that the potentiometric method can be the basis of express-method for the determination of ammonia. It is assumed that the concrete modifiers can be probable sources of emission of ammonia from concrete as a final product.

УДК 666.973.2:666.97.031

ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ АРБОЛИТА

канд. техн. наук, доц. **В.В. БОЗЫЛЕВ**;
канд. техн. наук, доц. **А.Л. ЛИСОВСКИЙ**; **А.Н. ЯГУБКИН**
(Полоцкий государственный университет)

Демонстрируется разработанная в Полоцком государственном университете и теоретически обоснованная технология колебательного уплотнения арболита. Технология колебательного уплотнения обеспечивает направленное расположение щепы в арболите, уменьшает дефекты структуры и увеличивает прочность до 70 % по сравнению с традиционными методами уплотнения. Это подтверждено с помощью феноменологических моделей теории композиционных материалов, а также патентом на изобретение. Выполненные лабораторные исследования позволяют сделать вывод о преимуществах использования арболита, полученного по колебательной технологии, в сопоставлении с традиционным арболитом. Однако для широкомасштабной реализации данной технологии необходимо разработать технологическую оснастку, режимы производства, а также рабочие составы арболитовой смеси. Были разработаны рабочие чертежи технологической оснастки, подобраны технологические режимы и составы для производства арболитовых блоков, проведены все необходимые испытания готовых изделий.

Введение. Для строительной отрасли Республики Беларусь одной из приоритетных является задача увеличения объёмов индивидуального жилищного строительства и обеспечения снижения его стоимости. Перспективным направлением в решении данной задачи может быть организация производства стеновых материалов из арболита, получаемого по новой технологии с использованием доступного местного сырья.

Разработано большое количество способов уплотнения арболитовой смеси – вибропрессование, силовой вибропрокат, вибрирование с пригрузом и т.д. Эти способы отличаются высокой трудоёмкостью, продолжительностью, требуют мощного силового оборудования, не обеспечивают направленную укладку заполнителя в смеси. В Полоцком государственном университете разработана и теоретически обоснована технология колебательного уплотнения арболита. Технология колебательного уплотнения обеспечивает направленное расположение щепы в арболите, уменьшает дефекты структуры и увеличивает прочность до 70 % по сравнению с традиционными методами уплотнения. Это подтверждено с помощью феноменологических моделей теории композиционных материалов, а также патентом на изобретение [1–3].

Для широкомасштабной реализации технологии колебательного уплотнения необходимо разработать технологическую оснастку, режимы производства, а также рабочие составы арболитовой смеси.

Исходя из всего вышесказанного тема исследований, направленная на разработку технологии получения стеновых изделий для малоэтажных зданий на основе модифицированного арболита с направленной укладкой заполнителя и внедрение ее в производство, является актуальной.

Основная часть. Разработанная технология колебательного уплотнения арболита вызвала интерес как у государственных, так и у частных организаций, фирм. Для промышленной реализации технологии в соответствии с действующими требованиями по организации выпуска новых видов строительных материалов и конструкций технология производства должна быть представлена в виде технологического регламента.

В отличие от технологий производства традиционного арболита, технология колебательного уплотнения предлагает введение дополнительной операции на этапе уплотнения арболитовой смеси.

Колебательное уплотнение смеси должно быть проведено в следующей последовательности: в форму укладывается бетонная смесь; включается двигатель, и тележка с формой совершает горизонтальные колебания; двигатель выключается, когда смесь займёт горизонтальное положение и заполнит углы формы; включается вибратор и производится вибрирование с пригрузом.

Величина пригруза назначается таким образом, чтобы обеспечить формирование верхнего слоя блока и не нарушить однородность плотности по высоте. Опытным путём установлена величина пригруза, равная 6 кг на 1 блок ($0,08 \text{ м}^2$) [3].

Для реализации горизонтальных колебаний был подобран мотор-редуктор, а также разработаны рабочие чертежи технологической оснастки, представленные на рисунке 1.

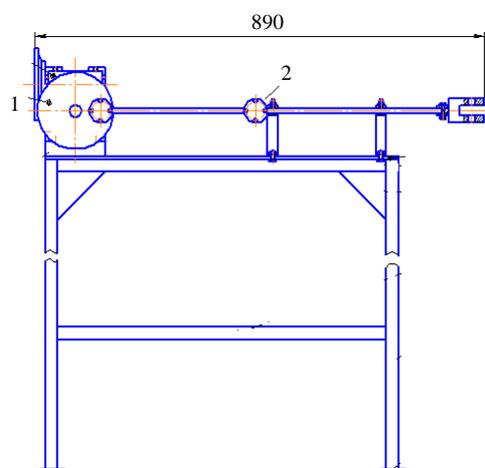


Рис. 1. Механизм для реализации технологии колебательного уплотнения
1 – мотор-редуктор;
2 – кривошипно-шатунный механизм

На втором этапе необходимо было выполнить подбор состава арболита. Подбор состава арболита, получаемого по технологии колебательного уплотнения, может быть выполнен в последовательности, определяемой действующими нормативными документами [4–6].

Используя полученные математические модели прочности и плотности [2], построены графики для определения начального расхода цемента и щепы (рис. 2, 3). На первом этапе по этим графикам в зависимости от заданных параметров прочности и плотности назначается ориентировочный расход цемента и древесного заполнителя исходного замеса.

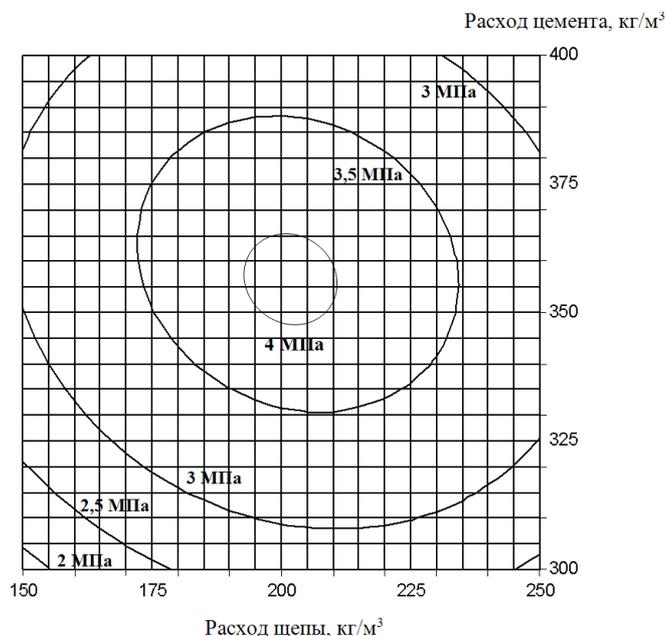


Рис. 2. Зависимость прочности арболита от расхода цемента и расхода щепы

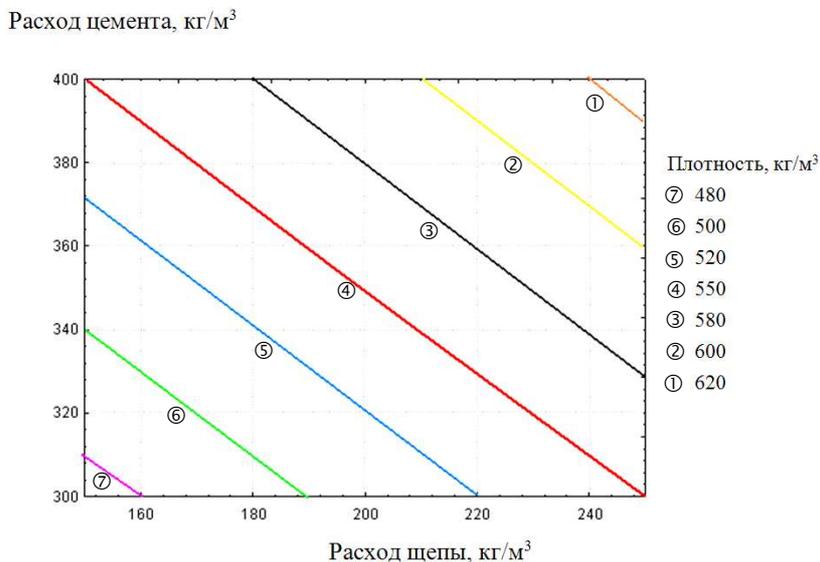


Рис. 3. Зависимость плотности арболита от расхода цемента и расхода щепы

В лабораторных условиях изготавливают исходный замес и дополнительные замесы [6]. Определяется плотность арболита, пересчитывается фактический расход материалов на 1 м^3 арболита.

По результатам испытаний арболитовой смеси и арболита испытанных составов устанавливают зависимости свойств арболитовой смеси от параметров состава и расхода материалов, а также строят график зависимости прочности арболита от основного параметра.

Указанные зависимости и график используют в дальнейшем для назначения и корректировки рабочих составов. По графику зависимости прочности арболита от расхода цемента (расхода древесного заполнителя) определяют значение этого параметра, соответствующего прочности арболита, пересчитыва-

ют состав арболита, исходя из найденного значения расхода цемента, и проверяют его соответствие всем другим нормируемым показателям качества. При получении по результатам испытаний показателей арболита, соответствующих заданным, подобранный состав принимается за номинальный.

В случаях если состав арболита отвечает требованиям по прочности, но не отвечает каким-либо другим требованиям, производится повторный подбор состава с применением технологических приемов, обеспечивающих получение заданных показателей качества арболита, как правило, без увеличения расхода цемента. Назначение и корректировку рабочих составов производят с учетом зависимостей между параметрами состава арболита и свойствами арболита и арболитовой смеси, установленными при подборе номинального состава.

По представленной выше методике был подобран рабочий состав арболита (табл. 1).

Таблица 1

Рабочие составы арболита

№ состава	Цемент (кг/м ³)	Щепа (кг/м ³)	Вода (кг/м ³)	Вид добавки	Количество добавки, %
1	350	300	285	Хлористый кальций	2
2	350	300	285	Арбел	5

На *третьем этапе* необходимо было выполнить все необходимые испытания готовых изделий в соответствии с СТБ 1105 [7]. Результаты испытаний прочности арболита представлены в таблице 2.

Таблица 2

Определение прочности арболита

Шифр образца	Проектная марка бетона	Масса образца, г	Размеры образца, мм			Средняя плотность образца в момент испытания, кг/м ³	Разрушающая нагрузка, кН	Масштабный коэффициент	Предел прочности на сжатие, МПа	Средняя прочность серии образцов, МПа
1	M25	3271	150	150	150	962	54	1	2,4	2,5
2		3298	150	150	150	970	56		2,5	
3		3322	150	150	150	977	56		2,6	

Средняя фактическая прочность на сжатие образцов-кубов арболита марки M25, изготовленных по технологии колебательного уплотнения, составляет 2,5 МПа.

Результаты испытаний плотности арболита представлены в таблице 3.

Таблица 3

Определение плотности арболита

Шифр образца	Проектная марка бетона	Масса образца, г	Размеры образца, мм			Средняя плотность высушенного образца, кг/м ³	Примечание
1	D600	3271	150	150	150	548	
2		3298	150	150	150	553	
3		3322	150	150	150	557	

Средняя фактическая плотность образцов-кубов арболита марки D600, изготовленных по технологии колебательного уплотнения, составляет 553 кг/м³.

Результаты испытаний морозостойкости арболита представлены в таблицах 4, 5.

Таблица 4

Режим испытаний морозостойкости арболита

Размеры образцов, мм	Режим испытаний			
	замораживание		оттаивание	
	время, не менее, ч	температура, °С	время, ч	температура, °С
150×150×150	3,5	минус 18 ± 2	3,0 ± 0,5	18 ± 2

В результате испытаний образцов арболита, изготовленных по технологии колебательного уплотнения, установлено среднее значение коэффициента теплопроводности, равное 0,128 Вт/м·°С.

Заключение. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о целесообразности промышленного внедрения технологии колебательного уплотнения арболита в сопоставлении с технологиями изготовления традиционного арболита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ягубкин, А.Н. Технология получения стеновых блоков из арболита с направленной укладкой заполнителя / А.Н. Ягубкин, В.В. Бозылев // Строительная наука и техника. – 2011. – № 6. – С. 66–69.
2. Ягубкин, А.Н. К вопросу подбора состава и дозировки добавок-модификаторов арболита / А.Н. Ягубкин, В.В. Бозылев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Прикладные науки. Строительство. – 2010. – № 6. – С. 84–89.
3. Ягубкин, А.Н. Оптимизация процесса уплотнения бетонной смеси при изготовлении арболита / А.Н. Ягубкин, В.В. Бозылев, Ю.П. Голубев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Прикладные науки. Строительство. – 2009. – № 12. – С. 61–68.
4. Арболит и изделия из него. Общие технические условия: ГОСТ 19222-84. – Введ. 01.01.85. – М.: Госкомитет СССР по делам строительства: НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. – 21 с.
5. Смеси арболитовые. Технические условия: СТБ 2140-2010. – Введ. 18.11.2010. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 2011. – 6 с.
6. Бетоны. Правила подбора состава: СТБ 1182-99. – Введ. 04.10.1999. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 2000. – 8 с.
7. Блоки стеновые из арболита для малоэтажного строительства. Технические условия: СТБ 1105-98. – Введ. 19.03.1998. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 1998. – 26 с.
8. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме: СТБ 1618-2006. – Введ. 01.07.2006. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 2006. – 12 с.

Поступила 08.06.2015

INDUSTRIAL TECHNOLOGY INTRODUCTION OSCILLATORY SEAL THE CEMENT WOOD

V. BOZYLEV, A. LISOUSKI, A. YAGUBKIN

In Polotsk state University developed and theoretically justified vibrational technology seal the cement wood. Technology oscillating seal provides directional arrangement of chips in the cement wood, reduces defects in the structure and increases the strength up to 70 % compared with traditional methods of compaction. This is confirmed with the help of phenomenological models of the theory of composite materials, as well as a patent for the invention. Laboratory studies allow us to conclude about the advantages of using arbolit obtained by vibrational technology in comparison with traditional cement wood. However, for large-scale implementation of this technology it is necessary to develop manufacturing tools, modes of production, and also working compounds wood concrete mixture. Have developed working drawings of tooling, selected process conditions and compositions for the production of wood concrete blocks, carried out all necessary tests of the finished products.

УДК 625.855.063

КЛАССИФИКАЦИЯ И КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДОБАВОК В ЭМУЛЬСИОННО-МИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЯХ

П.В. ВАВИЛОВ

(Государственное предприятие «БелдорНИИ», Минск);

канд. техн. наук, доц. С.Е. КРАВЧЕНКО

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматриваются вопросы применения добавок в эмульсионно-минеральные смеси для устройства конструктивных слоев дорожных одежд. Предлагается классификация добавок в эмульсионно-минеральные смеси по их функциональному назначению (основное назначение действия добавки) на добавки, повышающие прочность, водостойкость, долговечность, ускоряющие формирование и технологические модификаторы. В зависимости от назначения показаны критерии эффективности добавок. Для каждого из критериев предлагаются методики определения одного или нескольких качественных показателей, изменение которых указывает на эффективность добавки. В качестве примера представлен расчет эффективности тонкодисперсного наполнителя и поверхностно-активного вещества в качестве добавок в эмульсионно-минеральные смеси. Предложенная классификация добавок и критерии послужат основанием для целенаправленного регулирования составов и свойств эмульсионно-минеральных смесей для устройства конструктивных слоев дорожных одежд.

Введение. В последние 15 лет в Республике Беларусь ситуация с использованием эмульсионно-минеральных смесей для устройства конструктивных слоев дорожных одежд (далее – смеси) существенно изменилась в лучшую сторону. В распоряжении дорожных организаций имеются отечественные установки по производству битумных эмульсий, мобильное смесительное оборудование белорусского производства, широко представлена номенклатура высококачественных поверхностно-активных веществ (ПАВ) для производства эмульсий и регулирования свойств смесей. Вместе с тем, сравнивая требования технических нормативных правовых актов (ТНПА), очевидно, что современные требования к смесям мало изменились, а по некоторым показателям даже снизились в сравнении с требованиями 30-летней давности (табл. 1). Кроме того, в ТНПА существуют определенные терминологические разногласия, не регламентирован порядок применения добавок в смеси, отсутствуют методы определения их оптимального расхода и критериев эффективности.

Таблица 1

Сравнительные данные требований ТНПА к смесям

ТНПА	Классификация смеси	Предел прочности на сжатие, МПа, не менее, при 20 °С/50°С	Коэффициент водостойкости, не менее	Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении, не менее	Водонасыщение, % по объему	Набухание, % по объему, не более	Нормативный возраст (период формирования структуры)
Пособие к СНиП 3.06.03-85 [1]	пористые ¹	1,0/–	0,7	–	не более 6,5	2,0	14 суток
	плотные ¹	1,2/–	0,8	0,7	не более 4,5	2,5	
	с цементом ²	2,0/–	0,8	0,6	не более 7	1,5	28 суток
ГОСТ 30491-97 [2]	основание	1,4/0,5	0,6	0,5	не более 10	2,0	14 суток
	покрытие	1,6/0,8	0,75	0,65	2,0...6,0	2,0	
	с минеральными вяжущими ³	1,8/0,9	0,8	0,7	2,0...6,0	1,5	28 суток
ТКП 306-2011 ⁴ [3]	I класс	1,2/–	0,6	0,6	не более 10	2,0	Не менее 14 суток или 1 (3, 7) суток ⁵
	II класс	1,0/–	0,5	0,5	не более 12	2,0	

Примечания: 1. К гравийным смесям требования снижаются на 15 %. Возможно использование добавок цемента и извести.
 2. В количестве 4...6 % массы минерального материала.
 3. Портландцемент, шлакопортландцемент, зола-уноса – в количестве не более 4 % по массе.
 4. В качестве добавок могут использоваться волокна целлюлозы или стекловолокно и добавки для ускорения формирования.
 5. В случае получения показателей (кроме коэффициента водостойкости при длительном водонасыщении), удовлетворяющих требованиям таблицы 1 через 1 (3; 7) сутки, сроком формирования конструктивного слоя из смесей, содержащих уплотняющую добавку, считаются 1 (3; 7) сутки соответственно.

Таким образом, совершенствование нормативной базы позволит рационально проектировать составы смесей, обоснованно назначать расход добавок и целенаправленно изменять состав смесей для достижения высоких физико-механических и эксплуатационных свойств устраиваемых из них конструктивных слоев дорожных одежд.

Классификация добавок. Учитывая особенности физико-химических процессов, протекающих в смесях [4; 5], и технологии их производства [6] за основу классификации добавок предлагается взять их функциональное назначение (основное назначение действия добавки), аналогично [7].

Добавки предлагается разделить на 5 классов:

- 1) повышающие прочность;
- 2) повышающие водостойкость;
- 3) ускоряющие формирование;
- 4) технологические модификаторы;
- 5) повышающие долговечность.

Критерии эффективности добавок и методы их определения. В основу оценки эффективности добавок предлагается заложить сравнение показателей смесей контрольного состава (не содержащего добавки) и основного состава (с добавкой), аналогично определению эффективности добавок в бетоны [8]. Испытания следует проводить в нормативном возрасте (14 суток) и в ранние сроки (для добавок, ускоряющих формирование) с целью подтверждения двух положений: добавка обеспечивает заявленный основной эффект; в возрасте 14 суток смесь соответствует нормативным требованиям.

На основании анализа нормативных [1–3; 7; 8] и других [5; 6] источников предлагается использовать критерии технической эффективности добавок, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Критерии эффективности добавок

Добавки	Основной эффект от воздействия	Критерии технической эффективности				
		качественный показатель смеси			критерий	
		свойство / показатель	обозначение	методика	обозначение	нормируемое значение
1. Повышающие прочность	Повышение прочности	Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С в возрасте 14 суток, МПа	$R_{см}^{осн}$, $R_{см}^к$	[1]	$\Delta R_{см}$	$\Delta R_{см} \geq 20\%$
2. Повышающие водостойкость	Повышение водостойкости	Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении	$K^{осн}$, $K^к$	[1]	ΔK	$\Delta K \geq 20\%$
3. Регулирующие формирование	Ускорение формирования	Скорость изменения предела прочности при сжатии, МПа/сут	$R_{см}^{осн}$, $R_{см}^к$	[1]	$\Delta a_{см}$, $\Delta b_{см}$	$\Delta a_{см} \geq 15\%$ и/или $\Delta b_{см} \geq 15\%$
4. Технологические модификаторы	Улучшение процесса перемешивания смеси / изменение срока хранения смеси	Усилие сдвига в определенных промежутки времени, МПа	$R_{сд}^{осн}$, $R_{сд}^к$	[9]	$\Delta R_{сд}$	$(R_{сд}^{осн} - R_{сд}^к) \rightarrow$ оптимальное значение
5. Повышающие долговечность	Повышение долговечности смеси	Прогнозируемая усталостная повреждаемость в возрасте 14 (28) суток, %	$D_n^{осн}$, $D_n^к$	[10]	ΔD_n	$(D_n^{осн} - D_n^к) \geq 0,5$

Аналогично [8] критерии эффективности $\Delta КП$, %, добавок № 1...3 таблицы 2 предлагается определять как

$$\Delta КП = \frac{КП^{осн}}{КП^к}, \quad (1)$$

где $КП^{осн}$, $КП^к$ – качественные показатели (показатели, изменение которых указывает на эффективность добавки) смесей основного и контрольного составов соответственно.

Качественные показатели эффективности добавок за исключением технологических модификаторов предлагается определять по стандартным (общезвестным) методикам. Таким образом, процесс определения эффективности добавок не вызовет затруднений.

Технологический модификатор перемешивания должен обеспечить снижение до приемлемого уровня сдвигового усилия, возникающего при перемешивании компонентов смеси в смесителе. Модифи-

каторы хранения должны увеличивать период времени, в течение которого когезия смеси в штабеле остается на уровне, позволяющем выполнять производственные операции по хранению и укладке. Фактические значения этих показателей еще предстоит установить. Для определения оптимального количества технологических модификаторов наиболее подходящим представляется испытание на технологичность по методике *Nynas* [9]. Оно позволяет напрямую измерить усилие сдвига, возникающее при перемещении компонентов (слоев) смеси относительно друг друга в различные моменты времени.

Для добавок, ускоряющих формирование, предварительно необходимо установить временную функцию изменения предела прочности при сжатии основного (2) и контрольного (3) составов вида:

$$R_{сж}^{осн}(T) = a_{сж}^{осн} \cdot \ln(T) + b_{сж}^{осн}, \quad (2)$$

$$R_{сж}^k(T) = a_{сж}^k \cdot \ln(T) + b_{сж}^k, \quad (3)$$

где $a_{сж}^{осн}$ – коэффициент, характеризующий скорость изменения предела прочности при сжатии образцов основного и контрольного составов, МПа/сут; $a_{сж}^k$ – свободный член функции предела прочности при сжатии, характеризующий начальную прочность при сжатии образцов основного и контрольного составов, МПа; T – возраст образцов из смесей, сут.

При установлении функций (2) и (3) прочность при сжатии определяют в раннем (1...7 суток) и нормативном (14 суток) возрасте. Затем определяют критерий эффективности по (1). Для снижения трудоемкости процесса установления оптимального расхода добавки (необходимо изготовить 12 образцов для одного расхода добавки) предлагается использовать неразрушающий метод контроля [11]. Для этого потребуется всего три образца, а в случае параллельных испытаний на долговечность можно использовать образцы, предназначенные для определения усталостной повреждаемости [10].

Пример определения эффективности добавок в смеси. Подбор контрольного состава смеси (k) с минеральной частью из песка природного (66 %) и щебня гранитного фр. 5...10 мм (34 %) осуществлялся по [12]. На рисунке 1 представлены результаты определения оптимального содержания вяжущего в смеси контрольного состава.

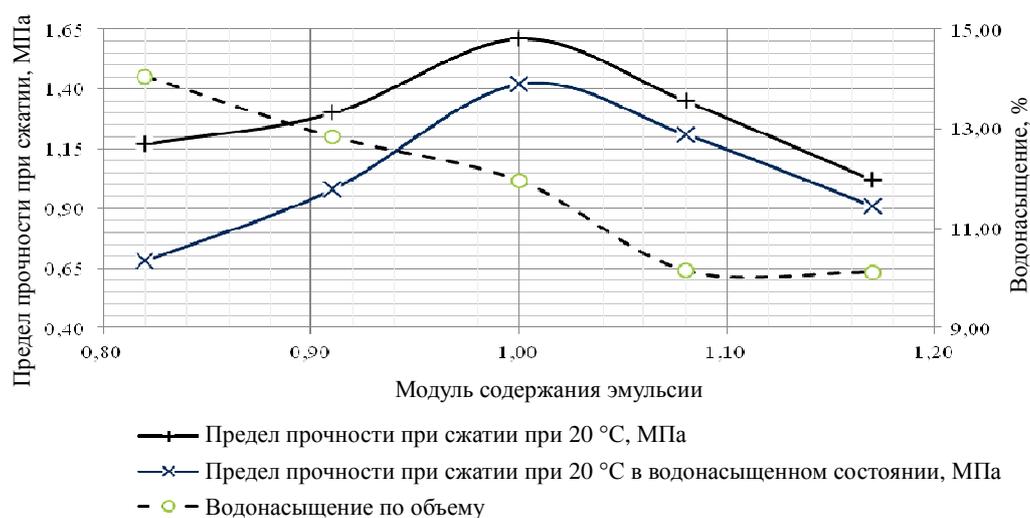


Рис. 1. Определение оптимального содержания вяжущего в смеси контрольного состава

В таблице 3 приведены составы основных составов смесей с добавками тонкодисперсного наполнителя (дефекат по [13]) и уплотняющей добавки зарубежного производства в качестве аналога [3].

Таблица 3

Описание и условное обозначение основных составов смесей

Условное обозначение состава	Добавка	Расход сверх массы минеральной части, %	Способ введения добавки
<i>st</i>	<i>Stabiram CM 502</i>	0,01	В готовую эмульсию
<i>d_2</i>	Тонкодисперсный наполнитель (дефекат)	2	На «сухую» минеральную часть перед водой предварительного увлажнения
<i>d_4</i>		4	
<i>d_6</i>		6	

Расход уплотняющей добавки принят исходя из рекомендаций производителя и ранее выполненных исследований [14]. Предварительных данных о расходе тонкодисперсного материала (дефеката) нет, поэтому граничные значения были приняты из следующих соображений. При соотношении битум/порошок более 0,8 (6 % сверх массы минеральной части) тонкодисперсный материал следует рассматривать в качестве структурной составляющей асфальто вяжущего [15], а не в качестве добавки. С технологической точки зрения – возможности введения в смесь и обеспечения равномерного распределения в ее объеме – минимальное рациональное количество тонкодисперсного наполнителя составляет 2 %.

В таблице 4 представлены результаты определения физико-механических свойств смесей в нормативном возрасте (14 суток).

Таблица 4

Физико-механические свойства образцов из смесей в нормативном возрасте (14 суток)

Состав	Физико-механические свойства			
	средняя плотность, г/см ³	водонасыщение, % по объему	набухание, % по объему	Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении
<i>k</i>	2,22	11,95	0,14	0,70
<i>st</i>	2,23	11,77	0,10	0,73
<i>d_2</i>	2,23	11,41	-0,16	0,84
<i>d_4</i>	2,27	9,72	0,00	0,88
<i>d_6</i>	2,27	8,81	-0,08	0,78
Требования ТКП 306 для ЭМС II класса [3]	–	Не более 12	Не более 2,0	Не менее 0,5

На рисунках 2 и 3 отображены данные о пределе прочности при сжатии при температуре 20 °С и динамическом модуле упругости (ИПМ) образцов из смесей в различном возрасте.

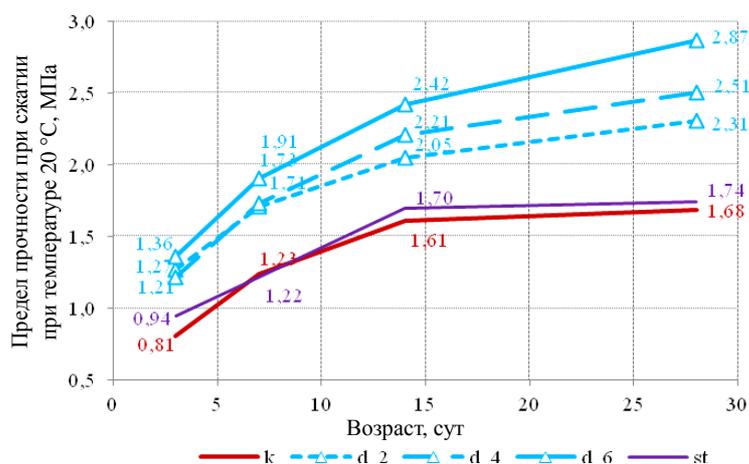


Рис. 2. Динамический модуль упругости (ИПМ) образцов смесей в различном возрасте

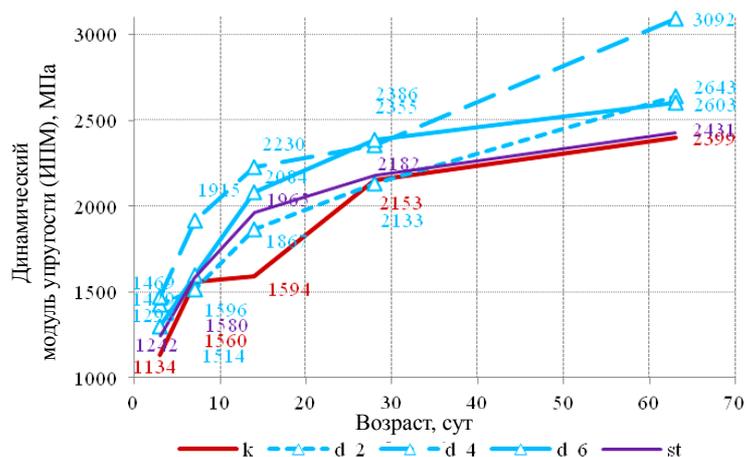


Рис. 3. Предел прочности при сжатии при 20 °С образцов из смесей в различном возрасте

В таблице 5 приведены результаты определения эффективности добавок в качестве повышающих прочность и водостойкость; в таблице 6 – в качестве добавок, ускоряющих формирование смесей, согласно предложенным методикам.

Таблица 5

Критерии эффективности добавок в смеси согласно таблице 2

Состав	Повышение прочности, %	Повышение водостойкости, %
<i>st</i>	6	4
<i>d_2</i>	28	20
<i>d_4</i>	37	26
<i>d_6</i>	51	11

Таблица 6

Данные расчета эффективности добавок в качестве ускоряющих формирование смеси

Состав	Параметры функции вида $R = a \cdot \ln(T) + b$		Критерии функциональной эффективности	
	<i>a</i>	<i>b</i>	Δa , %	Δb , %
по пределу прочности при сжатии (рис. 2)				
<i>k</i>	0,4075	0,414	–	–
<i>st</i>	0,3901	0,5208	–4	26
<i>d_2</i>	0,419	0,6006	3	45
<i>d_4</i>	0,5924	0,4397	45	6
<i>d_6</i>	0,4693	0,7772	15	88
по динамическому модулю (рис. 3)				
<i>k</i>	417,5856	669,0049	–	–
<i>st</i>	398,2989	831,7635	–5	24
<i>d_2</i>	406,1507	848,2993	–3	27
<i>d_4</i>	495,5682	907,9717	19	36
<i>d_6</i>	453,138	800,8388	9	20

По представленным результатам испытаний можно сделать следующие *основные выводы*:

- смеси всех составов соответствуют требованиям ТНПА в нормативном возрасте, то есть первое положение предложенной методики выполняется;

- зарубежная добавка для ускорения формирования [3] может быть классифицирована как ускоряющая формирование с расходом 0,01 % сверх массы минеральной части, что подтверждает ранее полученные данные [14];

- оптимальный расход (то есть минимальный расход, обеспечивающий достижение нормируемого уровня критерия эффективности) тонкодисперсного наполнителя с точки зрения обеспечения эффекта ускорения формирования структуры смеси, повышения ее прочности и водостойкости – 2 % сверх массы минеральной части.

Заключение. Конечной мерой эффективности добавки в любом случае является экономическая целесообразность их применения с тем или иным расходом. Для этой цели можно использовать, например, методику [16], когда сравнение затрат по различным вариантам смеси проводится на основе расчетного срока службы слоя дорожной конструкции.

В технологии производства и применения эмульсионно-минеральных смесей для устройства конструктивных слоев дорожных одежд есть ряд нерегламентированных надлежащим образом вопросов, которые сдерживают развитие данной технологии. Одним из первых шагов на пути совершенствования дорожно-строительных материалов данного типа является развитие нормативной базы в части применения в их составе добавок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пособие по приготовлению и применению битумных дорожных эмульсий (к СНиП 3.06.03-85). – Введ. 01.03.1998. – М.: Стройиздат, 1989.
2. Смесей органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства: ГОСТ 30491-97. – Введ. 01.03.1998. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 1998.

3. Автомобильные дороги. Правила устройства покрытий и оснований из эмульсионно-минеральных смесей: ТКП 306(02191)-2011. – Введ. 01.06.2001. – Минск: Департамент «Белавтодор», 2011.
4. Костова, Н.З. К вопросу о механизме взаимодействия катионных битумных эмульсий с минеральными материалами / Н.З. Костова, И.А. Плотникова, Э.М. Рвачева // Труды СоюздорНИИ. – М.: СоюздорНИИ, 1977. – Вып. № 100. – С. 93–107.
5. Bitumen Emulsion / under the coordination M. Сyna, M.-F. Ossola // RGRA, USIRF, Routes de France, SFERB. – Paris. – 2008. – С. 225–226.
6. Вавилов, П.В. Смеси эмульсионно-минеральные. Методы подбора состава и испытаний. Технические требования и свойства. Обзорная информация / П.В. Вавилов, С.Е. Кравченко, Н.В. Радьков; Гос. предприятие «БелдорНИИ». – Минск, 2012. – С. 4–10.
7. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112-98. – Введ. 01.01.99. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 1999.
8. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459-96. – Введ. 01.07.98. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 1997.
9. Eckmann, B. Characterisation of cold mixes with regard to workability and cohesion build-up / B. Eckmann, S. Le Vec, D. Lesueur, C. Le Roux, Yv. Brion // RGRA. – 2002. – January, № 802.
10. Рекомендации по повышению усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: ДМД 02191.2.042-2010. – Введ. 01.02.2011. – Минск: Департамент «Белавтодор», 2010.
11. Рекомендации по определению динамического модуля упругости асфальтобетона методом неразрушающего динамического импульса: ДМД 02191.2.044-2011. – Введ. 01.03.2011. – Минск: Департамент «Белавтодор», 2011.
12. Кравченко, С.Е. К вопросу о методике подбора состава эмульсионно-минеральных смесей, оценки свойств и прогнозирования сроков формирования дорожного бетона на их основе / С.Е. Кравченко, П.В. Вавилов // Перспективные направления проектирования, строительства и эксплуатации дорог, мостов и подземных сооружений: материалы междунар. науч.-практ. конф., посв. 90-летию Белорусского нац. техн. ун-та, Минск, 21–22 окт. 2010 г. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 76–84.
13. Осадок фильтрационный: ТУ РБ 37602662.630-99. – Введ. 20.08.1999. – Минск: РУП «НПЦ НАН по продовольствию», 1999.
14. Исследование, совершенствование составов, технологии получения и применения эмульсионно-минеральных смесей с ускоренным сроком формирования: отчет о НИР (заключ.) / Гос. предприятие «БелдорНИИ». – Минск, 2009. – 92 с. – № ГР 20071425. – Арх. № 1113.
15. Прочность и долговечность асфальтобетона / под ред. Б.И. Ладыгина и И.К. Яцевича. – Минск: Наука и техника, 1972. – 286 с.
16. Рекомендации по подбору составов асфальтобетонных смесей по асфальтовяжущему: ДМД 02191.2.051-2012. – Введ. 01.03.2012. – Минск: Департамент «Белавтодор», 2012.

Поступила 05.06.2015

CLASSIFICATION AND EFFICIENCY CRITERIA OF ADDITIVES APPLICATION FOR COLD ASPHALT EMULSION MIXES

P. VAVILAU, S. KRAVCHENKO

The article considers the additives use for cold asphalt emulsion mixes (CAEM). The main part of the article proposes and justifies the classification of CAEM additives according to their functional purpose (the main purpose of additive): increasing of strength, water resistance, durability, accelerating curing and technological modifiers. Depending on the purpose the criteria of technical efficiency of additive using are presented. For each criteria provided the methods determining one or more quality indicators. The quality indicator changing is indicator of additive efficiency. There is provided the formula determining the efficiency of CAEM curing period reduction additives. As an example provided efficiency calculation and evaluation of some additives for CAEM. The conclusion states that proposed classification and criteria give base to purposive regulation of cold asphalt emulsion mixture compositions and their properties.

UDC 666.972

**FEATURES OF THE MODIFIED CONCRETE STRENGTH
IN CLIMATIC CONDITIONS OF THE MIDDLE EAST COUNTRIES****M. TLAYSS, A. BAKATOVICH**
(*Polotsk State University*)

Discusses the results of the study to determine the effects of climatic factors in the Middle East countries on the strength of concrete. It was found complex positive influences on strength when increased the temperatures and humidity at the stage of curing concrete, which means allowing to increase the strength of concrete. The experiments were carried out on the modified concrete by superplasticizers that based on sulfonated naphthalene formaldehyde compounds, including applied in the Middle East. Production samples of concrete, stored and tested them is in according to operating normative documents in territory of Belarus and the American standards.

Introduction. Modern technologies are based on the use of superplasticizers, as their use provides constructions with high running qualities. To meet the requirements of concrete motility to slow the process of cement hydration in hot climates it is advisable to use superplasticizers as separate supplement or to get her with ardeningretarders.

Superplasticizers belong to additives regulating the qualities of concrete mixtures according to ASTM C 494, BS 5075 and EN 934-2 classification and to the first group due to extremely high dilution effect of concrete mixtures without strength decrease at all stages of the test.

The most widely used additives based on sulfonated naphthalene formaldehyde compounds, Agiplast and Chroso fluid (France), Cormix (United Kingdom), Lomar D and PSP (USA), Mighty (Japan), Fluimax (Italy), Sikament (Sweden) and complexes there of belong to the first group. Superplasticizers are introduced into concrete mixtures in the form of water solutions of working or high concentration – additive content equals to 0.7...1.5 % of the weight of cement, which makes the motility of concrete mixture by 3...4 times higher than the motility of the test composition and reduces the water content of concrete 15...25 % along side with the increase of its compressive strength 15...20 % [1].

C-3 additive is the most widely produced in CIS countries. It is a synthetic substance derived from polycondensated products of naphthalene sulfonic acids and formaldehyde. Superplasticizer in a rate from 0.35 to 0.7 % of the weight of cement, makes it possible to produce highly movable, workable concrete mixtures from 2...4 to 20...22 cm without decrease of its strength. It can also be used to reduce the flow of water in concrete to increase its strength [2].

Organic superplasticizers CF110 (according to ASTM C 494 – type F) based on naphthalene polymer and CF92 (according to ASTM C 494 – type G) based on naphthalene sulfonate in combination with retarder at a rate from 0.5 to 0.6 % of dry matter by the weight of cement. These additives are widely used in the Middle East. Typical dosages of superplasticizers, used to increase the workability of a concrete mixture, are 1...3 liters of additive per cubic meter of concrete, if they contain a liquid superplasticizer about 40 % of active substance [3; 4]. Superplasticizers CF110 (type F) and CF92 (type G) are manufactured by «SODAMCO-WEBER COMPANY» Beirut (Lebanon). The company «SODAMCO-WEBER COMPANY» is one of the leaders in the manufacturing of chemical additives for various purposes in the cement and concrete in the Middle East.

Climate, temperature, humidity as well as modifying additives have a significant influence on the qualities of concrete mixture and concrete. The resulted natural factors render significant influence on motility of concrete mixture at the time of placing in the formwork after transportation and properties of the concrete during its curing after placing [5].

The study of temperature and humidity influence on concrete mixtures and concrete during their production and their treatment is extremely important for the Middle East. A proper way of concrete treatment provides its strength and gives lots of economic benefits, which is the key argument in building.

The procedure of the study. The effect of additives on the properties of concrete mixtures and concrete is studied in accordance with the provisions of the GOST 24211 [6], ASTM C 494 [3; 7]. The motility of concrete mixture has been determined using a standard cone on STB 1035 [8].

The compressive strength of concrete explored according to the procedure of GOST 10180 [9]. The samples before the strength test were stored in the chambers at temperatures $+20 \pm 2$ °C and $+35 \pm 2$ °C with humidity 60...65 %, and more than 95 %, also in water. Determine the average density of concrete in according to GOST 12730.1 [10].

Experimental part. The first stage of the experiment, investigated the effects of superplasticizers on the basic properties of concrete mixtures and concretes, including manufactured concrete mixtures and molded samples of concrete with reduced water-cement ratio. The study was carried out using Portland cement CEM I 42.5 H of 350 kg per 1 m³. GOST and ASTM methods were applied to identify the properties of concrete mixtures and concrete under different humidity conditions, storage of samples. The study of the climatic conditions of the Middle East has allowed to establish significant differences in indicators of humidity, even within the same country, for example Lebanon, which depends on season, time of day, relief place, location relative to sea, etc.

The first trial of concrete samples according to the GOST method is stored in a special chamber with temperature of $+20 \pm 2$ °C and humidity of 95...98 %. The density of concrete ranges between 2444...2449 kg/m³. The results are summarized in table 1.

Table 1

The physical and mechanical characteristics of the concrete mixture and concrete

Number of sample	Type of admixtures	Consumption admixtures, %, of the weight of cement	W/C	Mobility, cm	Compressive strength, MPa, at the age of	
					7 days	28 days
1	Without admix.	–	0.55	4...5	24.4	30.5
2	Superplasticizer C-3	0.6	0.55	20...21	24.4	30.3
3	Superplasticizer CF110 (type F)	0.5	0.52	21...22	24.3	30.2
4	Superplasticizer CF92 (type G)	0.5	0.52	21...22	26.7	33.4

Superplasticizer C-3 was added in a portion of 0.6 % of the weight of the cement, which increased the mobility of concrete mixture to 20...21 cm. When using superplasticizers CF110 (type F) and CF92 (type G), similar performance was achieved on mobility of concrete by adding additives with the amount of 0.5 % of the weight of the cement. The density of control composition and experimental concrete samples ranges between 2444...2449 kg/m³. It should be noted that using less additives of CF110 (type F) and CF92 (type G) (compositions 3, 4) slightly reduced water consumption, compared with the composition 2.

Using superplasticizers allows to increase the mobility of the concrete mixture 4...5 times compared to the control composition and at the same time get a full-strength concrete at the age of 7 and 28 days.

According to ASTM method, the samples are stored in water until the strength test is made. To provide such conditions, the formwork is not removed from the structures for two weeks with ensuring permanent spraying structures by water or making a water ponding on the surface of structure. Table 2 shows the results of study on the basic characteristics of concrete mixture and concrete.

Table 2

The physical and mechanical characteristics of the concrete mixture and concrete

Number of sample	Type of admixtures	Consumption admixtures, %, of the weight of cement	W/C	Mobility, cm	Compressive strength, MPa, at the age of	
					7 days	28 days
1	Without admix.	–	0.55	4...5	27.2	37.6
2	Superplasticizer C-3	0.6	0.55	20...21	24.9	33.6
3	Superplasticizer CF110 (type F)	0.5	0.52	20...21	29	35.8
4	Superplasticizer CF92 (type G)	0.5	0.52	19...20	30	37.2

After storage in water, concrete strength indicator with admixture C-3 (composition 2) at the age of 7 days of control composition, values below by 2.3 MPa. For concrete that contains superplasticizer of CF110 (type F) and CF92 (type G) (compositions 3, 4), the strength values are slightly higher than the indicator of control composition ranging from 1.8 to 2.8 MPa, respectively. In this case, the strength of composition 4 exceeds by 20 % the value of composition 2.

At the age of 28 days, strength values of composition 1 and 4 are almost equal, and the strength of composition 3 is 1.8 MPa less. It should be noted that the strength value of concrete with the additives of C-3 is less than 10 % compared to the value of control composition 1.

The comparison of the results of strength tests on samples, according to the methods GOST and ASTM revealed that at the age of 7 days, the control composition 1 and compositions 4, 6 with additives CF110 (type F) and CF92 (type G) (table 2) have a strength of 2.8...4.7 MPa higher than the strength values of similar compositions in Table 1, which are 11...19 %. It should be noted that the strength values of composition 2 in tables 1 and 2 are equal.

At the age of 28 days, the strength value of control composition 1 depending on storage conditions differs by 7.6 MPa, i.e. the strength value increases by 23 % during storage the samples in water. The strength of compositions 2, 4 with increased mobility of concrete mixture during storage in water, slightly increases by 11 % higher than the strength values of samples which stored at the chamber, while for the composition 3, the growth of strength is 19 %.

As a result of comparative tests (tables 1 and 2), the storage of the samples in water is more intensive than when in the chamber, this dependence is particularly evident during the period from 7 to 28 days, regardless the presence of plasticizing additives in the concrete composition.

It should also be noted that in depending on the hardening conditions and the type of superplasticizer, kinetics set of concrete strength is different.

Manufacture and storage of concrete samples at a temperature of $+20 \pm 2$ °C and humidity of 60...65 % refers to the basic temperature and humidity conditions in Lebanon and Qatar, which influences on the strength of concrete. Such temperature and humidity regime correspond to winter climatic conditions in Beirut city ($+16$ °C of temperature and 55...60 % of humidity), and in Doha city ($+22$ °C of temperature and 52 % of humidity). The results of study are shown in table 3.

Table 3

The physical and mechanical characteristics of the concrete mixture and concrete

Number of sample	Type of admixtures	Consumption admixtures, %, of the weight of cement	W/C	Mobility, cm	Compressive strength, MPa, at the age of	
					7 days	28 days
1	Without admix.	–	0.55	4...5	23	29.7
2	Superplasticizer C-3	0.6	0.55	20...21	19.3	25.2
3	Superplasticizer CF110 (type F)	0.5	0.52	21...22	23.7	28.1
4	Superplasticizer CF92 (type G)	0.5	0.52	21...22	23.2	26.5

The strength indicators of concrete containing superplasticizers CF 110 (type F) and CF92 (type G) (compositions 3, 4) and control composition 1 at the age of 7 days are almost equal – 23...23.7 MPa, and for concrete with additive C-3 (composition 2) the indicator of strength lower than the indicators of control composition 1 and compositions 3, 4 by 3.7...4.4 MPa, which are 16...19 %.

In a comparison of the results obtained by determine the strength when storing samples as described GOST (storage in chamber) with temperature $+20 \pm 2$ °C and humidity 60...65 %, it is established that at the age of 7 days the indicators of concrete strength of compositions 2 and 4 (see table 3) is less than the indicators of similar compositions in table 1 by 5.1...3.5 MPa, which are lower by 21 and 13 %, respectively. It should be noted that the indicators of concrete strength of compositions 1 and 3 in tables 1 and 3 are almost equal.

Similar tendency for the experimental compositions strength of concrete is observed at the age of 28 days.

As a result of analysis table 1 and 3, it can be concluded that the concrete strength indicator is higher when the samples are stored under humidity of 95...98 % than of 60...65 %. This dependence is noted at 7 and 28 days regardless to the presence of plasticizer additives in the concrete composition. Also, it should be noted that the decrease of humidity from 95...98 % (table 1) to 60...65 % (see table 3) has a negative influence on concrete strength of compositions 2, 3 and 4. Compositions with superplasticizer C-3 and additive CF92 (type G) are the most influenced when decreasing the humidity from 95...98 % to 60...65 %.

Comparing the test results (table 2 and 3), it is found that the humidity conditions of samples storage have a significant impact on the strength of concrete. The decrease of strength is observed in compositions 2, 3 and 4 at the age of 7 days, which is 22, 18 and 23 %, respectively with raised the mobility of concrete mixture. According to test results at the age of 28 days, has been an increase indifference between the values of concrete strength compared with the indicators at the age of 7 days. The decrease in strength of control composition (see table 3) is 21 %. The indicators of compositions 2, 3 and 4 differ by 25, 22 and 29 % respectively.

Analysis of the data of tables 2 and 3 shows that the compositions containing superplasticizers are the strongest influenced by humidity conditions during their storage. For such a decrease in strength of concrete ranges between 22...29 %.

In the second stage of research to study the influence of humidity conditions on hardening concrete was carried out at ambient temperature of $+35 \pm 2$ °C. This temperature is dominant in several regions of the Middle East in the summer times. The individual trial of concrete is stored at a chamber with humidity of 95...98 % at an ambient temperature of $+35 \pm 2$ °C. The results of this study are shown in table 4.

Table 4

The physical and mechanical characteristics of the concrete mixture and concrete

Number of sample	Type of admixtures	Consumption admixtures, %, of the weight of cement	W/C	Mobility, cm	Compressive strength, MPa, at the age of	
					7 days	28 days
1	Without admixtures	–	0.55	4...5	27.8	34.7
2	Superplasticizer C-3	0.6	0.55	20...21	29.1	33.6
3	Superplasticizer CF110 (type F)	0.5	0.52	21...22	31.6	36.2
4	Superplasticizer CF92 (type G)	0.5	0.52	22..23	33.1	38.3

After 7 days storage at a temperature $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, the value of concrete strength with additive C-3 (composition 2) insignificantly more than the value of control composition. At the same time the strength of the compositions 3, 4 are higher by 14 and 19 % respectively.

At the age of 28 days, the growth of strength of control composition equal 25 % with respect to the indicator at the age of 7 days. The strength of composition 4 with superplasticizer CF 92 (type G) is 10 % higher than the indicator of composition 1, and compositions 2, 3 is approached with the value of control composition.

It should be noted that the kinetics strength in compositions with additives is slightly lower than that the control composition. It means that the increase of strength in concrete at the age of 28 days values by 14...18 % with respect to the values at the age of 7 days.

Analysis of the data in tables 1 and 4 allowed to establish a beneficial effect on the kinetics strength when increased the temperature till $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, this indicator corresponds with summer conditions in Beirut and winter in Mecca. At the age of 7 days, the increase of strength in compositions with additives values by 19...30 % higher than those in table 1.

During the tests at the age of 28 days, the greatest effect of increasing the strength concerning 7 days at temperature storage of samples $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ is achieved on the concrete with additives CF110 (type F) and CF92 (type G) and values by 20 and 15 % respectively.

Next, we will review the results to determine the strength of the samples stored in water in according to ASTM method. The results of studies on the basic characteristics of concrete mixture and concrete are shown in table 5.

Table 5

The physical and mechanical characteristics of the concrete mixture and concrete

Number of sample	Type of admixtures	Consumption admixtures, %, of the weight of cement	W/C	Mobility, cm	Compressive strength, MPa, at the age of	
					7 days	28 days
1	Without admixtures	–	0.55	4...5	30.5	44.5
2	Superplasticizer C-3	0.6	0.55	19...20	29.8	41
3	Superplasticizer CF110 (type F)	0.5	0.52	19...20	32.8	41.6
4	Superplasticizer CF92 (type G)	0.5	0.52	21...22	36.3	47.9

As a result, storage of samples by the method of ASTM (in water) at a temperature $+35 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ shows that the strength indicators at the age of 7 days for compositions 1 and 2 virtually identical. At the same time the strength of composition 4 with additives CF92 (type G) exceeds the value of control composition by 19 %.

At the age of 28 days the strength indicators of compositions 2, 3 slightly less by 2.9...3.5 MPa compared with composition 1, and the strength of composition 4 exceeds the control composition by 3.4 MPa. At the same time the strength value of composition with additive CF 92 (type G) is 17 % higher than compositions 2 and 3.

During the study of the kinetics strength of concrete, is noted that the increase of strength in control composition at the age of 28 days is 46 % with respect to the indicator at the age of 7 days. The indicator corresponds to 27...38 % for the compositions that contain additives.

A comparative analysis with the results of table 2 shows that the increase in strength in the compositions in table 5 at the age of 7 days is higher by 12...21 %, and 16...29 % at the age of 28 days.

Thus, storage of samples by ASTM method at a temperature $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ can improve the strength characteristics of concrete up to 29 % by depending on the applied additives – superplasticizer.

Considering various humidity conditions of storage (table 4 and 5), it should be noted that at 7 days, the strength of samples which stored in water, is slightly increases by 0.7...3.2 MPa compared with concrete at a relative humidity of 95...98 %.

The essential difference is observed at the age of 28 days. So the strength of control composition 1 is increased by 28 % when stored the sample in water. The strength increases in composition 2 with additive C-3 by 22 %. Strength of compositions 3 and 4 (table 5) exceeds the same compositions in table 4 by 15 and 25 % respectively. Thus, the storage of samples in water influences positively on the kinetics of growth of strength at elevated temperatures.

The next trial of concrete samples stored at a temperature $+35 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and humidity 60...65 %, which is similar to the climatic conditions of Beirut in the summer (temperature $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$, humidity 55...60 %). Table 6 shows the results of studies on the basic characteristics of concrete mixture and concrete.

Analysis of the strength results at the age of 7 days shows that the control composition and compositions that contain additives insignificantly differ by 0.3...1.6 MPa. The same tendency is observed in 28 days. It is noted a slight increase in strength at the age of 28 days is 8...12 % with respect to the values at the age of 7 days.

Thus, when the humidity is 60...65 %, concrete gains the basic strength during the first 7 days. The inthegrowth of strength significantly slows down.

Table 6

The physical and mechanical characteristics of the concrete mixture and concrete

Number of sample	Type of admixtures	Consumption admixtures, %, of the weight of cement	W/C	Mobility, cm	Compressive strength, MPa, at the age of	
					7 days	28 days
1	Without admixtures	–	0.55	4...5	28.6	31.3
2	Superplasticizer C-3	0.6	0.55	20...21	27.5	30.9
3	Superplasticizer CF110 (type F)	0.5	0.52	21...22	28.9	32.2
4	Superplasticizer CF92 (type G)	0.5	0.52	21...22	30.2	32.7

By comparing the strength values with table 4 is observed insignificant decrease in strength of compositions 2, 4 at the age of 7 days at a humidity of 60...65 %. In the subsequent period of storage before the age of 28 days, increase in strength is more intensive in the compositions 1, 4 (table 4) than in those in table 6. So the increase of strength of control composition 1 in table 4 is 14 %, but in table 6 is 9 %. For composition 3 that contains superplasticizer CF110 (type F) the increase in strength equal 20 % and 11 % respectively, and for the composition 4...16 % and 8 %, i.e. exceeds 2 times.

A comparative data of tables 5 and 6 reveals that at the age of 7 days, the strength of compositions 1 and 2, with a humidity of 60...65 % is respectively lower by 1.9 and 2.3 MPa. However, for compositions 3, 4 these values are more significant and equal 14 and 19 %, respectively.

At the age of 28 days, the strength indicators of compositions in table 5 significantly higher than the values of concrete samples in table 6. For control composition 1, the increase in strength during storage in water is 42 %. The strength of compositions with additives C-3 and CF110 (type F) differs by 33 and 29 %, respectively. The greatest increase in strength of samples which stored in water more than of those that stored under a humidity of 60...65 %, especially in composition 4 which is 46 %. Thus, improper humidity harms the strength of concrete and negatively influences the bearing properties of a construction (the temperature conditions equal to 35 °C and the rate of strength decreases by 40...50 %).

The analysis of tables 3 and 6 revealed that despite the humidity of 60...65 % when stored samples with raising the temperature till +35 °C provides a positive effect on the growth of concrete strength.

So at the age of 7 days, the strength of composition 1 is 24 % higher. The strength for concrete with additives CF110 (type F) and CF92 (type G) increases by 22 and 30 % respectively. The greatest effect in increasing the strength is observed in composition that contains additive C-3 and equal 42 %.

As a result of studies, a considerable influence of humidity on the strength of concrete samples has been observed, it also be noted that the raise of temperature up to 35 °C has a positive effect on the strength indicators.

In some cases, an increase in temperature helps to compensate the negative impact on the strength of concrete during storage samples at low humidity.

Conclusion

According to the results of analysis represented in tables 1–6:

1) when the samples were stored in water in according to ASTM method, the increase in strength is 11...19 % higher than of those that were cured in a special chamber in according to GOST method. Such a tendency is extremely high from 7 to 28 days regardless to the presence of plasticizer additives in concrete;

2) the decrease of humidity from 95...98 % to 60...65 % negatively influences on the modified concrete strength. At the age of 7 days the strength decreases to 13...21 %, and at the age of 28 days – 8...26 %. It is observed that the modified concrete strength at the age of 28 days is 22...29 % lower than that of those were stored in water;

3) raise the temperature to +35 °C positively influences on the samples. So when stored the samples in humid conditions as described GOST the increase of strength at the age of 28 days is 15...20 %, and as described ASTM – 16...29 % compared with the samples stored under a temperature of +20 °C. In spite of low humidity, 60...65 %, the increase of concrete strength is more effective under a temperature +35 °C than under +20 °C, which is 24...42 %;

4) in according to GOST and ASTM, the analysis of climatic characteristics of the Middle East and the storage methods of concrete samples before testing them allowed to determine the range of variation in the parameters of temperature and humidity with maximum approximation to natural of weather in Lebanon, Saudi Arabia and Qatar. It is found that the increase combined of temperature to +35 °C and humidity up to 100 % shows a positive effect on the strength of the modified concrete and concrete without additives. The increase of concrete strength which stored under a temperature of +20 °C and humidity of 60...65 % values from 50 to 80 %;

5) the greatest increase of strength is achieved regardless to the temperature when concrete samples are stored in water, but such conditions of hardening on construction sites in the Middle East countries are possible due to preservation of structural elements in the formwork up to 10...14 days, which entails reduction in the turnover of the formwork and requires the use of larger volumes of formworks for each object under construction, and thus high financial costs for construction;

6) a significant effect of using superplasticizer, allows to increase the motility of modified concrete mixture by 4...5 times, while maintaining the required strength of concrete. Superplasticizers CF110 (type F) and CF92 (type G), according to the results of study of their effect on concrete mixtures and concrete compared to superplasticizer C-3, are more effective and allow to get equally movable mixtures by using fewer additives. Concretes modified by superplasticisers CF110 (type F) and CF92 (type G), shows a less sensitivity with temperature and humidity conditions of hardening and growth of strength compared to concrete that contains additive C-3. At all stages of the study, compositions with additives CF110 (type F) and CF92 (type G) had a higher strength indicators than those without additives and with superplasticizer C-3.

REFERENCES

1. Механизм действия пластификаторов [Электронный ресурс] // Добавки, регулирующие свойства. – Новгород, 2007. – Режим доступа: <http://www.baum.ru>. – Дата доступа: 01.10.2014.
2. Технологический регламент производства разжижителя C-3 / Новомосковский завод органического синтеза. – М., 1981. – 300 с.
3. Technical Data Sheet for Properties of Admixtures / SODAMCO-WEBER COMPANY, P.O. Box. 55–44. – Beirut, 2014. – 2 p.
4. ASTM C 494/C 494M. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, 1999. – 9 p.
5. Куприянов, Н.Н. Исследование влияние относительной влажности среды при тепловой обработке на формирование структуры и свойства бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08 / Н.Н. Куприянов. – М., 1974. – 24 с.
6. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия: ГОСТ 24211-2003. – Взамен ГОСТ 24211-91; Введ. 01.03.2004. – М.: Межгосударств. Стандарт Рос. Федерации, 2004. – 18 с.
7. Whiting, D. Effects of High-Range Water Reducers on Some Properties of Fresh and Hardened concretes, Research and Development Bulletin RD061 / D. Whiting, 1979. – 15 p.
8. Смеси бетонные. Технические условия. Методы определения удобоукладываемости: СТБ 1035-96. – Взамен ГОСТ 10181.1-81; Введ. 01.05.2009. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2009. – 17 с.
9. Методы определения прочности на сжатие по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. Бетоны. – Взамен ГОСТ 10180-78; Введ. 01.01.91. – М.: Стройиздат, 1990. – 45 с.
10. Бетоны. Методы определения плотности: ГОСТ 12730.1-78. – Взамен ГОСТ 12730-67; Введ. 01.01.80. – М.: Стройиздат, 1980. – 5 с.

Поступила 05.06.2015

ОСОБЕННОСТИ НАБОРА ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ БЕТОНАМИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СТРАН БЛИЖНЕГО ВОСТОКА

***М. ТЛАЙСС; канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)***

Рассматриваются результаты исследований по установлению влияния климатических факторов стран Ближнего Востока на прочность бетона. Установлено комплексное положительное влияние повышения влажности и температуры на этапе ухода за бетоном на прочность, позволяющее значительно повысить прочность бетона. Эксперименты проводили на бетонах, модифицированных суперпластификаторами на основе сульфированных нафталинформальдегидных соединений, в том числе применяемых и на Ближнем Востоке. Образцы бетона изготавливали, хранили и испытывали согласно действующим нормативным документам на территории Беларуси и по американским стандартам.

УДК 691.316

**ЭФФЕКТИВНЫЕ СТЕНОВЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ЭКОЛОГИЧНОСТИ****А.И. ПИКУЛА***(Брестский государственный технический университет)*

Рассматриваются основные предпосылки для развития направлений по созданию и применению теплоизоляционных стеновых материалов с меньшим по сравнению с традиционными негативным влиянием на экологию. Показаны недостатки полимерных теплоизоляционных материалов, а также материалов на цементно-известковом вяжущем различных способов твердения. Приведен вариант расчета времени окупаемости наиболее распространённых теплоизоляционных материалов по их средневзвешенной стоимости, стоимости топливно-энергетических ресурсов, среднемесячным температурам для рассматриваемого отопительного сезона. Представлены варианты разработанных экологических составов композитных теплоизоляционных материалов на альтернативных вяжущих. После адаптации к местным сырьевым ресурсам конкретного региона эти материалы будут перспективны для экологичного каркасного домостроения.

Сегодня, учитывая всё возрастающее давление на природные процессы вследствие развития технологий и так называемого пассивного эволюционирования человечества, экологический след становится все более видимым и зачастую необратимым.

Экологичность любых материалов не является статическим, не изменяющимся во времени свойством, а показывает лишь степень или ступень изученности данного направления человеком в сложившихся условиях развития цивилизации. Например, обычный цемент ещё в начале прошлого столетия считался экологичным материалом, и лишь по мере изучения всего круговорота веществ и потоков энергии в природе, экологического мониторинга полного жизненного цикла материала его статус сменился на негативный. Строительство – одна из наиболее энергоёмких сфер человеческой деятельности, локомотив экономики большинства государств и вместе с этим источник большей части неблагоприятных экологических последствий для мировых и локальных экосистем.

Основная часть. В настоящее время наиболее эффективными из разработанных и применяемых в строительстве теплоизоляционных материалов являются полимерные. Возможность получения очень низких плотностей за счёт заключения воздуха в микропоры с тончайшими перегородками и снижающиеся цены (как результат развития промышленного производства) делают эти материалы на первый взгляд лидерами в применении. Однако главное препятствие на пути их повсеместного использования в развитых странах – низкая экологичность сырья, производства, самого материала либо продуктов его разложения. Причём в случае именно с полимерными материалами последствия их производства либо применения начинают проявляться спустя длительное время. Это связано с токсическим действием микродоз, определение влияния которых является дорогостоящим и сложным. Поэтому многие из полимеров или добавок к ним, применяемых сегодня при производстве строительных материалов и изделий, имеют высокий риск (уже доказанный либо изучаемый) негативного влияния на человека и должны применяться с высокой осторожностью. Например, наиболее токсичные, запрещённые в некоторых странах, но до сих пор применяемые пластификаторы для пластмасс на основе фталатов, добавки антипирена гексабромциклододекан [1; 2], как и любой полимер, имеют множество вариантов негативного воздействия на экологию, а следовательно и на человека. Полностью безопасных полимеров нет, поэтому важен вопрос их изучения.

Другими, менее эффективными, но широко распространёнными и недорогими теплоизоляционными материалами являются ячеистые бетоны на основе цемента либо извести автоклавного твердения. Эти материалы оказывают более предсказуемое влияние за счёт гораздо меньшей токсикологической активности, однако влияют на экологию большим количеством загрязняющих выбросов, сопровождающих их жизненный цикл (например, для теплоизоляции 1 м² стены до стандартных значений ($R = 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) необходимо 2,5 кг полистирола плотностью 20 кг/м³ либо 250 кг газосиликата с плотностью 550 кг/м³), имея так называемый большой углеродный след. Основной загрязнитель – цемент, при изготовлении 1 тонны которого в атмосферу выбрасывается от 500 до 1000 кг CO₂ и других газов в зависимости от технологии производства. Соответственно, составляемая для них экологическая оценка жизненного цикла LCA (Life-cycle assessment) в соответствии с европейскими нормами DIN ISO 14040 [3] и базой данных Ecoinvent [4] не является удовлетворительной для продолжения их использования по многим показателям. Цемент содержится во многих ячеистых бетонах, его добавляют в значительных коли-

чествах (до 25 %) и в газосиликат для упрощения технологии производства и ускорения набора пластической прочности сырцом, что делает эти материалы опасными для экологии, учитывая всю технологию их производства.

При оценке воздействия жизненного цикла LCA таких материалов может использоваться метод CML [5]. Метод учитывает различные воздействия на окружающую среду с соответствующими экологическими показателями эффективности. Для такого сравнения выделяются два основных экологических показателя:

1) GWP (потенциал глобального потепления, эквивалент кг CO₂) учитывает все выбросы газов (CO₂, CH₄, N₂O и др.), которые содействуют парниковому эффекту;

2) ADP (абиотический потенциал истощения ресурсов, кг эквивалент Sb (кг)) используется как индикатор потребления природных, неживых, невозобновляемых ресурсов (например, металлические руды, сырая нефть).

В зависимости от вида строительных материалов в экологический баланс также включаются разные наборы показателей, таких как подкисление, экологическая токсичность, эвтрофикация, ионизирующее излучение, разрушение озонового слоя и др.

Общим фактором для двух вышеперечисленных групп материалов, который должен приниматься во внимание в первую очередь, является стоимость положительного эффекта (экономия энергоресурсов) при их использовании. То есть потребителю важно знать, за какое время его теплоизоляция окупится и начнёт приносить прибыль в виде сэкономленных энергоресурсов. Если принять среднюю стоимость материалов и работ по устройству теплоизоляции для Беларуси на уровне 30 у.е./м², условия теплообмена в соответствии с требованиями ТКП 45-2.04-43-2006 [6] и увеличение коэффициента сопротивления теплопередачи стены за счёт теплоизоляции на $R = 2,3 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, то при условиях отопительного периода (2014–2015 гг.) этот период может составить 19 и более лет (рис. 1). А при возможности альтернативного использования не вложенных в теплоизоляцию средств и в 2–3 раза больше. Безусловно, при таких условиях эксплуатации ограждающих конструкций возникают другие вопросы, но тем не менее этот срок заставляет задуматься о стоимости, безопасности и общей эффективности использования наиболее распространённой сегодня теплоизоляции в жилых зданиях.

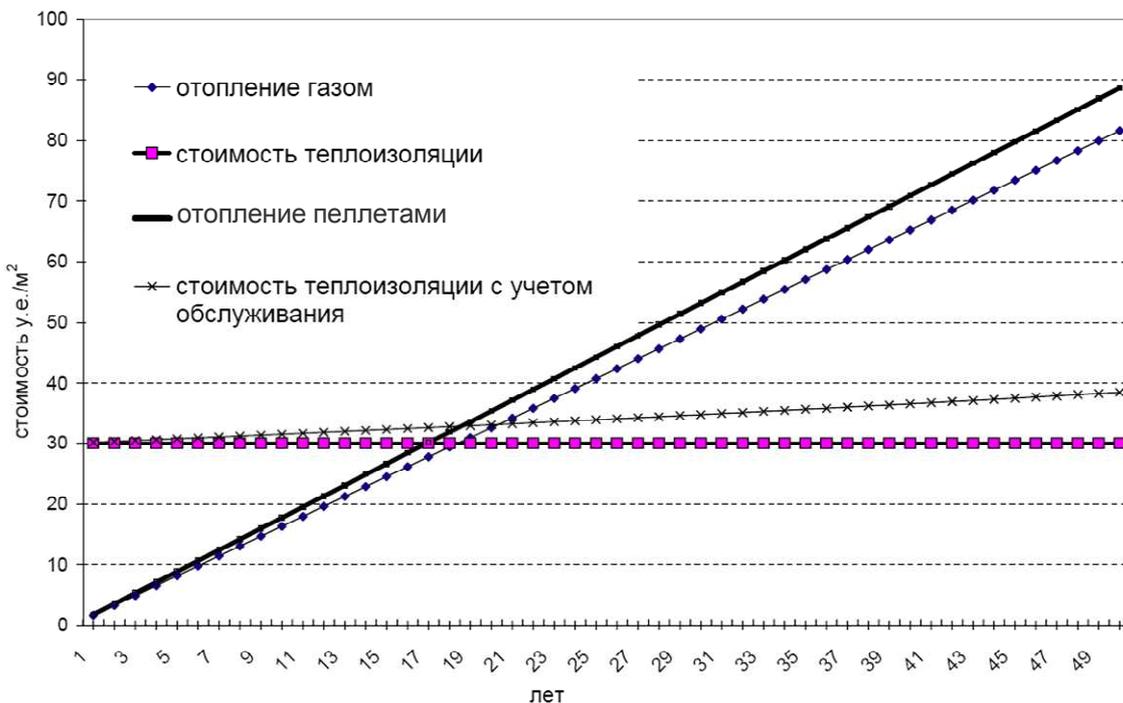


Рис. 1. Соотношение стоимости создания и обслуживания полимерной или ячеистобетонной теплоизоляции со стоимостью сэкономленных энергоресурсов при отоплении древесными пеллетами или газом

Основные направления для получения наиболее экологичных и наиболее быстро окупаемых теплоизоляционных материалов по сравнению с полимерными или ячеистыми с применением минеральных вяжущих:

- применение отходов производства;
- применение растительных волокнистых наполнителей;
- применение неавтоклавных известково-силикатных композиций или щелочно-активированных вяжущих (геополимеров).

Использование отходов производства может осуществляться в местах, где имеются побочные вещества различных производств, содержащие в значительном количестве Al, Si, Ca, щёлочь. Это отходы химических производств, воздухоочистки, водоочистки, шлаки, золы, нетехнологичные глины, побочные горные породы, отходы стеклообработки, отходы керамической промышленности, силикатных производств. А также щелочестойкие волокнистые полимерные материалы, минеральные волокна, отходы органических волокон. Применение таких материалов в строительстве может идти по двум направлениям:

- 1) пассивное (утилизация отходов, изменение физических свойств с незначительным влиянием на механические характеристики);
- 2) активное (участие в химических процессах как вяжущее со значительным изменением физико-механических свойств, придание специальных свойств).

Первое направление в редких случаях позволяет использовать хотя бы половину потенциала материалов либо вложенных в них ресурсов, поэтому основным современным направлением является именно использование их в качестве активных компонентов, например, как одних из компонентов, участвующих в процессах твердения (вяжущих).

В качестве растительных волокнистых наполнителей может использоваться рубленая солома злаковых культур ржи (наиболее стойкая), пшеницы, овса и ячменя, являющаяся многотоннажным отходом производственной деятельности сельскохозяйственных предприятий Республики Беларусь, которые обычно заготавливают её с избытком и не успевают всю использовать. Солома представляет собой сухие стебли злаковых зерновых культур, остатки соцветий, остающиеся после обмолота, а также стебли льна и других растений, освобождённые от листьев, соцветий, семян.

Применение щелочно-активированных вяжущих или геополимеров – наиболее перспективное направление строительного материаловедения, особенно в плане экологии. Это вещества, производимые на основе различных алюминий- и кремнийсодержащих сырьевых композиций или отходов производств (например, шлак, зола), которые позволяют получать материалы, имеющие показатели, равные или даже лучше, чем у материалов на основе цементов. Причем это материалы со значительно (по отдельным показателям на 40...60 %) меньшим негативным влиянием на окружающую среду и с меньшей себестоимостью (на 10...30 %).

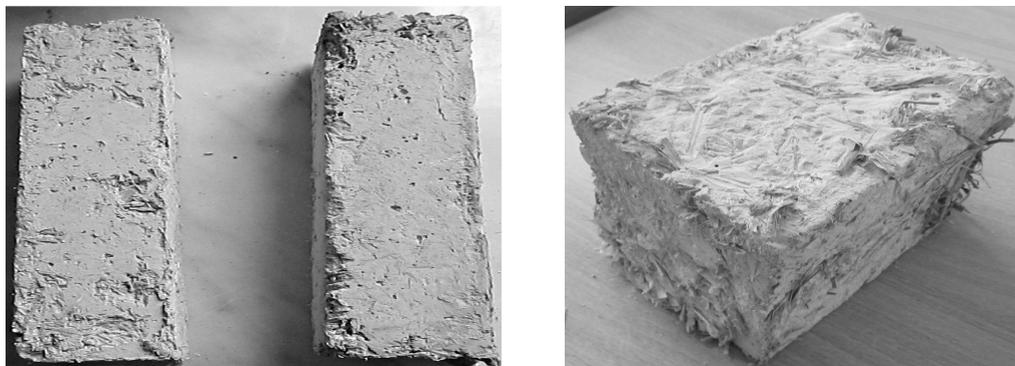
Широко представлен европейский опыт применения геополимеров. Приведём лишь небольшой список фирм, имеющих практический задел в этой области: Renotech (Финляндия); Camfil HQ (Швеция); Ryomeral (Франция); Techn. Og Geopolymer (Чешская Республика); F. Willich GmbH (Германия); BPS-Zwickau (Германия); Keraguss (Германия); MC Bauchemie (Германия) и др.

Из основных проблем создания и применения геополимеров необходимо выделить такие, как значительная усадка; большая водопотребность для создания нужной степени пластичности; крайне малые либо сильно растянутые во времени сроки твердения (в зависимости от сырья и технологии).

Однако все эти недостатки при изготовлении малопрочных теплоизоляционных материалов не являются критическими и компенсируются более высокой экологичностью и долговечностью.

В этой связи рассмотрим материалы, которые удалось получить в лабораторных и полевых условиях.

Композитный конструкционно-теплоизоляционный фибробетон с органическими фибровыми наполнителями растительного происхождения. В принципе этот материал (рис. 2) может рассматриваться как современный аналог самана (саманного кирпича), лемпача, используемого с давних времён для строительства мазанок. Саманный кирпич изготавливался из глины с примесью соломы и добавок, улучшающих свойства композита.



а)

б)

Рис. 2. Образцы из конструкционно-теплоизоляционного фибробетона с органическими фибровыми наполнителями растительного происхождения: а – изготовленные в формах; б – выпиленный из массива

В настоящее время для изготовления данного композита можно использовать адаптированные к местным ресурсам составы, содержащие глинистую суспензию либо метакаолин, известь гидратную, известь воздушную негашеную, мелкий либо молотый кварцевый песок (кремнийсодержащие мелкодисперсные отходы), костру льна и (или) рубленую солому (до 70 мм), жидкое стекло, щёлочь (при необходимости). Из технологии его производства отметим промывку, разволокнение и первичное насыщение растительных наполнителей водой с минерализатором, а также использование качественной активной извести и реакционноспособного алюминий- и кремнийсодержащего компонента (глины или метакаолина), что требует начальной оптимизации в различных новых условиях по массовому составу.

Характеристики полученного композита: плотность 600...850 кг/м³; прочность при сжатии 1,5...2,5 МПа; теплопроводность в сухом состоянии 0,16...0,21 Вт/м·°С. Этот состав конструкционно-теплоизоляционного материала характеризуется прочностью, достаточной для восприятия не только собственного веса, но и дополнительных нагрузок. Время достижения равновесной влажности в летний период 7...14 солнечных дней при толщине блоков до 25 см.

Еще одним перспективным материалом является **неавтоклавный газифибробетон на смешанном вяжущем с органическими фибровыми наполнителями**. Это более пористый по сравнению с фибробетоном с органическими фибровыми наполнителями растительного происхождения, эффективный теплоизоляционный композит (рис. 3), который также можно получить, используя вышеприведенное сырьё с добавкой газообразователя, алюминиевой пудры. Однако для закрепления начальной структуры и компенсации значительной усадки, возникающей вследствие большого водотвёрдого отношения (В/Т), в данный композит необходимо вводить небольшое количество цемента (15...20 %), что несколько ухудшает экологические показатели получаемого материала, но позволяет получить приемлемые усадочные деформации.

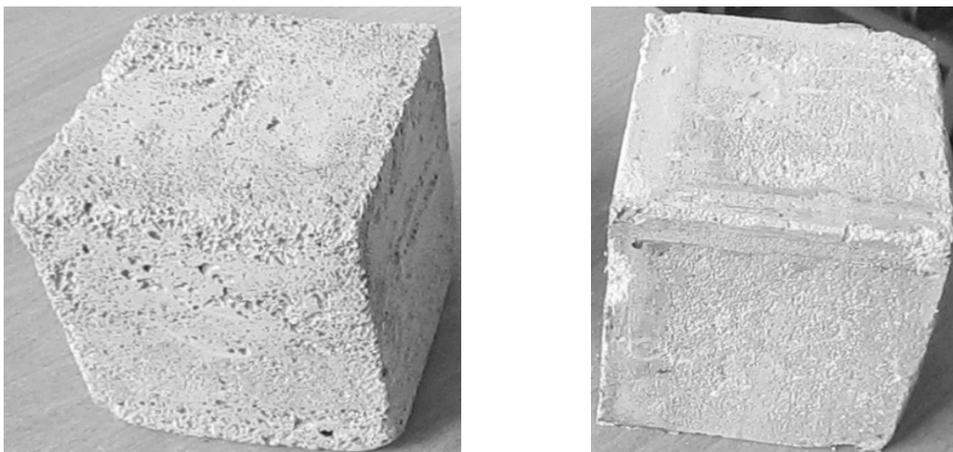


Рис. 3. Образцы из неавтоклавного газифибробетона на смешанном вяжущем с органическими фибровыми наполнителями растительного происхождения различных составов

Характеристики полученного композита:

- плотность 350...550 кг/м³;
- прочность при сжатии 0,3...0,6 МПа;
- теплопроводность в сухом состоянии 0,1...0,15 Вт/м·°С.

Этот состав характеризуется небольшой прочностью, достаточной для восприятия только собственного веса теплоизоляционного слоя. Данный материал можно использовать для изготовления стеновых не несущих блоков или монолитных конструкций, заливаемых непосредственно на объекте ограниченными по размерам захватками.

Заключение. Современное состояние производства и применения многих теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов нельзя признать удовлетворительным в плане воздействия на экологию, долговечности и экономической эффективности. Поэтому сегодня необходимо развивать технологии, позволяющие получать материалы с аналогичными характеристиками при меньшем влиянии на экологию, что обычно также уменьшает и их стоимость. Примеры полученных композитов не являются идеальными, однако после оптимизации и привязки составов к местным глинистым ресурсам и имеющимся алюминий-, кремний-, кальцийсодержащим отходам производства они могут быть отличной эффективной, экологичной и недорогой альтернативой наиболее распространенным материалам. При этом более плотный фибробетон можно использовать для внутренних слоев ог-

раждающих конструкций, повышая таким образом теплоёмкость помещений, а менее плотный газифибробетон – для наружных теплоизоляционных слоев.

Конечно, серийное производство изделий на основе таких материалов создать труднее ввиду более сложной в организационном плане технологии, требующей большего внимания и квалификации специалистов, хотя бы на начальном этапе привязки к местным сырьевым ресурсам. Однако для того чтобы последующие поколения имели в плане экологии хотя бы то, что мы имеем сейчас, необходимо перейти от описания экологических проблем к их решению, причём на самом начальном уровне любого строительного (и не только) производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC8FU-COMM-LE-HBCD-Recommend.Ru.pdf>.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.allbeton.ru/wiki/Гексабромциклододекан+характеристика+рисков/>.
3. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization: ISO 14040 (2006).
4. Ecoinvent (2010). Database. Ecoinvent version 2.1.
5. Guinée (2001): Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standards. Part 1: LCA in perspective. Part 2a: Guide. Part 2b: Operational annex. Part 3: Scientific Background. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM) and Centre of Environmental Science, Leiden, Niederlande
6. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006. –

Работа выполнялась в рамках проекта «Разработка технологии для строительства экологически чистых и энергоэффективных домов с композитными наполняемыми конструкциями» (регистрационный номер – IPBU.02.01.00-06-704/11-00), реализуемого в рамках программы трансграничного сотрудничества «Польша – Беларусь – Украина 2007-2013».

В реализации проекта принимали участие Учреждение образования «Брестский государственный технический университет» (г. Брест, Беларусь) и Высшая государственная школа им. Папы Иоанна Павла II (г. Бяла-Подляска, Польша).

Поступила 25.05.2015

EFFECTIVE WALL COMPOSITE MATERIALS WITH A HIGH LEVEL OF ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS

A. PIKULA

Today lower environmental impacts and improved thermal insulation performance of innovative composite solutions are in building construction priority. The paper studies disadvantages in the usage of polymeric insulating materials, as well as materials on cement-lime different methods of hardening binder. The results in calculating the payback time for the most widely used thermal insulating materials were introduced in accordance with their weighted average cost, fuel and energy resources cost, and the average monthly temperatures during the last heating season. The article also provides eco-friendly composite thermal insulation materials designed as an alternative to traditional cement-lime binders. When adapted to local raw material resources of a particular region the designed materials can prove to be a promising material for eco-friendly timber frame housing construction in the Republic of Belarus.

УДК 699.82:624.2

РЕМОНТНЫЕ БЕТОНЫ С ДОБАВКОЙ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ МАСЕЛ

В.А. ГРЕЧУХИН

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлена технология получения добавки из вторичных продуктов производства минеральных масел и введения её в составы ремонтных бетонов. Рассматривается влияние новой минеральной добавки на физико-механические свойства цементного камня и ремонтных бетонов. На основе результатов проведенных исследований сделан вывод, что полученная из вторичных продуктов производства минеральных масел добавка снижает водопоглощение, повышает водонепроницаемость и прочность сцепления ремонтных бетонов с бетонной поверхностью; применение ремонтных бетонов с такой добавкой позволит повысить качество ремонта мостов и путепроводов.

Введение. В период эксплуатации проезжую часть мостов и путепроводов обрабатывают составами противогололёдных материалов. При нарушении гидроизоляции они вызывают коррозию бетона и арматуры конструкций. Для поддержания их технического состояния необходимо своевременное проведение ремонтно-восстановительных работ, требующее значительных материальных затрат.

Представленная работа направлена на разработку недорогих составов ремонтных бетонов, повышающих качество ремонта мостов и путепроводов.

На нефтеперерабатывающих предприятиях для очистки масла применяют фильтры из бентонита. В результате образуется отработанная глина (ОГ) – вторичный продукт производства минеральных масел. Её запасы в районе Новополоцкого нефтеперерабатывающего предприятия составляют более 3,0 тыс. тонн [1]. Ранее, в работах [2–4] нами опубликованы результаты исследований её свойств. Установлено, что такая глина состоит из бентонита ($55 \pm 5\%$) и органической массы – ОМ ($45 \pm 5\%$).

Основные теоретические положения. При затворении водой цементные зерна частично агрегируются, в результате в затвердевшем цементном камне остаются цементные зерна, не вступившие в реакцию. При введении в цемент добавки из вторичных продуктов производства минеральных масел (далее – добавка ОГ) органическая масса, адсорбируется на поверхности цементных зерен в виде гидрофобных пленок и препятствует их комкованию при затворении водой [5]. Гидрофобные пленки замедляют скорость набора прочности на начальном этапе. Однако благодаря их сетчатому строению вода затворения проникает к цементным зернам, и набор прочности равномерно происходит по всему объему цементной системы [6].

При образовании цементного камня органическая масса адсорбируется на стенках пор и капилляров, препятствуя прониканию коррозионно-активного раствора [7; 8]. Частицы бентонита уменьшают размеры капиллярных пор и снижают количество открытых пор. При введении бентонита в цементном камне образуются дополнительные коагуляционные контакты [9].

В исследованиях использованы: цемент ПЦ 500 ДО-н, ОАО «Красносельскстройматериалы»; песок природного карьера Черкасы высшего класса с модулем крупности 2,46; щебень из плотных горных пород фракции 5...10 мм производства РУПП «Гранит» г.п. Микашевичи; вода водопроводная.

Составы ремонтных бетонных смесей приведены в таблице 1.

Таблица 1

Составы ремонтных бетонов

Составы бетонных смесей, кг/м ³				Водоцементное отношение (В/Ц)
цемент	песок	щебень	добавка ОГ, % по массе от цемента	
410	680	1150	0,2...0,4	0,4...0,5
500	1500	–	0,2...0,4	0,4

При изготовлении лабораторных образцов добавку ОГ вводили в цемент (патент ВУ 11645) [10] с использованием мешалки (500...1000 об/мин). Однако при производственных испытаниях отдельные комки добавки ОГ, покрытые слоем цемента, долго не перемешивались. В связи с этим был разработан, экспериментально опробован и запатентован новый способ приготовления ремонтной бетонной смеси с введением добавки ОГ в два этапа.

На первом этапе, в условиях интенсивного принудительного перемешивания, получали порошкообразный гидрофобный концентрат (ПГК) – смесь добавки ОГ и цемента. На втором этапе ПГК вводили

в состав ремонтного бетона (патент ВУ 18440) [11]. Наиболее оптимальным при получении ПГК является введение добавки ОГ в количестве 75...100 % от массы цемента.

Получение ПГК позволило значительно снизить затраты энергии на введение добавки ОГ в ремонтные бетоны. Например, при введении 2,0 % добавки ОГ в 410 кг цемента, перемешивают 8,2 кг добавки ОГ и 8,2...10,9 кг цемента.

Суммарная масса ПГК составляет 16,4...19,1 кг. При введении добавки ОГ сразу в цемент (например, при составе бетонной смеси Ц : П : Щ = 410 : 650 : 1150) перемешивать необходимо 410 кг цемента и 8,2 кг добавки. Суммарная масса перемешиваемых по второму способу компонентов более чем в 22 раза превышает массу перемешиваемых по первому способу. Цемент, входящий в состав ПГК, при введении учитывается в общей массе.

Методом электронной микроскопии проведено визуальное изучение структуры цементного камня ($K_{\text{ит}} = 0,25$) без добавки и с добавкой ОГ (рис. 1, *a* и 1, *б*).

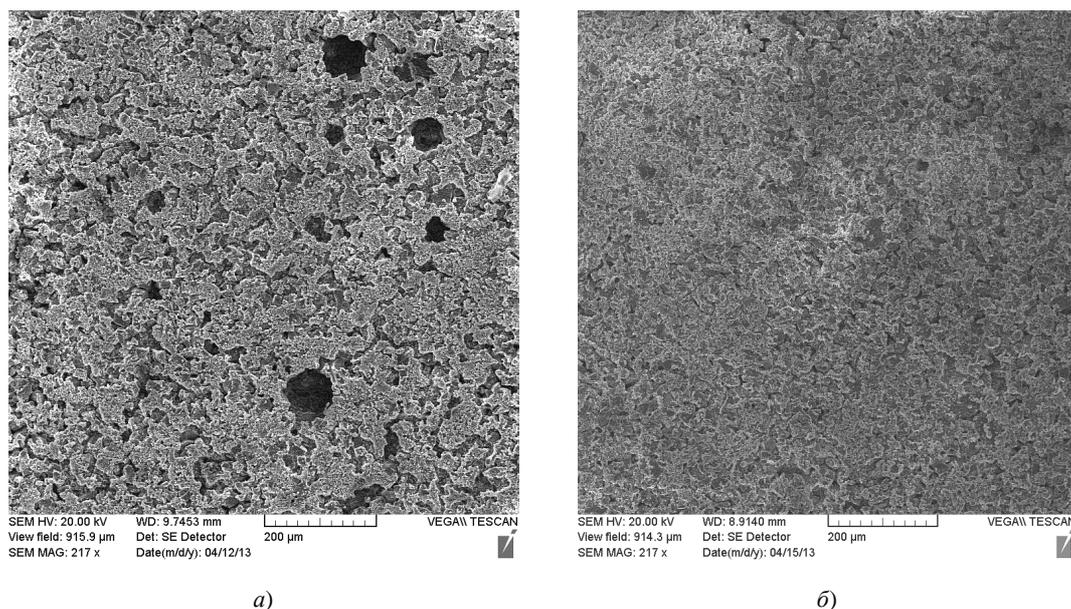


Рис. 1. Электронно-микроскопические снимки цементного камня (увеличение $\times 217$):
a – образец без добавки; *б* – образец с 4 % добавки ОГ

Цементный камень без добавки ОГ имеет крупные поры и капилляры, которые особенно хорошо видны на рисунке 1, *a* в виде темных овальных пятен. Структура цементного камня с добавкой ОГ равномерная с мелкими порами, размеры которых не превышают 5 мкм (см. рис. 1, *б*). Высокодисперсные частицы бентонита размером 5 мкм и менее занимают свободное место вокруг более крупных зёрен цемента (размером 10...15 мкм).

На 2-е сутки прочность цементного камня с добавкой ОГ в количестве более 1,0 % ниже, чем у образцов без нее, а в возрасте свыше 28-ми суток цементный камень с 0,2...1,0 % добавки ОГ имеет прочность на 10...11 % выше. Это можно объяснить образованием дополнительных коагуляционных контактов и уплотнением структуры. При введении 2,0 % добавки ОГ прочность цементного камня сопоставима, а при увеличении количества добавки ОГ до 4,0 % прочность ниже, чем у образцов без добавки на всех сроках твердения (рис. 2).

На начальном этапе скорость набора прочности образцов с добавкой ОГ ниже, чем у образцов без добавки (см. рис. 2). Это объясняется тем, что в это время вода затворения равномерно распределяется по всему объему цементного теста. Одновременно идет фильтрация молекул воды через гидрофобные пленки к цементным зернам, происходит их набухание и раскрытие гидрофобных пленок. После раскрытия, благодаря снижению агрегации происходит интенсивный набор прочности.

Добавка ОГ, вводимая в количестве 0,2...4,0 % от массы цемента, повышает прочность сцепления ремонтного бетона с бетоном ремонтируемой конструкции (см. рис. 2). При её введении в количестве 4 %, прочность сцепления повышается на 65 %. Это можно объяснить образованием дополнительных коагуляционных контактов на границе «ремонтный бетон – ремонтируемая бетонная поверхность». Следует также обратить внимание, что при увеличении времени набора прочности образцов (2, 14, 28 суток) расширяется интервал, в котором добавка не снижает прочность образцов ниже прочности образцов без добавки ОГ, о чем свидетельствуют адсорбция гидрофобных пленок органической массы на цементных

зёрнах и замедление скорости набора прочности на начальном этапе. После раскрытия пленок набор прочности происходит более интенсивно.

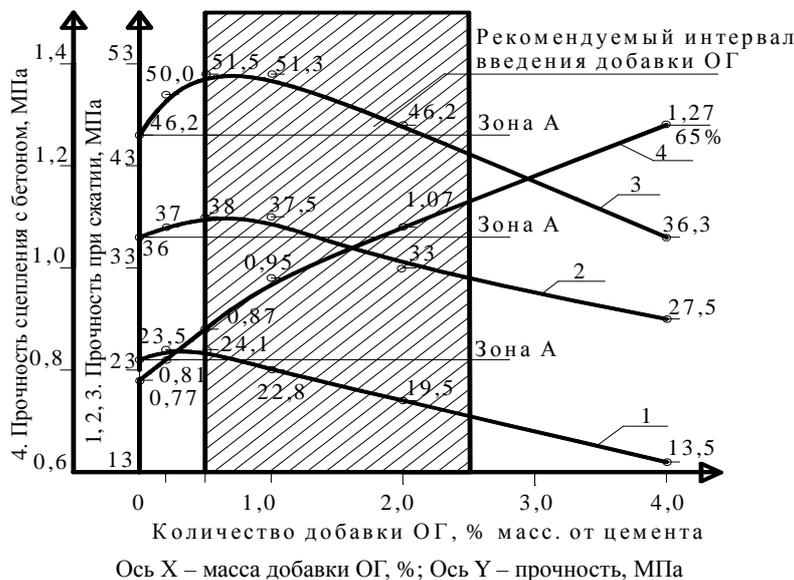


Рис. 2. Влияние добавки ОГ на свойства цементного камня:
1, 2, 3 – прочность образцов на 2, 14 и 28-е сутки; 4 – прочность сцепления с бетоном

Влияние добавки ОГ на прочность сцепления с бетоном. Важнейшим показателем, предъявляемым к ремонтным бетонам, является прочность сцепления с бетоном ремонтируемых конструкций. Для испытаний подготовили образцы (по три в каждой серии) со следующим соотношением компонентов (Ц : П : В = 1 : 3 : 0,4) и добавку в количестве 0,2...4,0 %. Физико-механические характеристики ремонтного бетона представлены на рисунке 3.

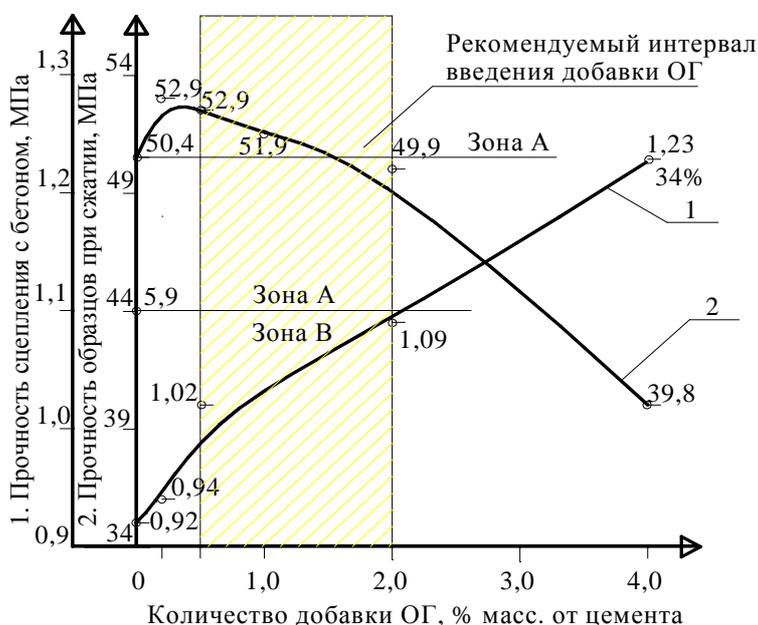


Рис. 3. Влияние добавки ОГ на свойства ремонтного бетона (Ц : П : В = 500 : 1500 : 200):
1 – прочность сцепления с бетоном; 2 – прочность образцов при сжатии

Добавка ОГ в количестве до 2,0 % не снижает прочность образцов ремонтного бетона на сжатие. Это происходит благодаря снижению агрегации цементных зерен, с образованием новых коагуляционных связей между цементными зернами, без разрыва прочных кристаллизационных связей и уменьшением объема порового пространства (см. рис. 3).

Добавка ОГ за счет диспергации цементных зерен, повышения площади контакта ремонтного бетона с бетоном конструкции и, как следствие, увеличения количества кристаллизационных и коагуляционных контактов повышает прочность сцепления с бетоном на 34 % (см. рис. 3). Замедление набора прочности на начальном этапе снижает возникающие напряжения и препятствует образованию усадочных трещин. Коагуляционные контакты подвижнее кристаллизационных, что положительно влияет на свойства восстановленного защитного слоя. Это совпадает с данными Д.А. Кузина [12].

Различие значений показателя прочности сцепления между образцами цементного камня и ремонтного бетона можно объяснить снижением агрегации цемента. Количество зерен цемента в единице объема цементных образцов выше, чем в ремонтном бетоне.

Влияние добавки ОГ на физико-механические свойства ремонтного бетона. При восстановлении защитного слоя бетона большой толщины оправданным может оказаться применение для этих целей бетонных смесей.

Добавку ОГ вводили в соответствии со способом приготовления бетонной смеси [10] в составе ПГК (патент 18440) [11]. Через 28 суток образцы испытывали на водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость и прочность на сжатие (рис. 4).

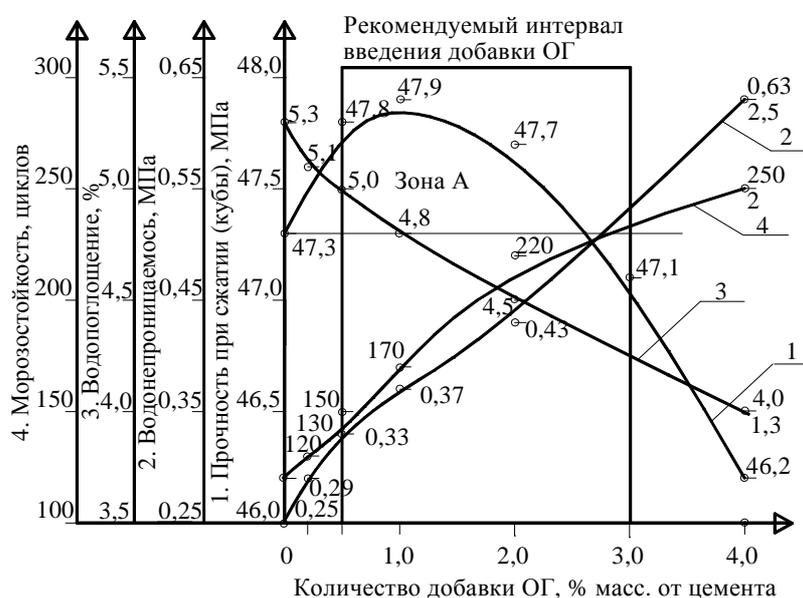


Рис. 4. Влияние добавки ОГ на свойства бетона:
1 – прочность кубов при сжатии; 2 – водонепроницаемость образцов;
3 – водопоглощение образцов; 4 – морозостойкость образцов

Результаты эксперимента показали, что введение добавки ОГ в бетонную смесь в количестве 4,0 % повышает водонепроницаемость в 2,5 раза и морозостойкость более чем в 2 раза, водопоглощение снижается более чем в 1,3 раза. Это связано с тем, что бентонит заполняет капиллярные поры, препятствует проникновению влаги в бетон, а ОГ выстилает стенки пор и капилляров, придает им водоотталкивающие свойства и частично способствует образованию замкнутых пор и капилляров. При этом прочность образцов с добавкой ОГ в количестве до 3 % сопоставима с прочностью образцов без добавки.

В качестве базового для проведения ремонтных работ рекомендован вариант введения добавки ОГ в количестве 2...3 % от массы цемента, в котором сочетается снижение водопоглощения и повышение водонепроницаемости и морозостойкости.

Следует отметить тот факт, что влияние добавки ОГ на физико-механические характеристики ремонтных бетонов проявляется на всех этапах от момента ее введения и до завершения эксплуатации мостов и путепроводов. Она снижает негативное влияние, которое оказывает на ремонтный бетон вода и другие агрессивные реагенты, тем самым повышая долговечность конструкции.

Структура порового пространства цементного камня представлена моделью спаянных кристаллов, согласно которой поры цементного камня представлены микропорами размером до 100 нм, капиллярными порами размером от 100 нм до 10 мкм и воздушными порами размером от 50 мкм до 2 мм, что оказывает влияние на физико-механические свойства цементного камня.

Учитывая размеры частиц и молекул, составляющих цементный камень и имеющих следующие размеры: цементное зерно 20...30 мкм, бентонит 1...2 мкм, органическая масса 0,4...0,6 нм, молекула

воды 0,28 нм – упрощенную модель капиллярно-пористой тела представим в виде модели спаянных кристаллов (рис. 5 и 6).

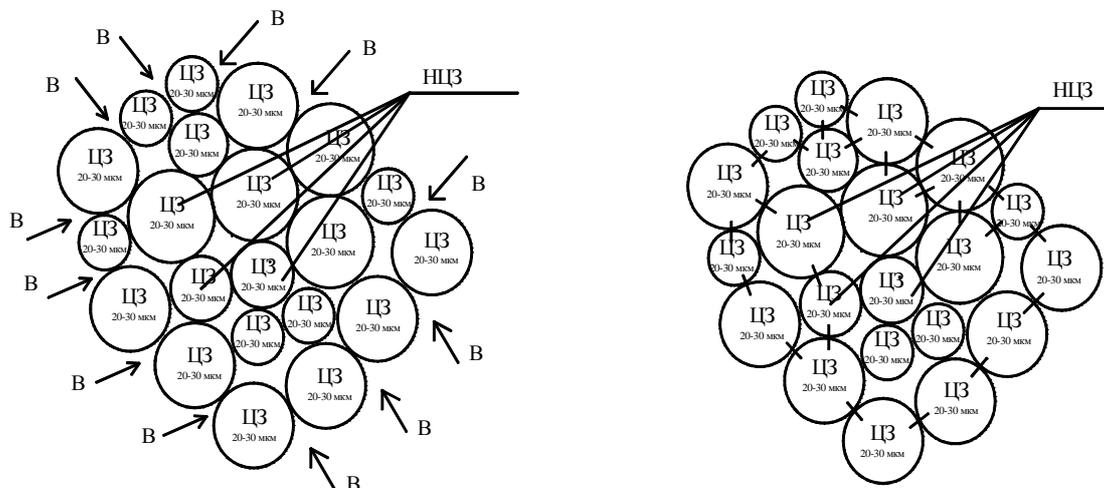


Рис. 5. Упрощенная модель капиллярно-пористой системы в виде «модели спаянных кристаллов» цементного теста и цементного камня (без добавки): ЦЗ – цементное зерно; В – вода; НЦЗ – непрогидратировавшие зерна цемента (соединения между цементными зёрнами обозначают кристаллизационные и коагуляционные контакты)

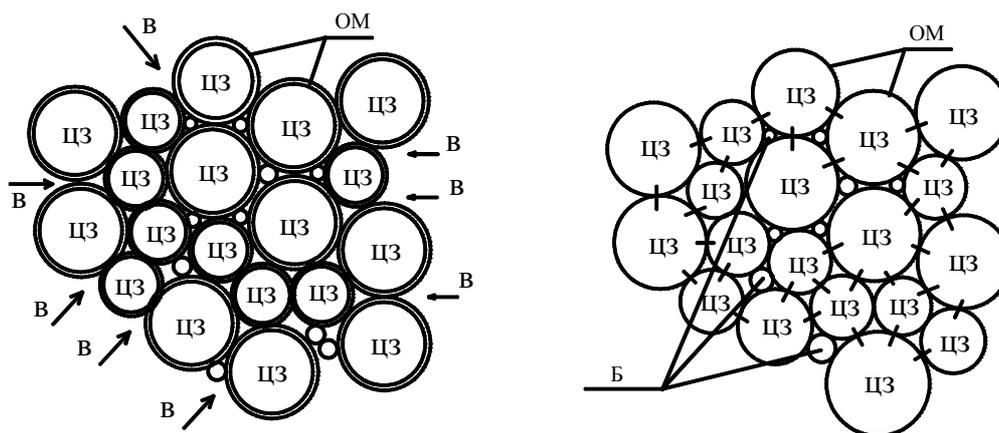


Рис. 6. Упрощенная модель капиллярно-пористой системы в виде «модели спаянных кристаллов» цементного теста и цементного камня (с добавкой ОГ): ЦЗ – цементное зерно; В – вода; Б – бетон; ОМ – органическая масса (соединения между цементными зёрнами обозначают кристаллизационные и коагуляционные контакты)

В цементном камне без добавки вода затворения из-за агрегации проникает не ко всем цементным зернам. Поэтому в нем остаются непрореагировавшие цементные зерна. Что в итоге оказало влияние на физико-механические свойства цементного камня. При введении добавки ОГ органическая масса адсорбируется на цементных зернах, препятствуя их агрегации. Одновременно сетчатая оболочка ОМ замедляет набор прочности на начальном этапе. В результате вода затворения смачивает цементные зерна равномерно. После нарушения оболочки ОМ происходит образование контактов между цементными зернами. Начальный этап набора прочности из-за наличия оболочки ОМ происходит медленнее, в силу чего снижаются и возникающие напряжения. Органическая масса с размерами частиц 0,4...0,6 нм выстилает стенки пор и капилляров. Одновременно частицы бентонита размером 1...2 мкм, занимают пустые места между зернами цемента размером 20...30 мкм.

Влияние добавки ОГ на коррозионное состояние стальной арматуры. Согласно данным, приведенным в монографии С.Н. Алексеева и др. [12] и В.С. Рамачандрана [13], в бетоне при pH выше 10 на поверхности металла возникает защитная пленка, которая защищает его от коррозии. В случае если pH ниже 10, целостность пленки может быть нарушена, что вызывает развитие коррозии арматуры.

Исследование влияния добавки ОГ на коррозию стальной арматуры проводили на предварительно оцилиндрованной арматуре, применяемой для армирования железобетонных конструкций мостов и путе-

проводов. Были подготовлены образцы проката арматурного горячекатаного термомеханически обработанного класса А240 диаметром 10 мм и проката арматурного и термомеханически упрочненного для железобетонных конструкций класса Ат500С диаметром 25 мм.

Добавка ОГ замедляет скорость коррозии арматуры (табл. 2). При ее введении в количестве 2,0...4,0 % от массы цемента процесс коррозии практически останавливается. Это, скорее всего, связано с наличием органической массы, которая гидрофобизирует поверхность пор и капилляров, снижая интенсивность воздействия агрессивных реагентов на арматуру. Скорость коррозии снижается благодаря частичному заполнению пор и капилляров бентонитом, что препятствует доступу кислорода и агрессивных реагентов к арматуре.

Таблица 2

Изменение массы арматуры, г/м²

Добавка ОГ, % масс. от цемента	Продолжительность эксперимента, недель			
	1	4	26	52
	Изменение массы арматуры, г/м ²			
0	1	3	19	40
0,2	0	3	11	20
0,5	0	2	7	15
1,0	0	2	5	10
2,0	0	1	4	7
4,0	0	0	2	5

Внедрение ремонтного бетона с добавкой из продуктов производства минеральных масел осуществлено в соответствии с ТУ ВУ 100354447/082-2011 [14] при реконструкции моста через реку Свислочь автомобильной дороги Минск – Гомель для восстановления защитного слоя бетонных опор.

Ремонтный бетон готовили на строительной площадке в ёмкости, используя для перемешивания дрель с насадкой. Нанесение на восстанавливаемые участки бетонных опор осуществляли штукатурным способом, слоем 3...5 см.

Наблюдение за восстановленными участками в течение 90 суток и спустя 14 месяцев показало отсутствие трещин и других дефектов, что можно объяснить наличием подвижных коагуляционных контактов, которые снижают напряжения, возникающие в ремонтном бетоне, особенно на начальной стадии набора прочности. В дальнейшем конструкции моста были окрашены, целостность восстановленных участков косвенно подтверждается состоянием поверхности опор (рис. 7).

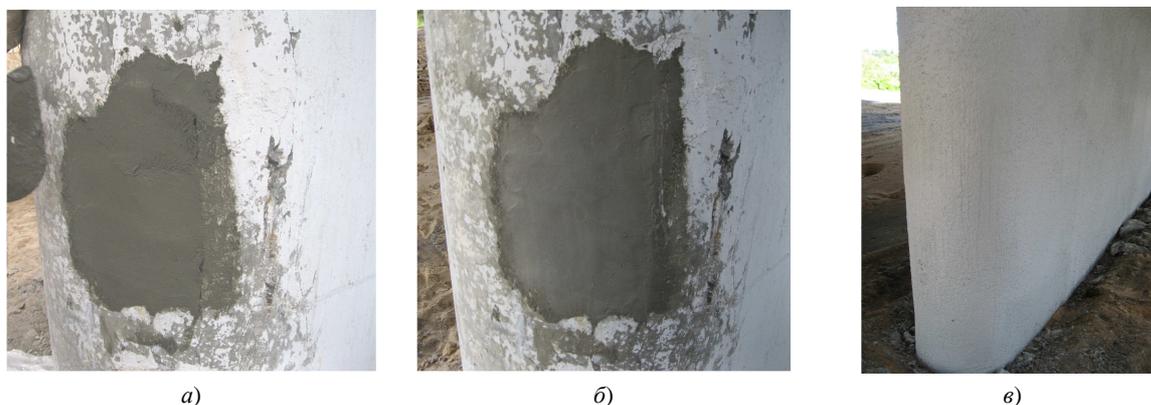


Рис. 7. Защитный слой ремонтного бетона (а, б) и его состояние через 90 суток и 14 месяцев (в)

Заключение. Использование разработанных ремонтных бетонов с добавкой из вторичных продуктов производства минеральных масел обеспечит надежность и долговечность отремонтированных железобетонных конструкций в процессе эксплуатации в условиях знакопеременных температур и агрессивного воздействия противогололедных реагентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник образующихся отходов производства в Белорусской ССР и их технических характеристик и имеющихся отечественных и зарубежных технологий по их переработке, а также идей и проблем по ресурсосбережению / Госнаб Белорус. ССР. – Минск: [б. и.], 1990. – Ч. 2, разд. 3: Образование и использование отходов на предприятиях Белорусской ССР в производстве строительных материалов. – 264 с.

2. Ляхевич, Г.Д. Исследование отработанной глины от производства минеральных масел / Г.Д. Ляхевич, В.А. Гречухин, А.Г. Ляхевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2003. – № 2. – Минск: Беларус. навука, 2003. – С. 91–94.
3. Ляхевич, Г.Д. О возможности использования отработанной глины масляного производства Г.Д. Ляхевич, В.А. Гречухин, А.Г. Ляхевич // Химия и технология топлив и масел. – М.: Нефть и газ, 2006. – № 6. – С. 33–35.
4. Гречухин, В.А. Предпосылки к использованию глинистых минералов и органических веществ в качестве добавок в бетонные смеси / В.А. Гречухин, Г.Д. Ляхевич // Строительная наука и техника. – 2010. – № 3(30). – С. 48–51.
5. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны: теория и практика / В.Г. Батраков. – 2-е изд., перераб. – М.: Технопроект, 1998. – 768 с.
6. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избр. тр. / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1978. – 368 с.
7. Косинов, Е.А. Регулирование свойств цемента модифицированной гидрофобизирующей добавкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Е.А. Косинов; Рос. химико-технологич. ун-т им. Д.И. Менделеева. – М., 2010. – 16 с.
8. Бушнева, Е.Ю. Цементные растворы и бетоны с добавками модифицированных битумных эмульсий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Е.Ю. Бушнева; Рос. химико-технологич. ун-т им. Д.И. Менделеева. – М., 2005. – 16 с.
9. Бабков, В.В. Аспекты формирования высокопрочных и долговечных цементных связок в технологии бетонов / В.В. Бабков, И. Ш. Каримов, П.Г. Комохов // Изв. вузов. Строительство. – 1996. – № 4. – С. 41–48.
10. Способ приготовления бетонной смеси: пат. 11645 Респ. Беларусь, МПК С 04 В 40/00, С 04 В 28/00 / Г.Д. Ляхевич, В.А. Гречухин; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20060639; заявл. 27.06.06; опубл. 28.02.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1(6б). – С. 80.
11. Способ приготовления бетонной смеси: пат. 18440, МПК7 С 04 В 28/02 / В.А. Гречухин; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20120627; заявл. 17.04.12; опубл. 09.04.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 22.
12. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях / С.Н. Алексеев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.
13. Добавки в бетон: справ. пособие / В.С. Рамачандран [и др.]; под ред. В.С. Рамачандрана. – М.: Стройиздат, 1988. – 286 с.
14. Добавка гидрофобизирующе-кольматирующая для бетонных смесей и строительных растворов: Технические условия ТУ ВУ 100354447.082-2011. – Введ. 01.06.11. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2011. – 9 с.

Поступила 26.05.2015

CONCRETE REPAIR MORTARS WITH THE ADDITIVE FROM THE SECONDARY PRODUCTS OF MINERAL OILS

V. GRECHUHIN

The article considers the influence of the additive from the secondary products of mineral oils on the physical and mechanical properties of the cement stone and concrete repair; the technology of its production and its supplement administration in formulations of repair concrete. The additive reduces the water absorption, increases water resistance and adhesion of strength repair concrete with a concrete surface. Application of concrete renovation with a new mineral supplement will improve the quality of repair of bridges and overpasses.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 389.1

АНАЛИЗ СОВМЕСТИМОСТИ ПОДХОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

д-р техн. наук, доц. П.С. СЕРЕНКОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается проблема совместимости двух подходов в метрологии: классического, основанного на теории погрешностей, и современного, основанного на концепции неопределенности. Приведен анализ их соответствия теории вероятности и математической статистики. Сделан вывод о бесперспективности сведения их воедино, так как они имеют различную логику, понятия, принципы классификации источников изменчивости. Приведены алгоритмы корректного взаимного пересчета характеристик неопределенностей и погрешностей. Полученные результаты можно применять в практике деятельности испытательных аккредитованных лабораторий, выполняющих работы по заказу предприятий различных сфер деятельности: магистрального трубопроводного транспорта, гражданского и промышленного строительства, машиностроительного профиля и т.д.

Введение. Анализ точек зрения специалистов различного уровня на современные подходы к метрологии и метрологическому обеспечению производства продукции выявил ряд принципиальных разногласий и взаимных недопониманий, в частности в отношении процедур метрологического обеспечения в области магистрального трубопроводного транспорта, промышленного и гражданского строительства и т.д., а именно процедур поверки и калибровки.

Так, большинство специалистов машиностроительных предприятий по-прежнему отдают предпочтение поверке. Во-первых, потому, что в том виде, в котором калибровка в настоящее время определена в отечественном законодательстве, она является достаточно затратным мероприятием. Во-вторых, калибровка вызывает определенные методические трудности для персонала метрологических служб, привыкшего оперировать характеристиками погрешностей, строгими алгоритмами их идентификации, комплексирования и представления результатов. Оценивание неопределенности результата измерения предполагает большую «творческую» свободу в выборе и обосновании методики обработки результатов измерений, но одновременно повышает и степень ответственности метролога за свой выбор.

Таким образом, наряду с организационно-техническими моментами разногласия касаются методов оценки точности результата измерения. Как известно, теоретической базой поверки является теория погрешностей, калибровки – концепция неопределенности результатов измерения. Целью данной работы выступают анализ выявленных противоречий и разработка путей их преодоления.

Основная часть. Для более четкого представления рассматриваемого вопроса целесообразно провести сравнение концепции неопределенности и теории погрешности результатов измерений. Концепция неопределенности строго придерживается фундаментальных положений теории вероятности и математической статистики, что в современных условиях повышенного внимания к степени доверия результатов измерений (испытаний) является ее значительным преимуществом.

Руководство по выражению неопределенности измерения [1] исходит из того, что все без исключения величины, вовлеченные в процесс измерения, в том числе и результат измерения, априори являются случайными по своей природе. Соответственно, результат измерения величины Y может быть представлен как диапазон значений, которые могут быть с достаточным основанием приписаны этой величине:

$$Y = Y^0 \pm U, P.$$

Здесь Y^0 – оценка результата измерения (математическое ожидание) – *неслучайная величина*, представляющая собой комбинацию всех вовлеченных в процесс измерения оценок величин x_i ; $U = k \cdot u_c(Y)$ – расширенная неопределенность результата измерения A^0 с вероятностью охвата p – *случайная величина*, является комбинацией всех вовлеченных в процесс измерения оценок дисперсий $u^2(x_i)$ величин x_i , где k – коэффициент охвата, значение которого выбирается на основе уровня доверия. Обычно k назначают в диапазоне от 2 до 3 (для уровня доверия $p = 0,95 \dots 0,9973$); $u_c(Y)$ – суммарная стандартная неопределенность оценки результата измерения Y , представленная стандартным отклонением результата измерения, характеризующим разброс его значений.

Суммарная стандартная неопределенность оценки результата измерения Y

$$u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)},$$

где f – функция, характеризуется как модель измерений; $u^2(x_i)$ – дисперсия или ковариация влияющего параметра x_i , $i = 1 \dots N$; $u(x_i)$ – стандартная неопределенность влияющего параметра x_i , оцененная по типу A или B .

Заметим, что понятие «уровень доверия p », введенное в [1; 2], на наш взгляд, не является семантически корректным. В такой форме p ассоциируется с вероятностью «абсолютного» доверия к результату измерения или с его достоверностью. Тем не менее установлено, что достоверность результата измерения, выражаемая через уровень доверия, определяется не только собственно процессом измерения, но и его организационно-техническим сопровождением [3]. В этом смысле более корректным является понятие «классической» метрологии – «доверительная вероятность P ».

Теория погрешностей результатов измерений, в отличие от концепции неопределенности, является сложившейся областью знаний, сформированной в особых экономических, политических, организационно-технических условиях и нашедшая отражение в комплексе нормативных документов различных уровней. Нормативные документы, имеющие в свое время статус обязательных к исполнению, предопределили специфику классической метрологии как весьма консервативной предметной области.

Если не акцентировать внимание на различиях в исходных понятиях (для метрологии это «истинное значение» и «погрешность», а для неопределенности это «неопределенность» и «неопределенность измерения»), ключевыми отличиями теории погрешностей являются следующие:

- рассматриваются две категории величин, вовлеченных в процесс измерения, – систематические и случайные;

- в отличие от концепции неопределенности, теория погрешностей оперирует не измеряемыми величинами, а погрешностями, которые представляют собой особую форму приведения измеренной величины к идеальной $\Delta = X_{изм} - Q$ или в современной трактовке – форму приведения измеренной величины к опорному значению $\Delta = X_{изм} - X_{ref}$ [4];

- погрешность как оцениваемая величина представляет собой комбинацию систематической и случайной составляющих $\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}$, каждая из которых является в общем случае результатом комплексирования элементарных составляющих [4].

В этом смысле теория погрешностей не строго придерживается фундаментальных положений теории вероятности, и эта некорректность решается в классической метрологии раздельным выявлением и комплексированием систематических и случайных составляющих погрешности, что, очевидно, ограничивает ее возможности в части математического моделирования и анализа результатов измерения в нетривиальных случаях, как показано ниже.

Метрическая конвенция заложила основы международной системы измерений, обеспечивающей надежность, прослеживаемость и эквивалентность результатов измерений. Консультативные комитеты Международного комитета мер и весов определили новые постоянно возрастающие потребности в достоверных и сопоставимых результатах измерений в таких областях, как мониторинг окружающей среды, производство продуктов питания, торговля и др. [5].

Заявленная в [1; 5] «несостоятельность теории погрешностей» при оценивании точности, надежности и прослеживаемости результатов измерений в перечисленных выше областях обусловлена, по нашему мнению, следующими соображениями.

Теория погрешностей применима для таких достаточно «консервативных» видов измерений, как, например, линейно-угловые, для которых составляющие общей погрешности результата исчерпывающе определены практикой, процедура измерений отработана и во многих случаях стандартизована. Здесь обоснованно применим прагматичный подход к представлению процесса измерения как «черного ящика», в отношении которого можно с достаточной степенью корректности использовать апробированную классическую модель измерения.

Теория погрешностей не является состоятельной для современных, инновационно развивающихся областей деятельности, для которых имеет место тенденция технического и технологического усложнения процедур контроля и испытаний продукции. Последнее связано с высокой степенью риска как в отношении результатов контроля и испытаний, так и в отношении самой продукции.

Например, для медицины, фармацевтической, пищевой и других видов промышленности, продукция которых имеет повышенный уровень риска, при оценке результатов контроля и испытаний, очевидно, следует придерживаться большей строгости в построении модели измерения, так как даже относительно небольшая часть «неучтенной» неопределенности может повлечь за собой значительные негативные последствия, связанные с жизнью и здоровьем людей.

Проведение измерений, являющихся частью контроля и испытаний продукции в такого рода областях, предполагает установление различных уровней приближений и допущений, тщательный анализ факторов изменчивости, а значит, рассматривает измерение как процесс преобразования информации с разложением его на переходы. Поэтому для оценки точности результата измерения не всегда представляется возможным использовать «классическую» теорию погрешностей, так как необходимо особым образом учитывать эффекты и физические принципы, свойственные конкретной области [6]. Например, помимо факторов, относящихся непосредственно к измерительным процедурам, все большую роль в обеспечении заданного уровня точности и достоверности результатов контроля и испытаний начинают играть такие составляющие, как:

- «факторы действия», связанные с контактами оператора с объектом, техническими средствами, средой (наполнение пробирок реагентами, установка образцов на испытательное оборудование, нагрев, охлаждение и другие виды воздействия на образцы в процессе контроля и испытаний, манипулирование техническими средствами и т.д.), которые не всегда возможно включить в модель измерения как поправки и поправочные коэффициенты, их влияние является опосредованным;

- «факторы субъективного оценивания», связанные с выполнением определенных действий на различных стадиях процесса контроля и испытаний на основе органолептических восприятий, например, «на просвет», по цвету, звуку, запаху и т.п. (хотя для этих целей используются модели «стандартных наблюдателей», но, как показывает практика, они вносят свой вклад в изменчивость процесса).

Представим две измерительные ситуации, требующие применения количественных характеристик двух описываемых подходов. Предпринимаемые в некоторых работах и нормативных документах попытки подробного сравнительного анализа теории погрешностей и концепции неопределенностей часто не являются удачными (подобно тому, как осуществлять перевод текста с немецкого языка на русский через английский) [7; 8]. Данные подходы, несмотря на то, что их математические аппараты схожи и базируются на теории вероятности и математической статистике, представляют собой две параллельно существующие концепции. Их бессмысленно сводить воедино, так как они имеют различную логику, понятия и принципы классификации источников изменчивости.

Все ситуации, требующие взаимного пересчета погрешностей и неопределенностей, можно разделить на два класса:

- 1) полный взаимный пересчет характеристик погрешностей в характеристики неопределенностей;
- 2) использование в расчетах смешанных характеристик:
 - при расчете суммарной погрешности измерения – отдельных характеристик неопределенности;
 - при расчете расширенной неопределенности измерения – отдельных характеристик погрешности.

Произведем перерасчет характеристик неопределенностей в характеристики погрешностей. Имеется парк средств измерений, прошедших процедуру калибровки, то есть имеются протоколы калибровки и расчет неопределенности результатов измерений. Требуется в рамках комплекса работ по метрологическому обеспечению производства разработать методику выбора средств измерения, например, для операционного контроля параметров изделия в процессе его производства, руководствуясь РД 50-98-86 [9]. Данный документ предполагает выбор средств измерений и методик выполнения измерений исходя из характеристик погрешностей.

Исходные данные перерасчета взяты из протоколов калибровки имеющихся средств измерения (бюджетов неопределенностей), предполагаемых для альтернативного выбора, известны: расширенная неопределенность U , коэффициент охвата k , уровень доверия p . Дополнительно к перечисленным, для расчета всех оценок характеристик погрешностей необходимо иметь количество результатов наблюдений n , эффективное число степеней свободы ν_{eff} . Алгоритм пересчета характеристик неопределенности в характеристики погрешности результата измерений представим в следующем виде:

- оценка среднего квадратического отклонения (СКО), характеризующего суммарную погрешность результата измерений

$$S_{\Sigma} = \frac{U}{k} = u_c;$$

- оценка СКО случайной погрешности результата измерений

$$S_{\Sigma} = u_A = S_{\Sigma A} \sqrt{\frac{n-1}{\nu_{eff}}};$$

- оценка СКО, характеризующая неисключённую систематическую погрешность (НСП) результата измерений

$$S_{\theta} = u_B = \sqrt{S_{\Sigma}^2 - S^2};$$

- оценка доверительных границ НСП результата измерений

$$\theta(P) = K_p \sqrt{3} S_\theta,$$

где коэффициент $K_p = 1,1$ для $P = 0,95$; $K_p = 1,4$ для $P = 0,99$ и $m > 4$;

- оценка доверительных границ погрешности результата измерений

$$\Delta = \frac{t_p(n-1) \cdot S + \theta(P)}{S + S_\theta} \cdot S_\Sigma,$$

где $t_p(n-1)$ – коэффициент Стьюдента для заданной вероятности P и эффективного числа степеней свободы $n-1$.

Далее, руководствуясь значением Δ , по РД 50-98-86 можно оценить возможность применения выбранного средства измерения для операционного контроля параметра изделия, представленного полем допуска. Следует обратить внимание на тот факт, что перевод характеристик неопределенности в характеристики погрешности измерения достаточно громоздок в силу консервативности алгоритма получения доверительных границ погрешности результата измерения, в частности коэффициента расширения k :

$$k = \frac{t_p(n-1) \cdot S + \theta(P)}{S + S_\theta}.$$

Сложная конструкция коэффициента предполагает идентификацию определение практически всех элементов погрешности измерения.

Произведем перерасчет характеристик погрешностей в характеристики неопределенностей. Имеется парк средств измерений, регулярно проходящих процедуру поверки, то есть имеются протоколы поверки, свидетельства поверки, включающие информацию о погрешности поверенных средств измерений. В рамках комплекса работ по метрологическому обеспечению испытаний продукции планируется применение средств измерений, имеющих свидетельство поверки. В соответствии с требованиями СТБ ИСО/МЭК 17025 оценка результатов испытаний должна быть представлена как неопределенность, что предполагает составление бюджета неопределенности.

Требуется в рамках комплекса работ по метрологическому обеспечению испытаний продукции по конкретному параметру разработать методику обработки и представления результата испытаний. Расширенная неопределенность результата испытаний включает, в том числе, вклад неопределенности средства измерения, имеющего действующий аттестат поверки и приведенные в нем характеристики погрешности.

Исходные данные примера второго перерасчета взяты из протоколов поверки средства измерения, выбранного для использования в испытаниях продукции, известны: оценка СКО S результата измерения; оценка НСП в виде границ $\theta(P)$ для заданной доверительной вероятности P ; число составляющих НСП – m ; количество результатов наблюдений, взятых для вычисления среднего арифметического в качестве оценки результата измерения, равняется n .

Алгоритм пересчета характеристик погрешности в характеристики неопределенности результата измерений представлен в следующем виде:

- оценка стандартной неопределенности результата измерения по типу A :

$$u_A = S;$$

- оценка стандартной неопределенности результата измерения по типу B

$$u_B = \frac{\theta(p)}{K(p)\sqrt{3}},$$

где коэффициент $K(p) = 1,1$ для $P = 0,95$; $K(p) = 1,4$ для $p = 0,99$ и $m > 4$;

- оценка суммарной неопределенности результата измерения

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2};$$

- оценка эффективного числа степеней свободы

$$v_{eff} = (n-1) \cdot \left(1 + \frac{u_B^2}{u_A^2} \right)^2;$$

- оценка коэффициента охвата k как коэффициента Стьюдента $t_p(v_{eff})$ для заданного уровня доверия p и полученной оценки эффективных степеней свободы v_{eff} ;
- оценка расширенной неопределенности $U = k \cdot u_c$.

Далее значения характеристик u_c, v_{eff}, k, U выбранного средства измерения можно использовать как составляющий элемент бюджета неопределенности результата испытания, в котором это средство предполагается задействовать.

Заключение. Не следует смешивать организационно-технические и научно-методические аспекты современной метрологии. Организационно-технические аспекты метрологического обеспечения производства регламентирует Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений», который следует неукоснительно выполнять. Однако, что касается научно-методических аспектов, например, в части выбора и обоснования методов, методик, техник сбора, обработки и анализа данных измерительного эксперимента, а также представления результатов измерений, то современные подходы и требования к метрологии и метрологическому обеспечению предполагают здесь значительно большую «творческую» свободу. А это, в свою очередь, предполагает, что научно-методический уровень работников метрологических служб должен соответствовать уровню риска принимаемых решений.

Теория погрешностей и концепция неопределенности – два принципиально не противоречащих друг другу подхода, которые являются востребованными для решения различных задач метрологического обеспечения и метрологического контроля. Их бессмысленно сводить воедино, так как они имеют различную логику, понятия, принципы классификации источников изменчивости. Однако их методологическая основа – теория вероятности и математическая статистика – позволяет корректно и достаточно просто производить взаимный пересчет характеристик неопределенностей и погрешностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement. – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
2. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины. Руководство 99. Третья редакция, 2009.
3. Серенков П.С. Развитие доказательной базы метрологии на основе принципов системного подхода / П.С. Серенков // Метрология и приборостроение. – Минск, 2009. – № 1. – С. 8–11.
4. Артемьев, Б.Г. Справочное пособие для работников метрологических служб: в 2-х кн. / Б.Г. Артемьев, С.М. Голубев; предисл. канд. техн. наук И.Х. Сологана. – 3е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – Кн. 1. – 438 с.
5. Отчеты консультативных комитетов Международного комитета мер и весов: док. 23-й Генеральной конф. мер и весов. – Минск: Белорус. гос. ин-т метрологии, 2003. – 93 с.
6. Серенков, П.С. Применение методов непараметрического оценивания неопределенностей в задачах метрологического обеспечения / П.С. Серенков, В.М. Романчук // Метрология-2009: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2009 г. / Госстандарт Респ. Беларусь, Белорус. гос. ин-т метрологии, Белорус. нац. техн. ун-т; под общ. ред. В.Н. Корешкова [и др.]. – Минск, 2009. – С. 141–145.
7. Захаров, И.П. Теория неопределенности в измерениях: учеб. пособие / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харьков: Консум, 2002. – 256 с.
8. Государственная система обеспечения единства измерений: РМГ 43-2001. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». – Минск: Изд-во стандартов, 2002. – 20 с.
9. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм: РД 50-98-86.

Поступила 09.06.2015

THE ANALYSIS OF THE COMPATIBILITY OF APPROACHES TO ESTIMATION OF MEASUREMENT RESULTS

P. SERENKOV

The problem of compatibility of the two approaches in metrology: classic, based on the errors theory, and modern, based on the uncertainty concept, is investigated. The analysis of their compliance with the probability theory and mathematical statistics is presented. The conclusion about the futility of their consolidation, as they have a different logic, concepts, principles, classification of sources of variability, is justified. Algorithms correct mutual conversion characteristics of uncertainties and errors are offered. The given results can be applied in work practice of test accredited laboratories which fulfill contracts with many companies of different industrial areas: main pipeline transport, civil and industrial building, machine-building sphere etc.

УДК 621.311.153

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ МЕТОДИКА ДЛЯ ВЫБОРА СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

канд. техн. наук, доц. **О.И. АЛЕКСАНДРОВ**;
канд. техн. наук, доц. **Д.Н. СВИРСКИЙ**
(Белорусский государственный технологический университет, Минск);
Т.Е. ЖУКОВСКАЯ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приводится общая постановка задачи и описание стратегии по выбору оптимального состава основного оборудования в сложной энергосистеме, включающей конденсационные, тепловые и гидравлические электростанции. Критериями оптимизации являются традиционные показатели – минимальный расход топлива на тепловых электростанциях и минимальный сток воды на гидроэлектростанциях. Дано приближенное решение этой задачи, основанное на условно-линейной аппроксимации расходных характеристик энергооборудования. Описан также алгоритм одновременной оптимизации состава работающих агрегатов и их рациональной загрузки с учетом расхода условного топлива на пуски и остановы. Целевая функция рассматриваемой задачи определяется в области существования этой функции, формируемой с помощью системы режимно-технологических ограничений. Рассмотрена стратегия замены расходных характеристик агрегатов заведомо выпуклыми с учетом линейности функции пусковых расходов.

Введение. Задача выбора оптимального состава включенного в работу оборудования электроэнергетической системы (ЭЭС) имеет вполне удовлетворительное решение и рассмотрена в ряде публикаций [1–3]. Однако при оперативном управлении режимами и разрешении заявок предприятий электрических сетей на выполнение текущих ремонтов диспетчеру ЭЭС необходимо иметь упрощенную методику для ускоренной оценки состава генерирующего оборудования. В ряде случаев возникает необходимость получения граничных оценок для выбора оптимального состава включенного в работу оборудования ЭЭС, имеющего реальные расходные характеристики для различных сочетаний работающих агрегатов.

Выбор состава оборудования в общем виде формулируется как задача отыскания нагрузок агрегатов $P_1, P_2, \dots, P_\tau, \dots, P_n$ (n – количество готовых к работе агрегатов при возможных значениях нагрузок):

$$P_\tau = 0; \quad P_\tau^{\min} \leq P_\tau \leq P_\tau^{\max},$$

причем состояние $P_\tau = 0$ соответствует отключенному состоянию τ -го агрегата при известных расходных характеристиках агрегатов $B_\tau(P_\tau)$. Предполагается, что суммарный расход топлива B_Σ должен быть минимальным при заданной фиксированной нагрузке P_Σ [1].

Процедура выбора оптимального состава работающего оборудования обычно выполняется совместно с процедурой оптимизации режимов работы электростанции, причем математической основой решения таких задач обычно является метод динамического программирования [5].

Таким образом, рассматривается некоторая концентрированная ЭЭС общего типа, имеющая в своем составе конденсационные (КЭС), тепловые (ТЭС) и гидравлические электростанции (ГЭС). Требуется при заданном графике электропотребления выполнить оптимальное распределение нагрузки между агрегатами и найти наиболее выгодный состав включенного энергооборудования. Пусть в ЭЭС имеется n готовых к работе агрегатов единичной мощности P_τ . В общем виде задача отыскания оптимального состава энергооборудования на энергообъекте сводится к минимизации функции суммарного суточного расхода топлива

$$B = \sum_{t=1}^{24} \sum_{\tau=1}^n B_{t\tau}$$

при известных расходных характеристиках агрегатов $B_\tau(P)$ и заданном графике нагрузки

$$\sum_{\tau=1}^n P_{t\tau} = P_{\Sigma t},$$

где $B_{t\tau}$ – расход условного топлива τ -го агрегата за t -й час суток ($t = 1, 2, \dots, 24$); $P_{t\tau}$ – активная нагрузка τ -го агрегата в t -й час; $P_{\Sigma t}$ – суммарная нагрузка концентрированной ЭЭС с учетом постоянных потерь в системообразующих линиях.

Декомпозиция задачи оптимального распределения активных мощностей в энергосистеме на подзадачи внутри- и межстанционной оптимизации

При управлении режимом энергосистемы по активной мощности исходной режимной информацией для принятия решения является прогноз активных мощностей потребления в узлах основной сети энергосистемы, а мощности заранее неизвестны. Требуется определить оптимальные значения мощностей одновременно для всех агрегатов энергосистемы. Таким образом, рассмотрим задачу оптимального распределения активных мощностей между агрегатами энергосистемы, причем для выяснения принципиальных особенностей увязки отдельных алгоритмов в комплекс будем вначале считать, что потери в сети заранее известны и прибавлены к суммарной мощности потребления в узлах основной сети энергосистемы. Тогда задачу можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \varphi_{ij}(P_{ij}) &\rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} P_{ij} &= \sum_{v=1}^h P_v; \\ (P_{n,1} = 0) \nabla (P_{n,1 \min} \leq P_{n,1} \leq P_{n,1 \max}); \\ &\dots\dots\dots (1) \\ (P_{n,n_m} = 0) \nabla (P_{n,n_m \min} \leq P_{n,n_m} \leq P_{n,n_i \max}); \\ (P_{t,1} = 0) \nabla (P_{t,1 \min} \leq P_{t,1} \leq P_{t,1 \max}); \\ (P_{1,n_1} = 0) \nabla (P_{1,n_1 \min} \leq P_{1,n_1} \leq P_{1,n_1 \max}), \end{aligned}$$

где m – количество электростанций в энергосистеме; $i = 1, 2, \dots, m$ – количество агрегатов i -й станции, находившихся в работе или в горячем резерве к началу рассматриваемого часа суток; $\varphi_{ij}(P_{ij})$, $j = 1, 2, \dots, n_j$, n_j – расходная характеристика j -го агрегата i -й станции; P_v ($v = 1, 2, \dots, k$) – мощность потребления в v -м узле основной сети энергосистемы.

Задача (1) с математической точки зрения принципиально не отличается от задачи внутростанционного распределения активных мощностей, однако как с вычислительной точки зрения, так и удобства организации оперативного управления в энергосистеме целесообразно провести декомпозицию задачи (1) на подзадачи, которые соответствуют: а) построению расходных характеристик станций, исходя из оптимального распределения текущего значения суммарной нагрузки станции между агрегатами; б) оптимальному распределению нагрузки P_n между станциями.

Расходная характеристика любой i -й станции при заданном на рассматриваемый час t суток исходном состоянии в виде множества $A_i^{(t)}$ включенных в работу агрегатов и множества $B_i^{(t)}$ агрегатов, находящихся в горячем резерве, определяется путем решения семейства задач оптимизации вида:

$$\sum_{j \in A_i^{(t)} \cup B_i^{(t)}} \varphi_{ij}(P_{ij}) \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$\sum_{j \in A_i^{(t)} \cup B_i^{(t)}} P_{ij} = P_i; \quad (3)$$

$$(P_{ij} = 0) \nabla (P_{ij \min} \leq P_{ij} \leq P_{ij \max}), j \in A_i^{(t)} \cup B_i^{(t)}; \quad (4)$$

$$\min P_{i,j \min} \leq P_i \leq \sum_{j=1}^{n_i} P_{ij \max}. \quad (5)$$

Каждая точка искомой характеристики $\varphi_i(P_i)$ определяется заданием значения D_i , удовлетворяющего ограничению (5), и значением целевой функции (2) в задаче (2)...(4) при данном P_i .

Из приведенного выше описания алгоритма распределения нагрузок между агрегатами методом динамического программирования следует, что решение семейства задач (2)...(5) практически не сложнее с вычислительной точки зрения, чем решение одной задачи вида (2)...(5), поскольку наиболее трудоемкая часть алгоритма – прямой ход динамического программирования – выполняется только один раз и его результаты остаются в силе при решении всех задач семейства.

После построения расходных характеристик для всех станций их оптимальные нагрузки при любом значении мощности P_n могут быть определены решением задачи

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \varphi_i(P_i) &\rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^m P_i &= \sum_{v=1}^k P_v; \\ P_{i \min} &\leq P_i \leq P_{i \max}, i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (6)$$

Из аддитивной сепарабельности целевой функции и функций ограничений в исходной задаче (1) очевидно, что решение задачи (6) вместе с соответствующим ему решением задач типа (1)...(4) для всех станций обеспечивает достижение оптимума в задаче (1). При оптимизации суточного режима энергосистемы в большинстве случаев требуемые расходные характеристики, соответствующие случаю, когда состав включенных в работу агрегатов (множество $A_i^{(t)}$) не оптимизируется и заранее задан, строятся путем решения семейства задач:

$$\begin{aligned} \sum_{j \in A_i^{(t)}} \varphi_{ij}(P_{ij}) &\rightarrow \min; \\ \sum_{j \in A_i^{(t)}} P_{ij} &= P_i; \\ P_{ij \min} &\leq P_{ij} \leq P_{ij \max}, j \in A_i^{(t)}; \\ \sum_{j \in A_i^{(t)}} P_{ij \min} &\leq P_i \leq \sum_{j \in A_i^{(t)}} P_{ij \max}. \end{aligned}$$

При этом если для i -й станции расходные характеристики всех агрегатов выпуклы, ее расходная характеристика может быть построена менее трудоемким способом, чем описанный выше, используя метод неопределенных множителей Лагранжа. Если характеристика $f_i(P_i)$ задана упорядоченным множеством пар координат точек

$$\{(P_{i1}, T_{i1}), (P_{i2}, T_{i2}), \dots, (P_{il}, T_{il})\} P_{k+1} > P_k, k = 1, 2, \dots, l-1,$$

то критерием выпуклости характеристики является условие

$$\varepsilon_{i,k+1} \geq \varepsilon_{i,k}, k = 1, 2, \dots, l-1,$$

где

$$\varepsilon_{i,k} = \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{P_{i,k+1} - P_{i,k}}.$$

Из изложенного вытекает, что вид расходной характеристики $\varphi_i(P_i)$ полностью определяется заданием множества $\hat{A}_i^{(t)}$ и предысторией его образования, определяющих вид характеристик $\varphi_{i,j}(P_{i,j})$ для всех $j \in A_i^{(t)}$, то есть заданием тройки множеств

$$(\hat{A}_i^{(t)}, \Delta \hat{A}_i^{(t)}, \Delta \hat{A}_i^{(t)}).$$

Здесь $\Delta \hat{A}_i^{(t)}, \Delta \hat{A}_i^{(t-1)}$ – множества агрегатов, включаемых из горячего резерва и выводимых из работы в горячий резерв к началу t -го часа.

$$\hat{A}_i^{(t)} = (\hat{A}_i^{(t-1)} \setminus \Delta \hat{A}_i^{(t)}) \cup \Delta \hat{A}_i^{(t)}.$$

Если характеристики, соответствующие различным сочетаниям множеств $A_i^{(t-1)}, \Delta A_i^{(t)}, \Delta B_i^{(t)}$, возникающим в ходе рассматриваемого процесса оптимизации суточного режима, формируются по мере необходимости, то это в неприемлемой степени замедлит решение задачи. Потому целесообразно заранее построить различные наборы характеристик станций, записывая их в соответствующие файлы прямого

доступа. Однако если в качестве возможных множеств $A_i^{(t)}$, $\Delta A_i^{(t)}$, $\Delta B_i^{(t)}$ рассматривать все совместимые тройки сочетаний агрегатов станций, то файл окажется чрезмерно большим. В связи с этим наиболее рациональным представляется путь, состоящий в следующем.

Первоначально формируемый файл содержит характеристики станций, соответствующих лишь наиболее вероятной части сочетаний множеств $A_i^{(t-1)}$, $\Delta A_i^{(t)}$, $\Delta B_i^{(t)}$. Если затем в процессе оптимизации суточного режима возникает необходимость в характеристике станции, отсутствующей в файле, следует обратиться к специальной программе коррекции, которая строит необходимую характеристику и пополняет ею файл.

Алгоритм оптимизации состава работающих агрегатов и распределения активных мощностей на электростанции

Пусть для рассматриваемого часа суток задано множество G агрегатов, находившихся в предшествующий час в состоянии горячего резерва, и A множество агрегатов, которые были включены в работу в предшествующий час. Тогда, если $f_\tau(P_\tau)$ – расходная характеристика τ -го агрегата, определенная на отрезке $P_{\tau min} \leq P_\tau \leq P_{\tau max}$ (если агрегат теплофикационный, тепловая нагрузка предполагается заданной), то для решения задачи одновременной оптимизации состава и нагрузок агрегатов их характеристики $\varphi_\tau(P_\tau)$ должны быть заданы следующим образом:

- при $\tau \in G$

$$\varphi_\tau(P_\tau) = f_\tau(P_\tau) + C_\tau,$$

C_τ – расход топлива на пуск агрегата;

- при $\tau \in A$

$$\varphi_\tau(P_\tau) = \begin{cases} f_\tau(P_\tau), & P_{\tau min} \leq P_\tau \leq P_{\tau max}, \\ D_\tau, & P_\tau = 0, \end{cases}$$

D_τ – расход топлива на останов агрегата.

Сформулируем рассматриваемую задачу оптимизации:

$$\sum_{\tau=1}^n \varphi_\tau(P_\tau) \rightarrow \min;$$

$$\sum_{\tau=1}^n P_\tau = P;$$

$$(P_1 = 0) \nabla (P_{1min} \leq P_1 \leq P_{1max}); \quad (7)$$

$$(P_2 = 0) \nabla (P_{2min} \leq P_2 \leq P_{2max});$$

$$(P_n = 0) \nabla (P_{nmin} \leq P_n \leq P_{nmax}),$$

где P – заданная активная нагрузка станции; $n = |A \cup G|$ – количество агрегатов станции, находившихся в работе или горячем резерве к началу рассматриваемого часа суток; ∇ – символ логической операции «исключающее ИЛИ». Решение задачи (1) при использовании метода динамического программирования состоит из двух этапов: прямого хода и обратного.

Прямой ход заключается в построении двух функций двух переменных: функции Беллмана $G(Y, \tau)$ и зависимости P_τ^{opt} , которые определяются следующим образом:

- при $\tau = 1$

$$G(Y, 1) = \varphi_1(Y),$$

где

$$(Y = 0) \nabla (P_{1min} \leq Y \leq P_{1max});$$

$$P_\tau^{opt}(Y) = Y;$$

$\varphi_1(Y)$ – расходная характеристика 1-го агрегата;

- при любом фиксированном τ , $1 < \tau \leq n$

$$G(Y, \tau) = \min_{P_\tau} [\varphi_\tau(P_\tau) + G(Y - P_{\tau, \tau-1})]. \quad (8)$$

Значение независимой переменной $P_{\tau}^{opt}(Y)$ является решением одномерной задачи оптимизации (8) при соответствующем фиксированном Y :

$$(Y=0)\nabla \left[\begin{array}{l} \min P_{i\min} \leq Y \leq \sum_{i=1}^{\tau} P_{i\max}, \\ 1 \leq i \leq \tau, \end{array} \right];$$

$$\left((Y < P_{\tau\min}) \wedge (P_{\tau} = 0) \right) \nabla \left((Y \leq P_{\tau\min}) \wedge (P_{\tau\min} \leq P_{\tau} \leq \min(P_{\tau\max}, Y)) \right).$$

Обратный ход состоит в последовательном определении искомым оптимальных мощностей агрегатов:

$$P_n^* = P_n^{opt}(P), P_{n-1}^* = P_{n-1}^{opt}(P - P_n^{opt}), \dots, P_1^* = P_1^{opt}\left(P - \sum_{\tau=2}^m P_{\tau}^*\right). \tag{9}$$

Если в соответствии с (9) для $\tau \in G$ получим $P_{\tau}^* \neq 0$, это означает, что агрегат с номером τ должен быть включен в работу из резерва.

Если же для $\tau \in A$ найдём $P_{\tau}^* = 0$, ранее работавший агрегат должен быть остановлен.

Оптимизация состава работающего оборудования на тепловых электростанциях

Во всем комплексе задач для поиска оптимальных режимов электроэнергетической системы особое место занимает задача получения эквивалентной (результатирующей) характеристики электростанции. В любом случае эта задача сводится к определению оптимального состава работающего энергооборудования.

Предполагается, что предварительно составляется прогноз совмещенного графика нагрузки энергопотребления промышленных и хозяйственных объектов, поскольку выгодность включения или отключения агрегатов в каждый момент времени зависит не только от текущего, но и от последующих режимов. Естественно, необходимо предварительно знать реальную расходную характеристику энергооборудования, которая должна быть своевременно скорректирована с учетом реального состояния каждого агрегата и внешних атмосферных условий.

Учет состава работающего оборудования на КЭС и ТЭЦ в приближенной постановке выполняется следующим образом. На первом этапе проводится выбор холодного резерва КЭС. Для этого ищется максимальная нагрузка P_{max} (ТЭЦ + КЭС) в течение рассматриваемых суток, которая приходится на КЭС и ТЭЦ энергосистемы. Пусть для этого часа известны тепловые нагрузки ТЭЦ и, соответственно, расходные характеристики ТЭЦ

$$B_{\tau}(P_{\tau}, Q_{\xi}, \dots),$$

где Q_{ξ} – тепловые отборы на ТЭЦ для рассматриваемого часа (фиксированные величины).

Вид расходной характеристики τ -го агрегата при заданных Q_{ξ} представлен на рисунке 1. Заменяем действительную расходную характеристику каждого блока КЭС заведомо выпуклой путем проведения из начала координат касательной к исходной характеристике и замены части характеристики левее точки касания отрезком касательной (рис. 2).

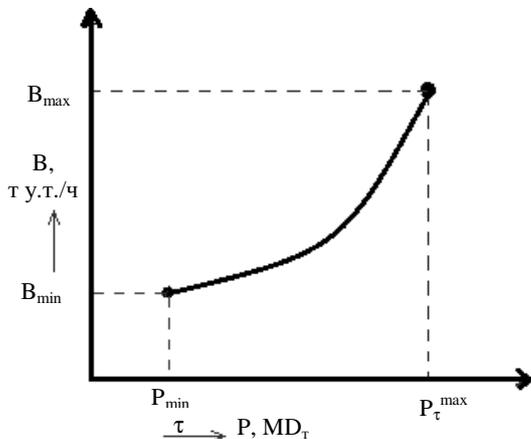


Рис. 1. Расходная характеристика энергоагрегата

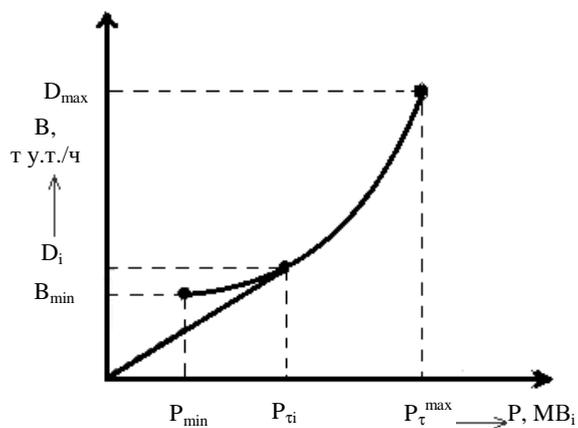


Рис. 2. Линеаризованная характеристика

Пусть выполняется условие:

$$\Sigma P_{\tau}^{\min}(\text{ТЭЦ}) + \Sigma P_{\tau}^{\min}(\text{КЭС}) \leq P_{\Sigma}^{\min}, \quad (10)$$

где P_{Σ}^{\min} – минимальная суммарная в течение суток нагрузка на всех ТЭЦ и КЭС.

Если это условие выполняется, то для ТЭЦ с небольшим минимальным удельным расходом перестроим характеристику $B_{\tau}(P_{\tau}, Q_{\tau})$ таким же образом, как и для блоков с учетом минимальной электрической нагрузки, заданной по режимным соображениям в данном узле P_{τ}^{\min} , и проверяем условие (10) без этой ТЭЦ, и так до тех пор, пока оно не будет удовлетворяться, то есть придется какую-то ТЭЦ отключить электрически полностью, что нереально).

Итак, проводим распределение P_{Σ}^{\max} между блоками КЭС с использованием характеристики $B_{k\tau}^0$, ($k = 1, 2, \dots, \alpha$; τ – номер блока на k -й КЭС) и для ТЭЦ – характеристик B_e или B_e^0 (при использовании характеристики B_e^0 электрическая нагрузка на ТЭЦ может попасть в недопустимую область $0 \leq P_e^0 \leq P_{\min}$. В этом случае считаем, что на ТЭЦ происходит снабжение потребителей теплом через редуциционно-охладительные установки или пиковые котельные).

Распределение активных нагрузок между эквивалентными генерирующими источниками может быть выполнено на основе модифицированного алгоритма, реализующего традиционную модель равенства удельных приростов расходов электростанций с учетом минимальной электрической нагрузки каждой КЭС по режимным параметрам [2].

Для тех блоков k -й КЭС, у которых электрическая нагрузка оказалась равной нулю, оставляем прежние расходные характеристики $B_{k\tau}^0(P)$, $k = 1, 2, \dots, \alpha$. В противном случае характеристики $B_{k\tau}^0(P)$ перестроим вторично с учетом линейности функции пусковых расходов. Полученную таким образом точку на оси ординат обозначим $B_{k\tau}^0$ (рис. 3). Перестроенная расходная линеаризованная характеристика представлена на рисунке 4. Здесь $B_{k\tau}^{\text{пуск}}$ – расход топлива на пуски через 1 час простоя.

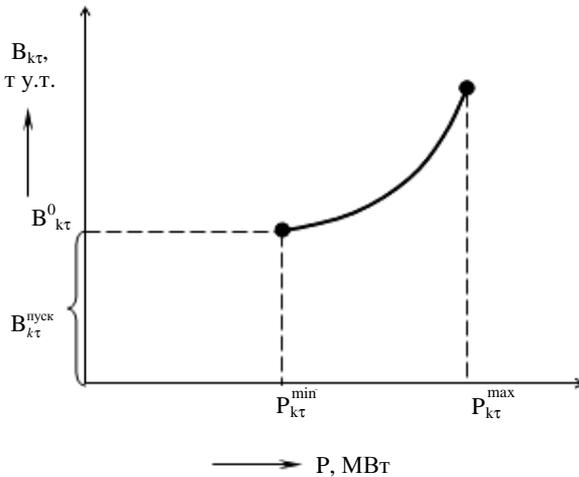


Рис. 3. Перестроенная характеристика агрегата

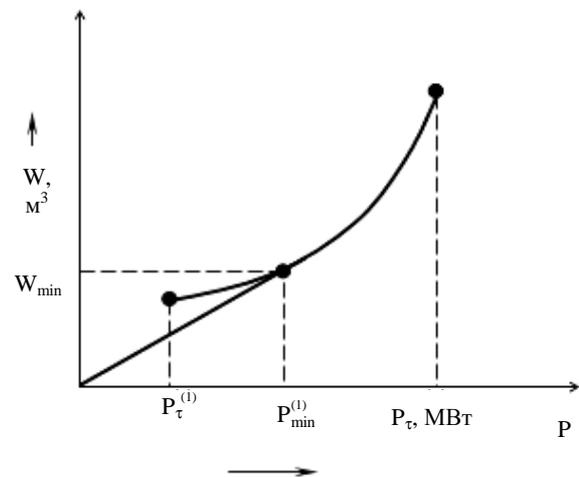


Рис. 4. Модернизированная характеристика агрегата

Используя перестроенные расходные характеристики блоков КЭС (с учетом и без учета пусковых расходов), построим расходную характеристику КЭС по критерию равенства удельных приростов.

Минимальная генерация на КЭС задается согласно режимным условиям, поскольку из построения $B_k^0(P_k)$ видно, что $P_k^{\min} = 0$. Допустимая область нагрузки для каждой КЭС определяется отрезком $[P_k^{*\min}, P_k^{*\max}]$. Считаем, что режим рассчитывается для каждого часа, в течение которого любая нагрузка, электрическая или тепловая, условно постоянна.

Таким образом, очевидно, что в общем случае оптимальное распределение тепловой и электрической нагрузок для каждой ТЭЦ должно быть разным. Совместное решение этих задач в настоящее время пока не имеет удовлетворительной методики. Потому гарантированное решение достигается обычно традиционным путем при последовательном распределении сначала тепловой нагрузки на ТЭЦ, затем электрической. В этом случае любая ТЭЦ для каждого часа будет иметь свою характеристику

$$B_e(P_e, Q_1, \dots) \Leftrightarrow B_e(P_e, t),$$

или

$$B_e^0(P_e, Q_1, \dots) \Leftrightarrow B_e^0(P_e, t), t = 1, 2, \dots, 24,$$

где t – рассматриваемый час.

Последние характеристики получить проще. В случае их отсутствия на первых порах можно пользоваться расходными характеристиками ТЭЦ $B_e(P_e)$ или $B_e^0(P_e)$, рассчитанными при среднесуточных значениях тепловых отборов (Q_1, \dots).

Оптимизация распределения нагрузок между тепловыми и гидравлическими электростанциями

При решении задачи оптимального распределения нагрузок между ТЭС и ГЭС электрическая нагрузка распределяется традиционным путем по критерию равенства удельных приростов ТЭС и приведенных удельных приростов ГЭС ($\lambda_m d_m$), где d_m – удельный прирост ГЭС (м^3 воды/ч МВт); λ_m – коэффициент приведения цены 1 м^3 воды к топливному эквиваленту.

Для любой ГЭС на каждые сутки должны быть заданы:

- 1) суточный расход воды $W_m^{\text{сут}}$;
- 2) минимальный часовой пропуск воды через плотину W_m^{min} ;
- 3) расходные характеристики каждой турбины $W_{mi}(P_{mi}, H_m)$, $m = 1, 2, \dots, \gamma$;
- 4) i – номер турбины на ГЭС;
- 5) напор воды H , м.

Считаем, что величина H постоянна в течение суток, поэтому расходные характеристики $W_{mi}(P_{mi}, H_m)$ вырождаются для текущих суток в $W_{mi}(P_{mi})$

Перестроим характеристики $W_{mi}(P_i)$ (см. рис. 4). Опять же должна быть задана минимальная допустимая электрическая нагрузка на ГЭС. Последняя будет определяться двумя условиями:

- а) режимными $P_{\min i}^{(1)}$;
- б) минимальным пропуском воды $P_{\min}^{(2)}$.

Берем максимальные из них.

Пусть это будет $P_{\min}^{(1)}$, тогда сразу же минимальный пропуск воды должен быть увеличен до величины $P_{\min}^{(1)}$, соответствующей электрической выработке $P_{\min i}^{(1)}$.

В противном случае $P_{\min}^{(1)}$ следует уменьшить до нарушения условия (11):

$$24W_{\min}^{(1)} > W_{\min}^{(\text{сум})}. \quad (11)$$

Решается задача распределения электрических нагрузок между ТЭС и ГЭС (в концентрированной энергосистеме приближенный учет потерь в сети выполняется с помощью постоянных коэффициентов по методу покоординатной оптимизации) при условии, что для каждой ГЭС

$$\min_t W_m [P_m(t)] \geq W_{\min} \cdot \forall m;$$

$$\sum W_m [P_m(t)] \leq W_{\min}^{(24 \text{ ч})}$$

(при избытке воды часть ее сбрасывается в обход турбины).

В результате решения получим для каждого часа генерацию на любой ГЭС. Эта генерация в дальнейших расчетах считается постоянной. Так как учет пусковых расходов на КЭС производится уже после расчета генерации на ГЭС, то используются характеристики блоков КЭС $B^0(P_k)$, построенные без часовых расходов на пуски.

Оптимальное распределение активных мощностей между агрегатами электростанции с учетом ограничений на скорость набора и снятия нагрузки

Рассмотренная выше модель оптимизации режима по активной мощности не учитывает существенного технического ограничения, состоящего в том, что возможное изменение загрузки агрегата от предшествующего значения до значения, задаваемого на рассматриваемый час суток, ограничено допустимой скоростью набора $V_{i,j}^{\text{наб}}$ или снятия $V_{i,j}^{\text{сн}}$ нагрузки. Это ограничение можно учесть путем соответствующего задания располагаемого диапазона мощностей агрегатов в зависимости от их предшествующего состояния (горячий резерв или работа с нагрузкой $P_{i,j}^{(t-1)}$).

Естественно допустить, что если по условиям оптимизации должны производиться набор или снятие нагрузки с агрегата, то средняя за час нагрузка такого агрегата составит половину от предельного

значения, достижимого соответственно при наборе или снятии нагрузки в течение часа. Отсюда следует, что задачу оптимизации режима станции на t -й час суток можно сформулировать следующим образом:

$$\sum_{j \in A_i^{(t)}} \varphi_{ij}(P_{ij}^t) \rightarrow \min;$$

$$\left((P_{ij}^{(t)} = 0) \wedge \left(P_{ij}^{(t)} - \frac{V_{ij}^{cn}}{2} \leq P_{ij \min} \right) \right) \vee \left(P_{ij}^{(t-1)} - \frac{V_{ij}^{cn}}{2} \leq P_{ij}^{(t)} \leq \min \left(P_{ij \min}, P_{ij}^{(t)} + \frac{V_{ij}^{cn}}{2} \right) \right) \wedge \left(P_{ij}^{(t-1)} - \frac{V_{ij}^{cn}}{2} \geq P_{ij \min}, j \notin nA_i^{(t)} \right);$$

$$(P_{ij}^{(t)} = 0) \nabla \left(P_{ij \min} \leq P_{ij}^{(t)} \leq P_{ij \min} + \frac{V_{ij}^{nab}}{2} \right), j \in B_i^{(t)}.$$

Поскольку в этом случае вид расходной характеристики при такой постановке задачи зависит от нагрузок агрегатов в предшествующий час суток, эти характеристики, в отличие от рассмотренных выше, должны формироваться непосредственно в процессе решения межстанционной задачи оптимизации.

Заключение. Предлагаемые здесь способы для выбора наилучшего состава работающего оборудования обеспечивают гарантированное решение задачи в упрощенной постановке. Условно-линейная аппроксимация расходных характеристик позволяет выбрать оптимальный состав энергооборудования с учетом их рациональной загрузки.

Различные сочетания агрегатов на электростанции соответствуют разным совмещенным энергетическим характеристикам, которые принимаются выпуклыми. Это обстоятельство позволяет использовать традиционную методику оптимизации по критерию минимума расхода условного топлива. При использовании характеристиками агрегатов, приведенными к базисной стоимости топлива, оптимизация выполняется по критерию минимума суммарной стоимости условного топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Урин, В.Д. Оптимизация состава включенного оборудования энергосистемы / В.Д. Урин // Электричество. – 1980. – № 9. – С. 56–57.
2. Бурначян, Г.А. Выбор оптимального состава работающего оборудования в электроэнергетической системе / Г.А. Бурначян, Р.Р. Овакимян // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1982. – № 1. – С. 11–16.
3. Elasma, A.J. Security constrained dispatch at the New York power pool / A.J. Elasma, S.L. Corey // IEEE. Transaction on Power Systems. – 1982. – № 8. – Р. 2876–2883.
4. Александров, О.И. Оптимизация суточного режима энергосистемы по активной мощности с учетом потерь в сети методом динамического программирования / О.И. Александров, С.В. Домников, Г.Г. Бабкевич // Изв. РАН. Энергетика. – 1993. – № 1. – С. 81–97.
5. Hadley, G. Nonlinear and dynamic programming / G. Hadley. – London, Palo Alto. 1964. – 384 с.
6. Александров, О.И. Оптимизация режима электроэнергетической системы с выбором состава основного оборудования в период ремонтной кампании / О.И. Александров, С.В. Домников, А.М. Бакановский // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 6. – С. 3–16.

Поступила 03.04.2015

ENERGY SAVING METHOD FOR THE POWER OBJECTS EQUIPMENT SELECTION

O. ALEXANDROV, D. SVIRSKY, T. JUKOVSKAYA

Both the general problem and the strategy for choosing the optimal composition of the main equipment of a complex power system consisting of condensation, thermal and hydraulic electric power stations are given in the article. The conventional indicators – a minimum fuel consumption in the thermal power stations and a minimum flow of water in the hydroelectric power stations are the optimization criteria. An approximate solution to this task based on the quasi-linear approximation of the power equipment flow characteristics. The algorithm for a simultaneous optimization of a set of the operating units and their rational loading taking into account a fuel consumption for starts and stops is described too. The efficiency function of the task is determined in the domain of this function that is formed by a system of regime-and-technological constraints.

УДК 621.311.22

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЯХ**

*канд. техн. наук В.Е. ПИТОЛИН
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматриваются важные для экономики любого государства вопросы формирования тарифов на тепло- и электроэнергию. Основой для формирования тарифов служат показатели топливоиспользования при выработке электроэнергии и отпуске тепла, так как стоимость топлива составляет основную долю затрат на их производство. Показано, что наиболее экономичным является комбинированное производство электроэнергии и тепла на теплоэлектроцентралях. Анализируется действующая методика распределения затрат топлива на производство электроэнергии и отпуск тепла от ТЭЦ, рассматриваются варианты ее совершенствования.

Производство тепловой энергии на тепловых электростанциях позволяет экономить свыше 30 % топлива на выработку электроэнергии по сравнению с конденсационной выработкой, характеризующейся сбросом тепла конденсации рабочего тела в окружающую среду [1–3]. Но при этом расход топлива на отпуск тепла от теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) формально оценивается так называемым «физическим» методом, то есть приравнивается количеству топлива с низшей теплотой сгорания, которое необходимо потратить с учетом усредненного КПД, присущего промышленным котельным, чтобы получить данное количество тепла [4]. Этот показатель топливоиспользования для ТЭЦ в среднем составляет 167 килограмм условного топлива на гигакалорию без учета физических параметров теплоносителя. Оставшаяся часть общей величины расхода топлива на ТЭЦ относится на выработку электроэнергии, что существенно (в 1,5...2 раза) улучшает его по сравнению с конденсационными электростанциями.

Такой подход к оценке топливоиспользования на ТЭЦ был принят в 60-х годах XX столетия [2] и для централизованной экономики того времени существенно упрощал взаиморасчеты между потребителями и производителями тепла, приводя котельные и ТЭЦ как источник теплоты в равные условия хозяйствования. Но при этом существовали достаточно строгие ограничения для потребителей на строительство собственных источников тепла в зоне теплофикации ТЭЦ.

В современных условиях такой метод расчета показателей топливоиспользования приводит к парадоксальным результатам: ТЭЦ как источники теплоты стали неконкурентоспособны. Ограничения сняты и потребители тепла в массовом порядке устанавливают свои теплоисточники (локальные и крышные котельные), обосновывая свои действия прежде всего низким КПД теплофикации.

Однако здесь, прежде всего, следует понимать, что каким бы высоким ни был КПД современного водогрейного котла, он *потребляет энергию* (горения топлива или электрическую), а теплофикационный источник ТЭЦ *возвращает энергию* конденсации отработавшего пара, которая в противном случае должна быть утилизирована. А утилизируемая теплота от ТЭЦ, в свою очередь, подлежит налогообложению, как и любой другой вид загрязнения окружающей среды.

Возникает вопрос, о каком сравнении КПД в таком случае идет речь. По нашему мнению, авторы анализируемого расчета таким образом пытаются объяснить тарифы на тепловую энергию от ТЭЦ, которые при определенных экономических условиях действительно могут стать выше затрат на топливо для локальных котельных, что недопустимо.

В настоящее время в энергетике ведется большая работа по совершенствованию методов расчета показателей топливоиспользования на ТЭЦ с целью повышения их конкурентоспособности.

Рассмотрим порядок комбинированного производства тепловой и электрической энергии. На рисунке 1 изображены упрощенные типовые тепловые схемы отдельного (а) и комбинированного (б) производства электрической и отпуски тепловой энергии. Обычно обращают внимание на тот факт, что конденсационная электростанция вынуждена сбрасывать тепло конденсации Q_k в окружающую среду, в то время как потребители тепла тратят дополнительное топливо на производство аналогичного количества тепловой энергии Q_T . Здесь следует отметить, что напрямую использовать низкопотенциальную теплоту конденсации для теплофикационных нужд не представляется возможным, так как отработанный пар на выходе из конденсационной турбины имеет температуру 30...50 °С, что в 2...3 раза ниже требуемой для теплофикации. Поэтому на ТЭЦ используется пар из промежуточных отборов турбины с большей температурой, что сопровождается некоторой недовыработкой электроэнергии, либо применяется турбина с противодавлением (без конденсатора).

На рисунке 1, б показана совмещенная (когенерационная) схема теплоэлектроцентрали с комбинированной выработкой электроэнергии и теплоты. Топливо B , поступающее в энергетический котел 1, расходуется на выработку пара высокого давления. Энергия пара преобразуется в паровой турбине 2 в механическую энергию и затем в электрическую W .

В соответствии с законами термодинамики часть тепла Q_k безвозвратно теряется в конденсаторе паровой турбины. Поэтому тепловой КПД такой станции обычно не превышает 40 %, а расход топлива на выработку электрической энергии существенно выше среднего. Например, для Лукомльской ГРЭС этот показатель равен $b_{кэс} = 311$ г у.т./КВт·ч (www.vitebsk.energo.by/about/filials/), в то время как средний по Беларуси $b = 255$ г у.т./КВт·ч (www.minenergo.gov.by/ru/statist/). Это тепло вполне можно использовать в системе теплофикации, если весь пар из паровой турбины направить в подогреватель сетевой воды, демонтировав последние ступени ротора турбины. Схема такого решения и показана на рисунке 1, б. Для обеспечения потребителей дополнительным теплом в моменты пиковой нагрузки в тепловую схему ТЭЦ обычно вводится редуцирующее охлаждающее устройство 12, предназначенное для снижения температуры и давления острого пара за счет впрыска питательной воды.

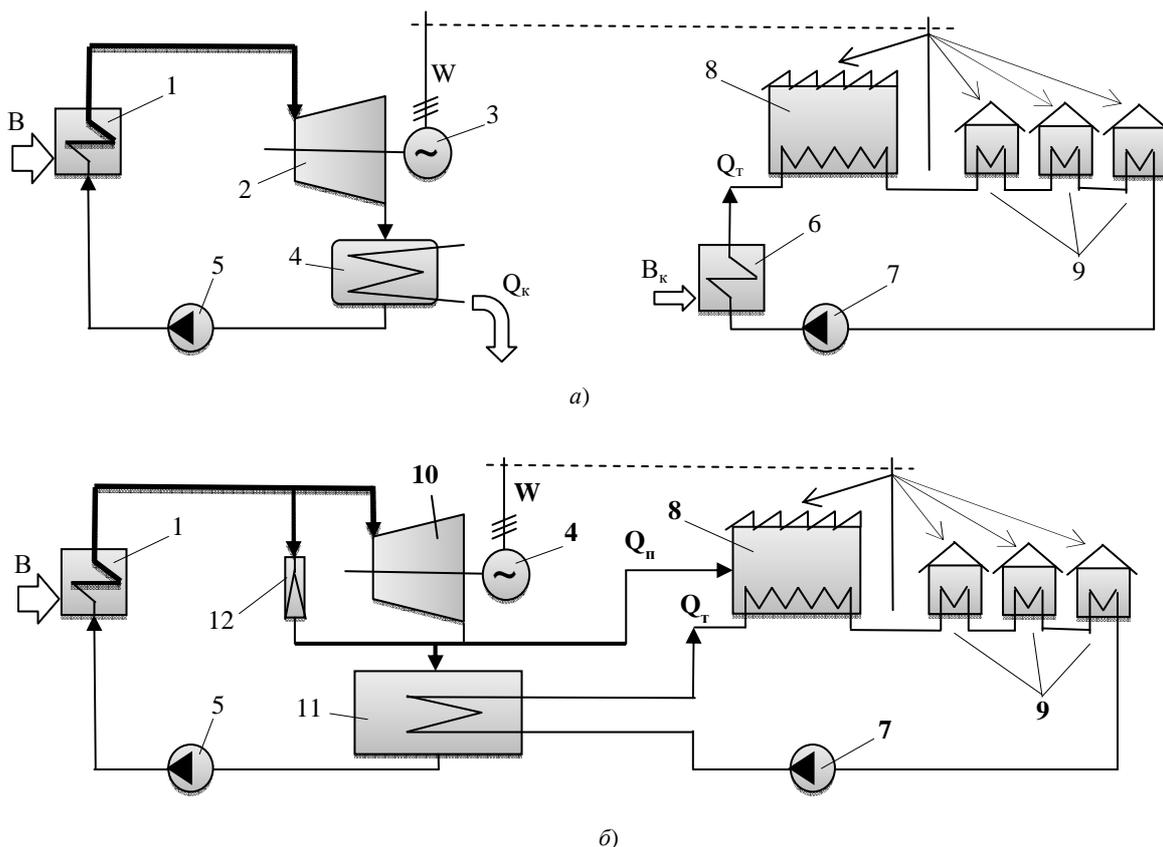


Рис. 1. Схема раздельного и комбинированного производства электроэнергии и тепла на ТЭЦ:
 а – раздельная выработка электроэнергии на конденсационной ЭС и тепла в котельной;
 б – комбинированная выработка электроэнергии и тепла на теплофикационной ТЭЦ;
 1 – паровой энергетический котел; 2 – паровая турбина конденсационного типа К (например, К-300-240);
 3 – электрогенератор; 4 – конденсатор паровой турбины, 5 – питательный насос;
 6 – водогрейный отопительный котел; 7 – сетевой насос системы отопления;
 8, 9 – промышленные и бытовые (население) потребители тепла и электроэнергии;
 10 – теплофикационная паровая турбина с противодавлением типа Р (например, Р-50);
 11 – подогреватель сетевой воды (ПСВ); 12 – редуцирующее охлаждающее устройство (РОУ)

На примере упрощенной схемы тепловой электростанции, приведенной на рисунке 1 б, рассмотрим действующую методику расчета показателей топливоиспользования на ТЭЦ [4], а также предлагаемые к использованию современные методы расчета тепловой экономичности работы оборудования тепловых электростанций. Расчет по методике [4] ведется за прошедший отчетный период (месяц или сутки). Сначала рассчитывается количество тепла, вносимое в топку котлов. Пренебрегая прочими источниками можно считать, что в топках при сгорании топлива образуется $Q_{вн}$ гигакалорий теплоты:

$$Q_{вн} = \eta_k q_T V_T, \quad (1)$$

где η_k – КПД парового котла; V_T – суточный или месячный объем сожженного топлива (природного газа); q_T – низшая удельная теплота сгорания используемого топлива за отчетный период.

Затем определяется суммарный расход тепла на собственные нужды станции и возможные потери теплового потока по различным причинам.

Расчет потерь является формализованным и не зависит от паровой нагрузки котлов (только от суммарного времени τ_k работы котлов за отчетный период):

$$Q_{\text{пот}} = \sum_i Q_i + Q_{\text{тп}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{тп}} = 3,75 \cdot \tau_k$ – потери теплового потока.

Заметим, что потери теплового потока могут составлять до 75 % от всех остальных потерь.

Оставшееся тепло Q расходуется только на отпуск тепла с коллекторов ТЭЦ $Q_{\text{тэц}}$ и электроэнергии с шин ТЭЦ $W_{\text{тэц}}$:

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{тэц}} + Q_3 + Q_{\text{вн}} - Q_{\text{тп}}. \quad (3)$$

Ориентировочно определяется количество и доля тепла, которое расходуется только на выработку и отпуск электроэнергии с шин ТЭЦ:

$$Q_3 = Q - 1,034 \cdot Q_{\text{тэц}} + 0,7W_{\text{тфу}}, \quad (4)$$

$$k_3 = \frac{Q}{Q_3},$$

где $Q_{\text{тэц}}$ – отпуск тепла от ТЭЦ с паром и сетевой водой по данным систем коммерческого учета; $W_{\text{тфу}}$ – расход электроэнергии на теплофикационную установку (сетевые насосы).

По вычисленному долевному соотношению k_3 выполняется распределение затрат электрической энергии на производство электроэнергии:

$$W_3 = k_3 W_{\text{кц}} + W_{\text{тп}} \quad (5)$$

и тепла:

$$W_{\text{т}} = (1 - k_3) W_{\text{кц}} + W_{\text{тфу}}, \quad (6)$$

Здесь $W_{\text{кц}}$ – расход электроэнергии на циркуляционные, конденсатные, дренажные насосы и прочее электрооборудование турбинного цеха; $W_{\text{тп}}$ – расход электроэнергии на питательные насосы, тягодутьевые вентиляторы и прочее оборудование котельного цеха.

Вычисляется расход условного топлива на отпуск тепла с коллекторов ТЭЦ в кг у.т./Гкал:

$$b_{\text{т}} = \frac{[(1 - k_3)Q_{\text{вн}} + q_{\text{эkv}} \cdot W_3] \cdot 1000}{Q_{\text{тэц}} \cdot 7} \quad (7)$$

и расход условного топлива на отпуск электроэнергии с шин ТЭЦ в г у.т./КВт·ч:

$$b_3 = \frac{(k_3 \cdot Q_{\text{вн}} + q_{\text{эkv}} \cdot W_3) \cdot 1000}{q_{\text{эkv}} \cdot W_{\text{тэц}} \cdot 7}, \quad (8)$$

где $q_{\text{эkv}}$ – физический эквивалент 1 МВт·ч, равный 0,86 Гкал/МВт·ч [3,6 ГДж/МВт·ч]; $W_{\text{тэц}}$ – отпуск электроэнергии с шин ТЭЦ по данным коммерческого учета (МВт·ч).

Основное преимущество данной методики – ее простота.

Выполнив расчет показателей топливоиспользования по этой методике для ТЭЦ, представленной на рисунке 1, б, получим: $b_3 = 140 \dots 180$ г у.т./КВт·ч – удельные расходы условного топлива на отпуск электроэнергии от ТЭЦ; $b_{\text{т}} = 167,3$ кг у.т./Гкал – удельный расход условного топлива на отпуск теплоты.

Методика [4] не предназначена для анализа режимов работы ТЭЦ. Так, например, если при неизменном отпуске электроэнергии с шин увеличить отпуск тепла за счет пропуска острого пара через РОУ 12 (см. рис. 1, б), то расход топлива тоже увеличится, но потери согласно формуле (2) при этом останутся неизменными. В то же время уменьшение коэффициента k_3 (4), определяющего долю отнесения потерь на производство электроэнергии по формулам (7) и (8), приведет к снижению удельного расхода топлива на отпуск электроэнергии. Этот «эффект» будет увеличиваться при повышении реального КПД энергетических котлов. Более того, в связи с тем, что расчет потерь тепла на выработку тепла по методике зависит только от времени работы оборудования (но не от тепловой производительности), то для постоянных интервалов времени эта величина будет постоянной и расход топлива на выработку тепла будет зависеть только от затрат электроэнергии, а их доля составляет не более 3 %. Поэтому величина расхода топлива на отпуск тепла для ТЭЦ, рассчитанная по этой методике, составляет $197 \pm 1,5$ кг у.т./Гкал и незначительно изменяется только от доли отпуска электроэнергии с шин (см., например, график по ссылке: www.minenergo.gov.by/ru/statist).

Таким образом, подтверждается заключение, что современные ТЭЦ (в том числе и комбинированные парогазовые ТЭЦ) как источники теплоты, приведены по показателю топливоиспользования на отпуск тепла к показателям обычной водогрейной котельной с КПД, равным 0,85...0,88 [4; 5]. Такой источник теплоты, расположенный, как правило, достаточно далеко от жилого сектора (что сопровождается дополнительными потерями в тепловых сетях) с позиций жилищно-коммунального хозяйства или иных потребителей тепла, действительно можно представить малоэффективным.

И если при централизованном планировании экономики СССР внедрение теплофикации позволило добиться значительных успехов в топливоиспользовании [1]: централизация теплоснабжения городского населения к 1990 году достигла 78 %, а уровень теплофикации ТЭЦ – 32 %, то после 1994 года в процессе перехода к рыночной экономике наметилась нежелательная тенденция отказа от теплофикации и строительства собственных источников теплоты, что явилось основной причиной повышения расхода топлива на выработку электроэнергии.

В научных кругах энергетиков и теплотехников ведется широкая дискуссия по затронутому вопросу. В некоторых странах использование методики [4] прекращено еще в 1995–1996 годах. Разработаны более совершенные методики (например, РД 34.08.552-95 в России и ГКД 34.09-103-96 в Украине), продолжается работа по их совершенствованию.

К настоящему времени разработано и применяется несколько вариантов более объективной оценки показателей топливоиспользования на ТЭЦ.

Вариант I

Определяется усовершенствованной методикой, разработанной СПО «ОРГРЭС» [6] с последующими дополнениями и уточнениями, принятой к использованию в России с 1995 года.

Здесь расход топлива на отпуск электроэнергии вычисляется по формуле:

$$B_3 = B_3 \cdot k_3, \quad (9)$$

где B – общий расход условного топлива; k_3 – коэффициент (доля) расхода топлива на производство электроэнергии.

Этот коэффициент по своему содержанию аналогичен коэффициенту в формуле (4), но определяется не формально, а по результатам теплового расчета турбины:

$$b_3 = \frac{Q_3 + \Delta Q_{3(\text{отр})}}{Q_3 + \Delta Q_{3(\text{отр})} + Q_T}. \quad (10)$$

Здесь Q_3 – расход теплоты на производство электроэнергии, рассчитываемый по формуле:

$$Q_3 = D_0 \cdot h_0 - (G_{\text{пв}} \cdot h_{\text{пв}} - Q_{\text{пвд}}) - Q_T, \quad (11)$$

где D_0 – расход свежего пара, поступающего на турбину; h_0 – энтальпия свежего пара перед турбиной; $G_{\text{пв}}$ – расход питательной воды; $h_{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды; $Q_{\text{пвд}}$ – отпуск теплоты от турбины на подогреватель высокого давления; Q_T – отпуск теплоты из теплофикационных отборов; $\Delta Q_{3(\text{отр})}$ – увеличение расхода теплоты на производство электроэнергии при отсутствии отпуска теплоты внешним потребителям из производственных отборов.

Величина дополнительного расхода теплоты определяется по нормативным характеристикам турбины для заданного режима с использованием формулы (12):

$$\Delta Q_{3(\text{отр})} = \sum_i Q_{\text{отб},i} (1 - \xi_i) + Q_{\text{ув}} (1 - \xi_{\text{ув}}) + (Q_{\text{конд}} - Q_{\text{ув}}), \quad (12)$$

где $Q_{\text{отб},i}$ – количество тепла, отпущенное внешним потребителям из производственных отборов; $Q_{\text{конд}}$ и $Q_{\text{ув}}$ – то же от конденсатора и от конденсатора с ухудшенным вакуумом; ξ_i и $\xi_{\text{ув}}$ – коэффициенты ценности теплоты, отпускаемой из каждого отбора и от конденсатора при работе с ухудшенным вакуумом.

Коэффициент ценности теплоты рассчитывается по формуле

$$\xi_i = \frac{h_{\text{отб},i} - h_{2k}}{h_0 - h_{2k}} \left(1 + K \frac{h_0 - h_{\text{отб},i}}{h_0 - h_{2k}} \right). \quad (13)$$

Здесь h_0 и $h_{\text{отб},i}$ – энтальпии пара перед турбоагрегатом и в каждом из отборов; h_{2k} – энтальпия пара в конденсаторе при фактической электрической мощности генератора, но при условии его работы в конденсационном режиме; K – эмпирический коэффициент, зависящий от давления острого пара перед турбиной. При давлении 13 МПа его значения рекомендуется принимать равными $K = 0,4$ [4].

Значения $\xi_{ув}$ определяются по формуле (13) при этом вместо $h_{отб,i}$ используется значение $h_{ув}$ (энтальпия пара при ухудшенном вакууме в конденсаторе).

При таком подходе количество топлива, приходящегося на производство теплоты, составит

$$B_T = B - B_3, \quad (14)$$

Значения удельных расходов топлива на отпуск тепла и электроэнергии определяются по формулам, аналогичным (7) и (8).

Безусловно, такой подход является более сложным, требующим ввода в расчет нормативных энергетических характеристик турбоагрегатов. Вводится формальное понятие ценности теплоты. Показатели топливоиспользования стали более объективными, что для производителя теплоты, поставленного в конкурентные условия рынка, является важным условием.

Удельные расходы условного топлива на отпуск электроэнергии от ТЭЦ, рассчитанные по этому методу, возросли до $b'_3 = 260$ г у.т./КВт·ч, а на отпуск теплоты уменьшились до $b'_T = 143$ кг у.т./Гкал.

Вариант II

Более простой вариант, изложен в работах Е.Я. Соколова [3].

Для теплофикационной станции рассматривается вариант совмещенной выработки электроэнергии. Полагая, что часть электрической энергии вырабатывается в теплофикационных турбинах с использованием части потока пара, пропускаемого в конденсатор, то есть конденсационным методом, общую выработку электрической энергии в турбогенераторе можно условно представить состоящей как бы из двух параллельных потоков пара, характеризующихся двумя слагаемыми:

$$W_{ТЭЦ} = W_T + W_K, \quad (15)$$

где W_T – теплофикационная выработка электроэнергии; W_K – конденсационная выработка электроэнергии.

Электроэнергия вырабатывается по теплофикационному циклу с удельными расходами b_T (когда все тепло конденсации, ухудшения вакуума, отопительных и производственных отборов используется для теплофикации) и конденсационному циклу с удельными b_K (в объеме пропуска пара в конденсатор).

Тогда доля расхода топлива на выработку электроэнергии определится следующим уравнением:

$$B_3 = b_T W_T - b_K (W - W_T). \quad (16)$$

Здесь $b_T = 0,165$ кг у.т./КВт·ч – удельный расход условного топлива для турбин Р-50 и ПТ-60 (65);

$b_K = 0,395$ кг у.т./КВт·ч – удельный расход условного топлива для турбин ПТ-60.

Величина выработки электроэнергии по теплофикационному циклу определится как сумма выработки по отпуску тепла из отопительного и производственных отборов пара по нормативным характеристикам турбины:

$$W_T = \sum_i W_{ПТ-60,i} (Q_i) + W_{P-50} (Q_{P-50}). \quad (17)$$

Количество топлива, приходящегося на производство теплоты, определится по уравнению (14).

Такой вариант расчета существенно проще предыдущего варианта, но поскольку величина удельного расхода топлива на теплофикационную выработку электроэнергии b_T оценивается без учета качества тепловой энергии, то показатель расхода топлива на отпуск тепла имеет большую погрешность расчета и может существенно отличаться от величины $b'_T = 143$ кг у.т./Гкал в сторону уменьшения показателя.

Вариант III

Данный вариант расчета показателей топливоиспользования на ТЭЦ предложен А.Э. Пииром и В.Б. Кунтышем [7].

Вариант основан на понятии эксергии [2] и предлагает относить к затратам топлива на отпуск тепла только ту его часть, которая определяется «недовыработкой» электроэнергии в теплофикационном цикле ТЭЦ. Для чего весь тепловой цикл работы электростанции разделяется на два: верхний, в котором выполняется выработка электроэнергии, и нижний – низкопотенциальный цикл, характеризующийся остатком невыполненной работы (эксергии), трансформирующейся в теплоту, отпускаемую потребителю.

Выполненный расчет показателей топливоиспользования на ТЭЦ по этому методу дает следующие значения: $b_3^{III} = 291$ г у.т./КВт·ч и $b_T^{III} = 106$ кг у.т./Гкал.

Вариант IV

Этот вариант (или метод Вагнера [2]) часто называют «Европейским» (или «Американским») [8], так как он применяется только в странах ЕС и США.

Метод предусматривает равенство затрат топлива на электроэнергию, производимую по теплофикационному и конденсационному циклу. Базовая величина удельного расхода топлива на выработку электроэнергии вне зависимости от способа выработки для стран ЕС устанавливается Международным

энергетическим агентством (МЭА), а для США – Федеральной энергетической комиссией (ФЭРК), и в настоящее время составляет $b_3 = 240$ г у.т./КВт·ч.

Оставшаяся экономия топлива при отпуске теплоты, если ТЭЦ удастся найти ее потребителя, остается в его распоряжении, что способствует снижению стоимости отпускаемой теплоты. В противном случае ТЭЦ может нести убытки из-за неэффективного использования топлива.

Такой метод расчета не несет существенного физического смысла и применяется только для экономических расчетов между сторонами.

Если в нашем случае за базовую величину расхода топлива на отпуск электроэнергии с шин принять определенную «эквивалентной ГРЭС», а именно равную 320 г у.т./КВт·ч, то удельный расход топлива на отпуск тепла для данной ТЭЦ сокращается в $3,7$ раза – с $b_T^I = 143$ до $b_T^{IV} = 39$ кг у.т./Гкал.

Для обобщения всех вариантов представим процесс расхода топлива при комбинированной выработке электроэнергии и отпуска тепла на ТЭЦ в виде уравнения

$$b_3^I \cdot W + b_T^I \cdot Q = B. \quad (18)$$

Преобразуем уравнение (18) в безразмерное выражение для прямой в отрезках:

$$\frac{b_3^I}{B/W} + \frac{b_T^I}{Q/W} = 1. \quad (19)$$

Построим график (рис. 2), на котором покажем значения удельных параметров топливоиспользования на ТЭЦ при постоянной величине расхода топлива за определенный период и соответствующем этому периоду отпуске электроэнергии и теплоты.

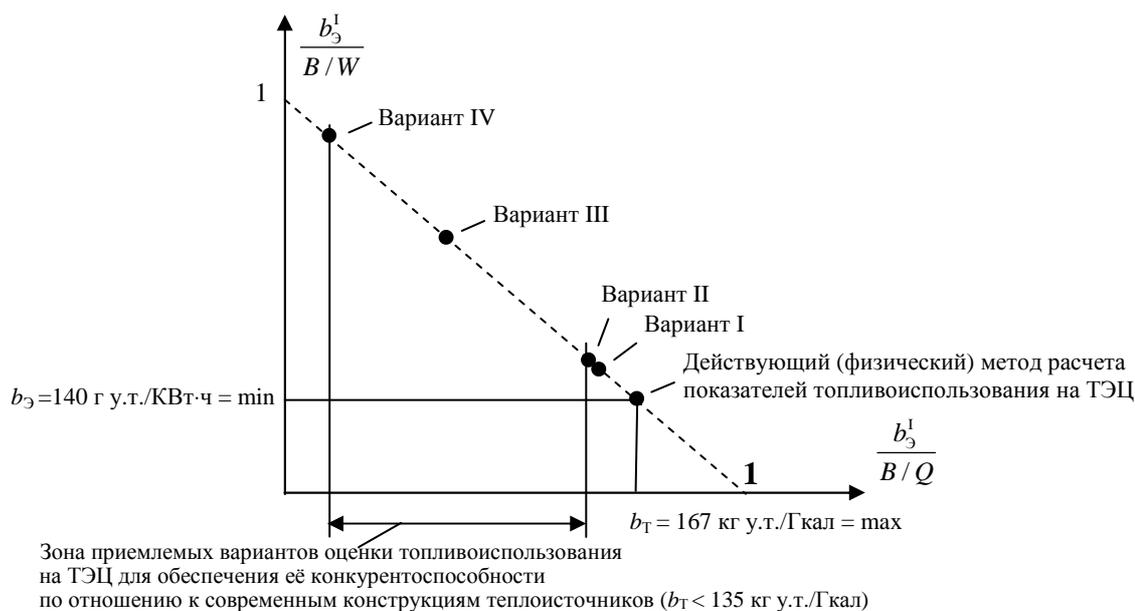


Рис. 2. Схема распределения значений показателей топливоиспользования на ТЭЦ для различных вариантов расчета при заданном режиме эксплуатации

На графике наглядно представлены все рассмотренные варианты расчета показателей топливоиспользования на ТЭЦ. Они существенно отличаются от действующего (физического) метода оценки, разработанного прежде всего для котельных, который можно рассматривать в качестве предельного для оценки отпуска теплоты от ТЭЦ по остальным вариантам. Это объясняется стремлением авторов в той или иной степени увязать показатели экономичности работы ТЭЦ с реальным физическим процессом преобразования тепловой энергии сгорания топлива в механическую работу, принципиально отличающимся от процесса диссипации теплоты в системах отопления с использованием обычных котельных.

В завершение следует отметить, что «физический» метод, используемый в настоящее время для оценки топливоиспользования на ТЭЦ [4], при формировании тарифов на тепло- и электроэнергию дополняется так называемым «экономическим» методом (подобным варианту IV), который позволяет частично компенсировать «низкоэкономичную» выработку тепловой энергии на ТЭЦ и обоснованно снижать тарифы на теплоту, получаемую за счет теплофикации.

При этом расход топлива на отпуск тепла оценивается «экономическим» методом по формуле

$$b_1^{\text{эк}} = b_1^{\text{физ}} - \frac{W_{\text{тэц}} b_3^{\text{кэс}} - b_2}{q_{\text{тэц}}}. \quad (20)$$

Здесь $b_3^{\text{кэс}} = 320$ г у.т./КВт·ч – расход топлива на отпуск электроэнергии от эквивалентной ГРЭС; $b_1^{\text{физ}}$ – расход условного топлива на отпуск тепла от ТЭЦ, рассчитанный по формуле (7).

Но расчет «экономической компенсации» ущерба от применения «физического» метода носит вспомогательный характер и в дальнейшем дополняется другими экономическими показателями (стоимость расходных материалов и запчастей, амортизация основных фондов, фонд зарплаты, капитальное строительство и т.п.), поэтому использовать его для сравнения с другими методами производства теплоты не представляется возможным. Потребителям гораздо удобнее сравнивать тарифы на отпуск тепла, а они сейчас, как правило, не в пользу ТЭЦ.

Заключение. Действующие в настоящее время методические указания расчета тепловой экономичности работы ТЭЦ по «физическому» методу [4] дают формально завышенный расход топлива на производство тепловой энергии, что не позволяет ей успешно конкурировать с собственными теплоисточниками потребителей тепла, отказывающихся от централизованного теплоснабжения из-за высоких тарифов на тепло. Уменьшение объемов централизованного теплоснабжения, в свою очередь, приводит к снижению выработки электроэнергии на ТЭЦ по экономичному (тепловому) графику и передаче электрической нагрузки на ГРЭС, обладающей более высокими энергозатратами на производство электрической энергии, и следовательно к повышению затрат топлива на производство электрической энергии.

Внедрение одного из четырех рассмотренных вариантов расчета показателей топливоиспользования при комбинированной выработке тепла и электроэнергии на ТЭЦ (предпочтительным является вариант III – эксергетический) позволит более объективно подходить к формированию тарифов на теплофикационные источники тепла, что обеспечит условия для поддержания и дальнейшего развития теплофикации в Республике Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трухний, А.Д. Основы современной энергетики: курс лекций для менеджеров энергетических компаний: в двух ч. / А.Д. Трухний, А.А. Макаров, В.В. Клименко; под общ. ред. акад. РАН Е.В. Аметистова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – Ч. 1. Современная теплоэнергетика. – 368 с.
2. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 279 с.
3. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник / Е.Я. Соколов. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
4. Методические указания по подготовке и передаче информации о тепловой экономичности работы электростанций и энергосистем: МУ 34-70-065-84. – М.: СПО «Союзтехэнерго», 1984. – 34 с.
5. Качан, С.А. Определение показателей топливоиспользования теплофикационных парогазовых установок утилизационного типа / С.А. Качан // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика. – 2010. – № 6. – С. 84–90.
6. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования: РД 34.08.552-95. – М.: СПО ОРГРЭС, 1995. – 34 с.
7. Пиир, А.Э. Методика расчета тепловой эффективности ТЭЦ с различными тепловыми двигателями / А.Э. Пиир, В.Б. Кунтыш, А.Ю. Верещагин // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика. – 2013. – № 1. – С. 60–64.
8. Корнеев, А.В. Государственное регулирование в энергетике США / А.В. Корнеев. – М.: Наука, 2004. – 156 с.

Поступила 29.12.2014

THE ANALYSIS OF MODERN METHODS CALCULATION OF INDICATORS USE OF FUEL ON THERMAL POWER STATION

V. PITOLIN

Questions of formation tariffs for heat and electric energy are important for economy of any state. As a basis for formation of tariffs indicators use fuel serve at development of electric energy and heat holiday, as. Fuel cost makes the basic share of expenses for their manufacture. The combined manufacture of electric energy and heat on thermal power stations is the most economic. But in market conditions high tariffs for thermal energy can lead to refusal consumers of services the state power enterprises and building own thermal sources that causes increase in fuel consumption at manufacture of electric energy. In the present article the operating technique of distribution expenses fuel on manufacture of electric energy and holiday of heat from thermal power station is analyzed, variants of its perfection are considered.

УДК 628.35

АНАЛИЗ РАБОТЫ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО
(Полоцкий государственный университет);
А.В. ГАЛУЗО
(УП «Витебскводоканал»);
Т.С. КУПРИЯНЧИК
(завод «Полимир», ОАО «Нафтан»)

Анализируется работа сооружений по удалению соединений азота из сточных вод. Объектом исследования является станция аэрации УП «Витебскводоканал». Рассмотрены технологические схемы биологической очистки сточных вод. Произведено сравнение результатов эффективности работы аэротенков и биоблоков. Сделаны соответствующие выводы по повышению степени удаления азотных соединений из сточных вод путем реконструкции и модернизации блока аэротенков-вытеснителей и вторичных отстойников с применением технологической схемы, основанной на процессах нитри-денитрификации.

Защита водоёмов от загрязнений и сохранение водных ресурсов – одна из важных проблем международного значения. Известно, что сброс неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод в водоёмы приводит к нарушению в них экологического равновесия. В лучшем случае это сопровождается перестройкой биоценоза водоёма с развитием наиболее толерантных форм, а в худшем – заканчивается полной гибелью аэробных организмов и развитием процессов гниения. Очистка сточных вод – необходимое условие равновесия между количеством поступающей органической нагрузки в водоём и его окислительной способностью, причем требования к степени очистки постоянно повышаются. Если ранее достаточно было удалить только взвесь и провести обеззараживание сточных вод, то в настоящее время, кроме того, предъявляются требования защиты водных источников от поступления биогенных элементов и токсических веществ [1; 2].

Республика Беларусь, находясь на водоразделе бассейнов Балтийского и Черного морей, активно ведет международное сотрудничество по охране трансграничных водных объектов (например, присоединилась к Хельсинской Конвенции и ЕЭК ООН по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, а также Протоколу по проблемам воды и здоровья).

Для хозяйственно-бытовых сточных вод или сточных вод подобного типа (городских, поселковых и т.д.) рекомендацией Хельсинской комиссии по защите морской среды Балтийского моря (ХЕЛКОМ) № 28Е/5 от 15 ноября 2007 года установлены минимальные эффекты очистки и максимальные концентрации по трем показателям: БПК₅, общий фосфор и общий азот. Требования ХЕЛКОМ зависят от количества жителей и периодически обновляются в направлении сокращения сброса загрязнений, особенно биогенных элементов (очередной пересмотр рекомендаций ХЕЛКОМ – 2015 год). Наиболее жесткие требования предъявляются к очистке сточных вод, объем которых эквивалентен объему сточных вод более 100 000 жителей (табл. 1).

Таблица 1

Рекомендации ХЕЛКОМ для хозяйственно-бытовых сточных вод
(сточные воды от более 100 000 жителей)

Показатель	Минимальная эффективность очистки, %	Максимальная концентрация на сбросе, мг/л
БПК ₅	80	15
P _{общ} (фосфор, общий)	90	0,5
N _{общ} (азот общий)	70...80	10

Введенный в действие в 2013 году ТКП 17.06-08-2012 [3] содержит ряд нормативов, которые ужесточают требования к степени очистки сточных вод по мере увеличения мощности очистных сооружений (табл. 2). Для обеспечения этих требований необходимо внедрение модернизированных методов биологической и физико-химической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов [3–5]. Прежде всего, это относится к сооружениям, которые были построены ранее с использованием классической схемы очистки сточных вод.

Таблица 2

Допустимые значения показателей и концентраций загрязняющих веществ
в составе очищенных бытовых, городских и близких к ним по составу производственных сточных вод

Масса органических веществ в составе сточных вод, поступающих на очистку, ЭН	Значение показателей, мг/дм ³						Концентрация загрязняющих веществ, мг/дм ³					
	ХПК		БПК ₅		Взвешенные вещества		NH ₄ ⁺ (в пересчёте на N)		N _{общ}		P _{общ}	
	C _{ср}	C _{мах}	C _{ср}	C _{мах}	C _{ср}	C _{мах}	C _{ср}	C _{мах}	C _{ср}	C _{мах}	C _{ср}	C _{мах}
Более 100 000	75	110	15	20	20	30			10	15	1,5	2

C_{ср} – допустимая средневзвешенная концентрация загрязнений за последних двенадцать месяцев;
C_{мах} – допустимая максимальная концентрация.

На станцию аэрации города Витебска поступает смесь хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод в количестве 80...100 тыс. м³/сут, при этом доля сточных вод хозяйственно-бытового назначения составляет порядка 65...70 %, доля промышленных стоков – 30...35 %. Средний состав коммунальных стоков по значениям загрязнений характеризуется как высококонцентрированный сток: по ХПК – 778,2; БПК₅ – 248,7; азоту (по Кьельдалю) – 58,8; фосфору общему – 5,9 мг/дм³.

Канализационные очистные сооружения города Витебска были построены в 1973 году и расширены в 1983-м по традиционной схеме: приёмная камера, здание решёток, песколовка, первичный радиальный отстойник, аэротенки-вытеснители, вторичные радиальные отстойники, контактные резервуары.

В 2000-х годах введена в эксплуатацию новая технологическая линия – многофункциональные сооружения биоблоки. Технологическая схема очистки сточных вод приведена на рисунке 1.

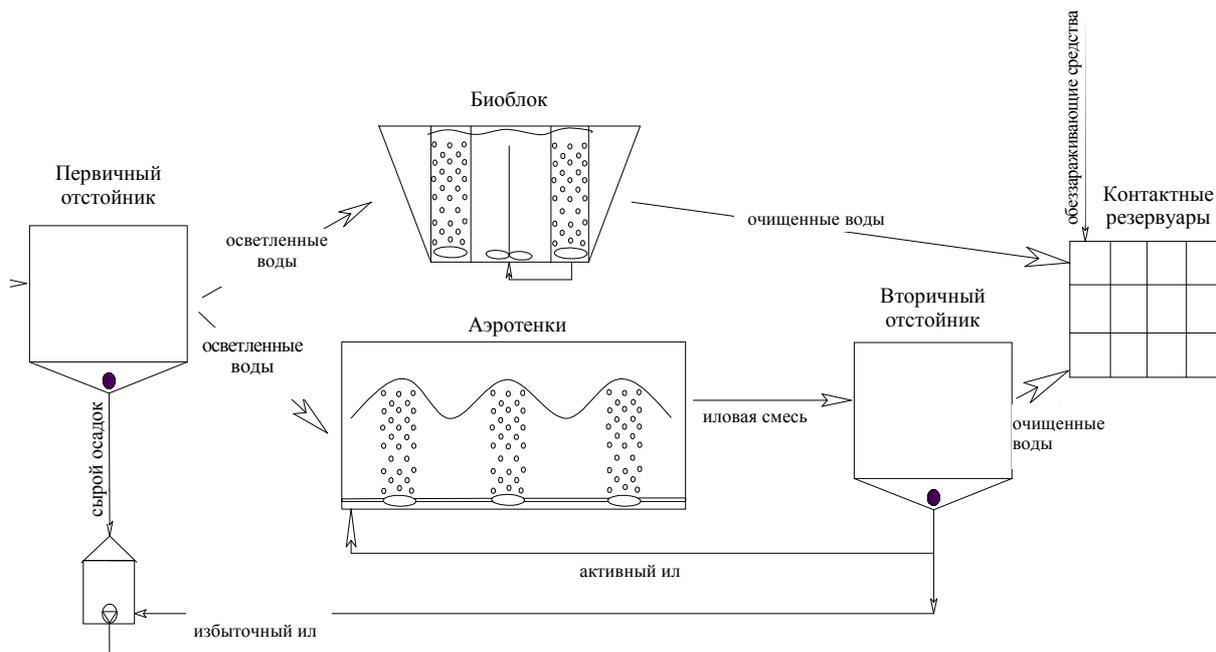


Рис. 1. Технологическая схема биологической очистки сточных вод станции аэрации города Витебска

В настоящее время весь объём сточных вод на станции аэрации города Витебска проходит механическую очистку (решётки, песколовки, первичные отстойники), а затем разделяется на две линии – часть проходит биологическую очистку на аэротенках-вытеснителях, а часть – на биоблоках.

В последнее время в связи с отрицательным воздействием биогенных элементов на экологию водоемов важной проблемой очистки сточных вод выступает удаление соединений азота. Как было указано выше, удаление биогенных элементов из сточных вод требуется в связи с тем, что соединения азота, а также фосфора вызывают процесс эвтрофикации водоемов.

Азот (N) – элемент 15-й группы (по устаревшей классификации – главной подгруппы пятой группы) второго периода периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева. Простое вещество азот – достаточно инертный при нормальных условиях двухатомный газ без цвета, вкуса и запаха (формула N₂), из которого на три четверти состоит земная атмосфера.

Азот в сточной воде присутствует в виде ряда фракций [6; 9]:

$$C_{N,общ} = S_{N,окс} + S_{NH_4} + S_{I,N} + X_{S,N} + X_{I,N},$$

где $C_{N,общ}$ – общий азот; $S_{N,окс}$ – нитритный + нитратный азот; S_{NH_4} – аммонийный + аммиачный азот; $S_{I,N}$ – растворённый инертный органический азот; $X_{S,N}$ – взвешенный легко биологически разлагаемый органический азот; $X_{I,N}$ – взвешенный инертный органический азот.

Мочевина и органически связанный азот преобразовывается уже в трубопроводе в азот аммония (NH_4-N). Соответственно, чем длиннее канализационная сеть, тем глубже протекает процесс аммонификации. Химическая реакция аммонификации органического азота происходит дольше, чем аммонификация других соединений. Поэтому в сточных водах, поступающих на очистные сооружения, содержится большое количество азота аммония и азота органического. Сумма азота органического и азота аммония носит название азота по Кьельдалю. Азот аммония, в отличие от углеродистых соединений, не разлагается, а окисляется в нитрит (NO_2-N) и нитрат (NO_3-N).

Концентрация азота аммонийного в поступающей сточной воде на очистные сооружения отображена на рисунке 2.

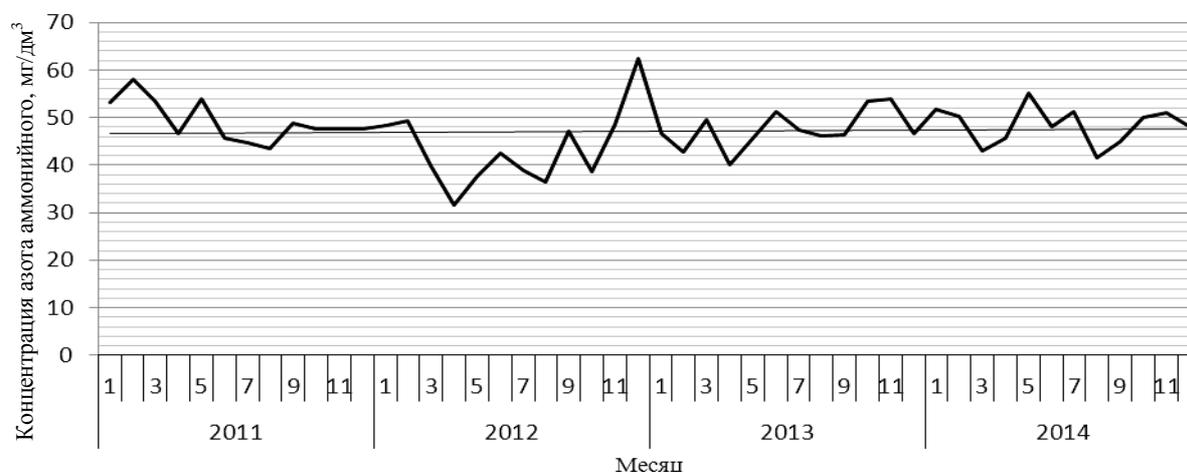


Рис. 2. Концентрации азота аммонийного в исходной сточной воде за 2011–2014 годы

Баланс азотосодержащих веществ в сточных водах, поступающих на станцию аэрации (табл. 3), показывает, что традиционная биологическая очистка сточных вод не обеспечивает достаточной глубины очистки биогенных элементов, так как сооружения, запроектированные и построенные в 80-е годы, когда загрязнения воды биогенными элементами ещё не было таким интенсивным. Например, в проекте на строительство аэротенков-вытеснителей (1976 г.) указывается следующее содержание биогенных веществ в сточной воде, поступающей на общегородские очистные сооружения: азот аммонийный – 24,5 мг/л; фосфатов – 4,9 мг/л.

Таблица 3

Концентрация различных форм азота в городских сточных водах за 2013–2014 годы

Определяемые компоненты	Един. изм.	Периоды отбора проб								Среднее за год	
		зимний		весенний		летний		осенний		2013	2014
		2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014		
Азот по Кьельдалю	мг/дм ³	62,1	69,7	63,9	62,46	62,2	59,1	68,9	44,1	64,3	58,8
Азот аммонийный	мг/дм ³	45,3	50,9	45,1	47,9	48,2	47,0	51,2	44,0	47,45	47,4
Азот нитратный	мг/дм ³	0,19	0,13	0,18	0,13	0,14	0,14	0,16	0,2	0,17	0,15
Азот нитритный	мг/дм ³	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02

Первая линия блока биологической очистки состоит из аэротенков-вытеснителей и вторичных отстойников. Аэротенки-вытеснители (рис. 3) работают с 50 % регенерацией активного ила, осветлённая вода поступает в начало второго коридора. Для аэрации иловой смеси в двух коридорах аэротенка используется пневматическая система аэрации с пристенной формой монтажа трубчатых аэраторов.

Биоблоки представляют собой вторую линию блока биологической очистки и состоят из сооружения, в котором совмещены аэротенк и вторичный отстойник. Каждый биоблок (рис. 4) выполнен в виде

железобетонного резервуара, разделённого вертикальными перегородками на две основные технологические зоны различной степени аэробности (обеспеченности кислородом воздуха) и зоны вторичного отстаивания. Эти зоны располагаются от центра к периферии в следующей последовательности: аноксидная (оборудована мешалкой), интенсивная аэрация и вторичное отстаивание.

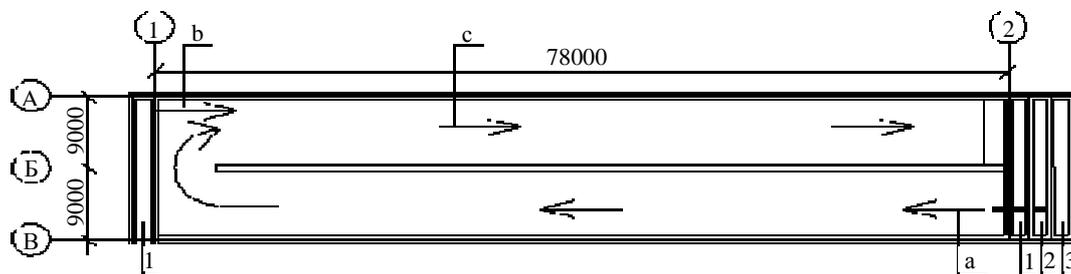


Рис. 3. Схема работы двухкоридорного аэротенка-выгеснителя:
1 – канал осветлённой воды; 2 – канал иловой смеси; 3 – канал возвратного ила;
a – возвратный ил; b – осветлённая вода; c – иловая смесь

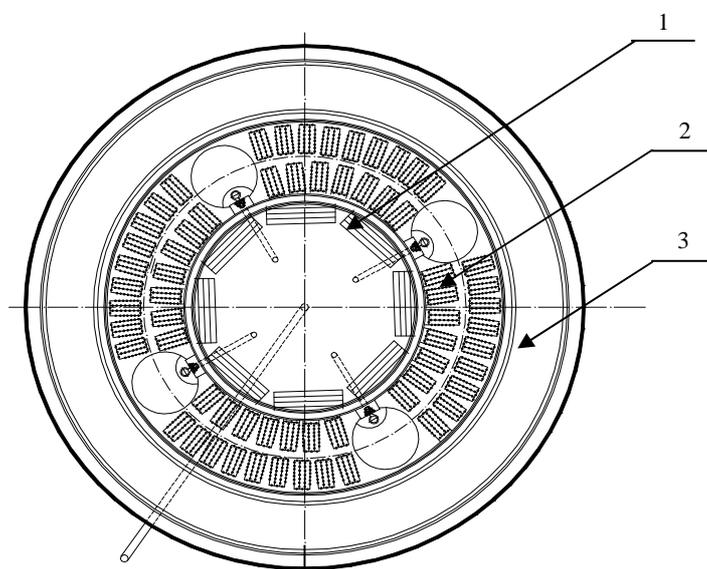


Рис. 4. Конструкция биоблока:
1 – зона аноксидная; 2 – зона аэрации; 3 – зона вторичного отстаивания

Биологический способ нитри-денитрификации может быть реализован по различным схемам. На станции аэрации города Витебска в биоблоках реализована модифицированная схема нитри-денитрификации, при этом циркуляция активного ила производится по одному внутреннему контуру (рис. 5).

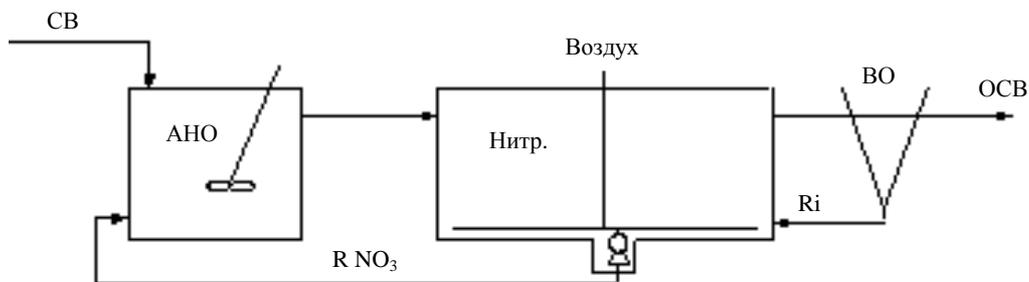


Рис. 5. Технологическая схема работы биоблока
АНО – аноксидная зона биосорбции (денитрификатор); Нитр. – зона биостабилизации (нитрификатор);
ВО – вторичный отстойник; Ri – рециркуляция активного ила; R NO₃ – внутренний циркуляционный поток;
СВ – поступающие сточные воды; ОСВ – очищенные сточные воды

Аноксидная зона оборудована погружной мешалкой фирмы «FLYGT» 4410-011 для поддержания ила во взвешенном состоянии и активного перемешивания иловой смеси с поступающей водой.

В зоне аэрации расположены три или четыре приемка $d = 6$ м и глубиной 5 м. В каждом приемке установлены циркуляционные погружные насосы фирмы «ABS» производительностью $490 \text{ м}^3/\text{ч}$, обеспечивающие возврат иловой смеси в аноксидную зону, где происходит процесс денитрификации. Поочередное отключение насосов обеспечивает частичное уплотнение ила в приемках и требуемую степень рециркуляции. Также эта зона дополнительно оборудована системой мелкопузырчатой аэрации в виде дырчатых труб, которая необходима для дополнительного обогащения кислородом воздуха иловой смеси. В каждом биоблоке установлено 64 секции, по 30 дисковых аэраторов на каждой секции.

Из зоны аэрации иловая смесь, пройдя камеру дегазации, поступает в зону отстаивания, где происходит разделение иловой смеси. Наиболее плотные хлопья ила осаждаются в нижней части отстойника, попадая в циркуляционный поток иловой смеси через перепускные окна в нижней части перегородки, возвращаются в зону аэрации.

Другая часть увлекается восходящим потоком очищенных сточных вод и образует в зоне отстаивания свой слой взвешенного ила, который задерживает мелкие частицы загрязнений и ила, тем самым предотвращая вынос взвешенных веществ и повышая эффект очистки сточных вод.

Таким образом, активный ил циркулирует из одной зоны в другую, и по всей глубине отстойной зоны отмечается концентрация растворённого кислорода не менее $1 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$.

Усреднённые технологические характеристики биоблоков приведены в таблице 4.

Таблица 4

Технологические характеристики работы биоблоков

Определяемые компоненты, $\text{мг}/\text{дм}^3$	Место отбора проб		
	аноксидная зона	зона нитрификации	вторичный отстойник
Азот аммонийный	6,99	0,45	0,5
Азот нитратный	0,11	9,05	9,71
Содержание кислорода	0,9	3,5	6,2
Концентрация ила	3,0	3,0	–

Сравнительная характеристика снижения концентраций загрязнений на различных линиях биологической очистки представлена в таблице 5.

Таблица 5

Снижение концентраций загрязнений по БПК, ХПК азота аммонийного на станции аэрации города Витебска

Определяемые компоненты	Единица измерения	Приёмная камера (вход на ОС)	Первичные отстойники	Эффект удаления загрязнений, (%)	Выпуски очистных сооружений				Допустимые концентрации загрязняющих веществ в очищенных сточных водах	
					№ 1		№ 2		ТКП 17.06-08-2012	Рекомендация ХЕЛКОМ 28/5
					аэротенк-вторичный отстойник	Э, %	биоблок	Э, %		
Взвешенные вещества	$\text{мг}/\text{дм}^3$	391,4	188,6	51	22,0	87	25,4	86	20,0	н/н
ХПК	$\text{мг O}_2/\text{дм}^3$	826,0	532,1	33	54,1	90	39,2	93	70	н/н
БПК ₅	$\text{мг O}_2/\text{дм}^3$	332,6	268,9	18	22,2	92	8,2	97	15	15 или 80 %
Фосфор общий	$\text{мг}/\text{дм}^3$	6,01	6,32	0 (-5)	2,7	56	2,2	65	2,0	0,5 или 90 %
Азот аммонийный	$\text{мг}/\text{дм}^3$	48,6	46,45	7	8,4	82	0,59	99	Азот общий 15	Азот общий 10 или 70...80 %

Таким образом, результаты проведенного исследования позволили сделать соответствующие выводы, на основании которых можно констатировать о следующем:

1) сравнение эффективности очистки двух линий биологической очистки показало, что и аэротенки, и биоблоки с различными зонами аэрации практически с одинаковой эффективностью удаляют загрязнения по ХПК (90...93 %) и БПК₅ (92...97%);

2) по азоту аммонийному и фосфору более высокие результаты эффективности очистки наблюдаются в работе комплексных сооружений – биоблоках. По азоту аммонийному – 99 % (после аэротенков этот показатель составляет 82 %), по фосфору общему – от 65 до 96 % в зависимости от режима работы сооружения (после аэротенков – от 33 до 85 %);

3) анализ работы сооружений по удалению соединений азота из сточных вод станции аэрации УП «Витебскводоканал» свидетельствует о том, что схема аэротенка-вытеснителя на данный момент требует реконструкции и модернизации с применением технологической схемы, основанной на процессах нитри-денитрификации, так как показатели по азоту в очищенных сточных водах не соответствуют современным нормативам, указанным в ТКП 17.06-08-2012, и рекомендациям ХЕЛКОМ 28/5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев, С.В. Биохимические процессы в очистке сточных вод / С.В. Яковлев, Т.А. Карюхина. – М.: Стройиздат, 1980.
2. Жмур, Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур. – М.: Акварос, 2003.
3. Порядок установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: ТКП 17.06-08-2012(02120). – М.: РУП ЦНИИКИВР, 2012.
4. Зейфман, Е.А. Интенсификация очистки сточных вод от биогенных элементов / Е.А. Зейфман, Е.А. Лебедева, Г.А. Тихановская. – Вологда: ВоГТУ, 2003.
5. Долина, Л.Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов: моногр. / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск: Континент, 2011.
6. Смир, Э. Пособие специалиста по очистке стоков / Э. Смир, М. Фишер. – 14-е изд. – Варшава: Зейдель Пживецки, 2002.
7. Технический справочник по обработке воды: в 2 т.; пер. с фр. – СПб.: Новый журнал, 2007.
8. Техническое и технологическое обследование работы аэротенков станции аэрации города Витебска: отчет о НИР / Полоц. гос. ун-т: Новополоцк: ПГУ, 2012.
9. Очистка сточных вод, биологические и химические процессы / М. Хенце [и др.]; пер. с англ. – М.: Мир, 2009.
10. Кричевская, Ф.И. Простейшие активного ила / Ф.И. Кричевская. – Л.: Наука, 1983.

Поступила 10.06.2015

ANALYSIS OF WORK OF BIOLOGICAL TREATMENT TO REMOVAL THE CONNECTION NITROGEN FROM WASTEWATER

V. YUSHCHANKA, A. HALUZA, T. KUPRYIANCHYK

The article presents the analysis of the treatment facilities to remove nitrogen compounds from wastewater. The object of research is the treatment facilities of the unitary enterprise "Vitebsk water supply". Technological scheme of biological wastewater treatment are considered. The results of the efficiency of the aeration tanks and bio-blocks are compared.

УДК 628.1:622:574.5

**АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ КЛАССИФИКАЦИЙ ЗЕМЕЛЬ И ГРУНТОВЫХ ВОД
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ
ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГРУНТОВ НЕФТЬЮ**

*канд. тех. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО; Т.С. КАЗМИРКИВСКАЯ;
Д.А. КИСЕЛЕВ; А.А. ГРИНЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Исследуются основные потенциальные источники загрязнения окружающей среды нефтью в результате аварий. Проводится анализ нефтесодержащих объектов, среди которых и магистральные нефтепродуктопроводы, представляющие наибольшую опасность такого загрязнения. Рассматриваются последствия загрязнения нефтью грунтов, а также грунтовых вод. Последствия загрязнения грунтов вызывают необратимые изменения, нежелательные процессы в них. Необратимые изменения выражаются в изменении морфологических, физических, физико-химических свойств грунтов, а иногда и в существенной перестройке всего почвенного профиля. Представлен анализ действующих классификаций грунтов и грунтовых вод. На основании проведенного анализа определены основные признаки, которые помогут создать производственную классификацию земель и грунтовых вод.

Введение. Основными потенциальными источниками загрязнения окружающей среды нефтью в результате аварий являются нефтесодержащие объекты, находящиеся в составе производственных комплексов на предприятиях нефтепереработки, нефтехимии, транспорта, в том числе трубопроводного, и хранения нефти. Серьезную опасность загрязнения нефтью объектов окружающей среды представляет нефтеналивной подвижной состав железнодорожного и автомобильного транспорта, аварии которого могут привести к загрязнению различных объектов окружающей среды, в зависимости от характера ландшафта на территориях, где проходят транспортные коммуникации.

Большое количество нефтесодержащих объектов входит в состав промышленных комплексов площадочного типа, все производственные объекты которых расположены на их территориях компактно (например, нефтеперерабатывающие заводы, нефтебазы и др.). Такие нефтесодержащие объекты будут именоваться локальными. Как правило, при аварийных разливах нефти на локальных нефтесодержащих объектах площадочного типа разлившаяся нефть не выходит за границы промышленного комплекса и локализуется специальными инженерными сооружениями.

В число нефтесодержащих объектов входят резервуары для хранения нефти. Это наиболее массовый и распространенный тип локальных нефтесодержащих объектов. Различные резервуары для хранения нефти используются на предприятиях нефтедобычи, магистрального трубопроводного транспорта, нефтепереработки и нефтехимии, хранения и распределения нефтепродуктов, агропромышленного комплекса, всех видов наземного, водного и воздушного транспорта, энергетики, коммунального хозяйства, в оборонном комплексе и др.

Наибольшую экологическую угрозу представляют нефтесодержащие объекты, являющиеся частью производственных комплексов линейно-протяженного типа, к которым в первую очередь относятся магистральные нефте- и продуктопроводы.

Основная часть. По территории Республики Беларусь трассы магистральных нефте- и продуктопроводов проложены в шести технических коридорах. Трассы нефтепроводов «Унеча – Полоцк – Скрудалиена» и «Сургут – Полоцк» проходят по северо-восточной части, и трассы «Унеча – Мозырь – Брест», «Речица – Мозырь» и «Мозырь – Броды» проходят по южной части страны. Общая протяженность всех магистральных нефтепроводов в однопунктном исчислении составляет около 4000 км. Все трассы проходят в 6 технических коридорах общей протяженностью 1233 км [1].

Для магистральных нефтепроводов, которые проходят в северной и северо-восточной части республики (Унеча – Полоцк, Полоцк – Скрудалиена, Полоцк – Мажейкя и Сургут – Полоцк), характерно большое разнообразие ландшафтов, комплексность почвенного покрова и наличие значительного количества водных объектов. Для магистральных нефтепроводов в южной части Беларуси (Унеча – Мозырь, Мозырь – Брест и Мозырь – Броды) характерно однообразие ландшафтов [1]. Наиболее сложная организация ландшафтов свойственна северной части республики.

В зависимости от микрорельефа, степени дренированности территории и механического состава почв нефть и нефтепродукты в случае аварии будут либо (при отсутствии значительных относительных превышений на местности, преобладании легких почв и значительной степени дренированности территории) интенсивно проникать в грунт и распространяться с поверхностными грунтовыми водами, либо

распространяться преимущественно по поверхности до пересечения с водным объектом. Таким образом, при аварии будут иметь место как процессы горизонтального перемещения нефтепродуктов, так и вертикального, а соотношение этих процессов будет определяться в основном свойствами ландшафта, в пределах которого произошла авария.

Республика Беларусь имеет разветвленную сеть магистральных трубопроводов, фактический срок эксплуатации большинства из них приближается к тому периоду, когда значительно возрастает интенсивность отказов и аварий. Старение трубопроводов сопровождается снижением охранных свойств изоляционных покрытий, накоплением и развитием дефектов в трубах и сварных соединениях и процессами старения металла труб. По мере увеличения возраста трубопроводов усиливается тенденция к снижению их надёжности и повышению вероятности аварий.

Разливы, утечки нефти и нефтепродуктов, как показывает практика, неизбежны при их добыче, переработке и транспортировке. Нефть, попадая в почву и грунты, вызывает необратимые изменения, нежелательные процессы. В почве происходят глубокие и часто необратимые изменения морфологических, физических, физико-химических свойств, а иногда и существенная перестройка всего почвенного профиля. Нефть специфически воздействует на многие характеристики почв, но прежде всего загрязнение нефтью отражается на их морфологическом строении. Вследствие этого гибнет вся растительность и живые организмы, попавшие в зону аварии (рис. 1).



Рис. 1. Пример загрязнения нефтью лесного массива

При загрязнении наблюдается пропитывание нефтью верхних горизонтов, что приводит к изменению окраски на более тёмную. Нижележащие горизонты также подвергаются загрязнению, но сплошного пропитывания почвенной массы здесь не наблюдается, поэтому окраска горизонтов не претерпевает столь значительных изменений, как верхние горизонты.

С попаданием нефти и нефтепродуктов на поверхность грунта начинается процесс их естественного фракционирования и разложения. Некоторая часть нефти механически выносится поверхностными водами за пределы площади загрязнения и рассеивается на путях движения водных потоков. Часть нефти в почвенном слое подвергается химическому и биологическому окислению. Преобладание тех или иных процессов превращения, миграции и аккумуляции нефтепродуктов в значительной мере зависит от природно-климатических условий и свойств почв, в которые поступают эти загрязняющие вещества.

Загрязнение почв нефтью при ее разливах наблюдается в основном в верхних горизонтах. Одновременно она распространяется вширь, проникая в поры между частицами грунта. Скорость просачивания нефти зависит от ее свойств, характера грунта, а также от количественных соотношений нефти, воздуха и воды в образовавшейся многофазной движущейся системе. Чем меньше нефти в такой системе и выше соотношение других компонентов, тем труднее нефти проникнуть сквозь грунт.

При достижении нефтью уровня грунтовых вод дальнейшее ее движение вниз прекращается. При этом легкие фракции могут всплывать на поверхность воды. Расширение площади распространения нефти под действием капиллярных сил уменьшает насыщенность ею грунта. Ниже определенного уровня насыщения, так называемого остаточного насыщения, составляющего 10...12 %, нефть перестает мигрировать и становится неподвижной. Проявление капиллярного эффекта хорошо прослеживается при значительной проницаемости и пористости грунтов. Например, пески и гравийные грунты весьма благопри-

яты для миграции нефти, а глины и илы ограничивают расстояние, на которое она может перемещаться. В горных породах нефть движется по трещинам.

Перемещение нефти в почвенном пространстве может быть как радиальным, то есть вглубь почвенного профиля, так и латеральным – в соответствии с уклоном поверхности. При радиальном распределении нефти в почвенном профиле существенную роль играют так называемые барьеры-аккумуляторы, то есть горизонты с повышенной нефтеёмкостью. Свойства нефти, такие как ее химический состав, вязкость, а также наличие сопутствующих минерализованных пластовых вод определяют характер ее фракционирования в почвенном профиле. Так, при поверхностном аварийном разливе нефти на почву вертикальное передвижение ее вниз по почвенному профилю создает так называемый хроматографический эффект, приводящий к дифференциации нефтяных фракций. В верхнем гумусовом горизонте сорбируются высокомолекулярные компоненты нефти, содержащие в большом количестве смолисто-асфальтеновые вещества, а в нижние горизонты проникают в основном низкомолекулярные соединения, имеющие высокую растворимость в воде и минерализованные пластовые воды.

При пористой почве и низком уровне грунтовых вод нефть, разлитая на земле, может загрязнять грунтовые воды, что создает угрозу загрязнения нефтепродуктами подземных водоносных горизонтов и распространения их на большие расстояния от источника загрязнения, а при определенных условиях попадания нефти в водные объекты.

Одним из условий нераспространения загрязнения в грунтах и водоносных горизонтах может выступать оптимизация процессов ликвидации разлива нефти на землях. Для минимизации последствий загрязнения грунтов и грунтовых вод необходимо разработать типовые методы ликвидации разливов нефти. Одна из задач разработки – создание *производственной классификации земель и грунтовых вод*.

В настоящее время известно множество различных классификаций земель и грунтовых вод. В каждой из этих классификаций был использован свой признак классификации, который был выбран в соответствии с теми целями, для которых проводилась классификация.

Известные классификации земель и грунтов рассмотрены с позиции документов [2–4]. В рассмотренных документах классификация земель производится по следующим показателям:

- 1) по жесткости земли подразделяются на скальные и нескальные [3];
- 2) по степени влажности стронция (St) – маловлажные, влажные, водонасыщенные [2];
- 3) по гранулометрическому составу земли – гравелистые, крупные, средние, мелкие, пылеватые [2];
- 3) по пористости – практически непористые, слабопористые, среднепористые, сильнопористые [3];
- 4) по водопроницаемости в зависимости от коэффициента фильтрации K_f (м/сут) – водонепроницаемые, практически водонепроницаемые, слабоводопроницаемые, средневодопроницаемые, водопроницаемые, высоководопроницаемые, исключительно водопроницаемые [2];
- 5) по целевому назначению – сельскохозяйственные, населенных пунктов, промышленности и иного специального назначения, особо охраняемые, земли лесного фонда, земли водного фонда, земли запаса [4].

Помимо классификаций земель, для защиты грунтовых вод от загрязнения нефтью необходимо рассмотреть классификации подземных вод, среди которых наиболее известная – по условиям их залегания [5] (рис. 2): воды зоны аэрации: почвенные и верховодка; воды зоны насыщения: грунтовые и межпластовые.

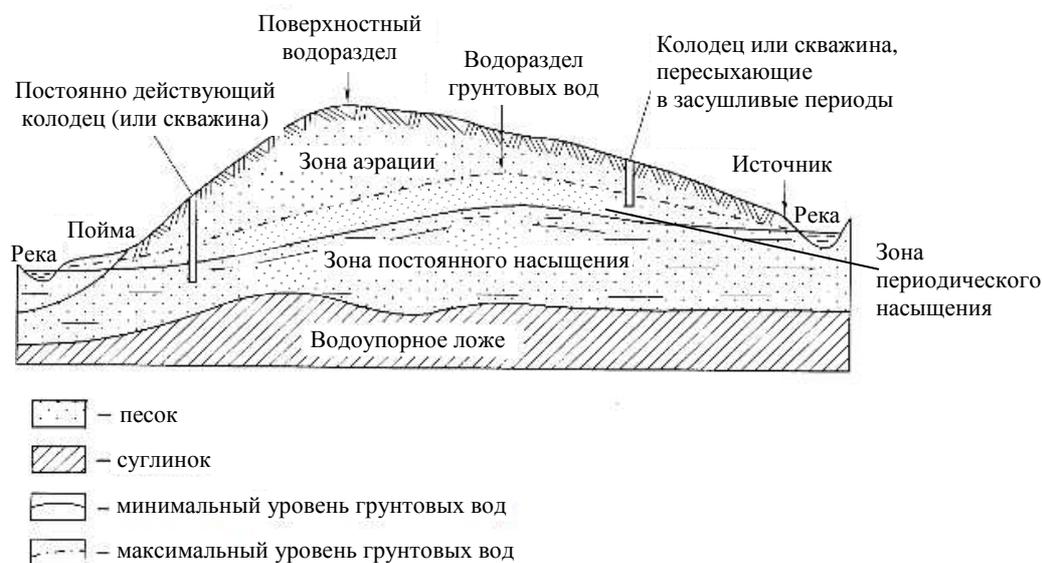


Рис. 2. Схема соотношения различных типов подземных вод (по О.К. Ланге)

В зоне аэрации распространены: почвенные воды; воды, инфильтрирующиеся сквозь коллектор; парообразная вода; верховодки. Верховодки образуются, когда инфильтрирующаяся вода скапливается на поверхности водоупоров, имеющих локальное распространение, например, на линзах глин или суглинков в толще песков. Поверхность (зеркало) грунтовых вод является границей зоны аэрации и зоны насыщения.

В то же время почвенные воды имеют существенные отличия от других вод зоны аэрации и грунтовых вод вследствие тесной связи их с органическими веществами, растениями и живыми организмами. Характерной особенностью почвенных вод является их огромная роль в повышении плодородия почв.

Грунтовые воды – это воды первого от поверхности постоянного водоносного горизонта, на первом водоупорном слое. Поверхность грунтовых вод называется зеркалом грунтовых вод. Мощность водоносного горизонта – это расстояние по вертикали от зеркала грунтовых вод до водоупора. В водоносных слоях грунтовые воды передвигаются от мест с более высоким уровнем к местам с более низким уровнем, то есть в соответствии с уклоном водоносного пласта.

Межпластовые воды – это воды, заключенные между двумя водоупорными пластами, из которых нижний называется водоупорным ложем, а верхний – водоупорной кровлей (рис. 3). Они залегают глубже и поэтому чище, чем грунтовые. Области распространения и питания их не совпадают, в связи с чем режим вод меньше зависит от метеоусловий и у них более постоянный уровень. Атмосферное питание эти воды получают лишь в местах выхода водоносного пласта на поверхность. Они могут быть напорные и ненапорные. Ненапорные воды не полностью насыщают водоносный пласт, имеют свободную поверхность и стекают как грунтовые по уклону ложа. Напорные воды залегают в вогнутых тектонических структурах, насыщают весь водоносный слой и обладают гидростатическим напором. Вскрытые скважинами, они могут изливаться на поверхность или даже фонтанировать. Такие воды называют артезианскими. Как и грунтовые воды, межпластовые могут иметь разный химический состав и степень минерализации, которая увеличивается с глубиной.

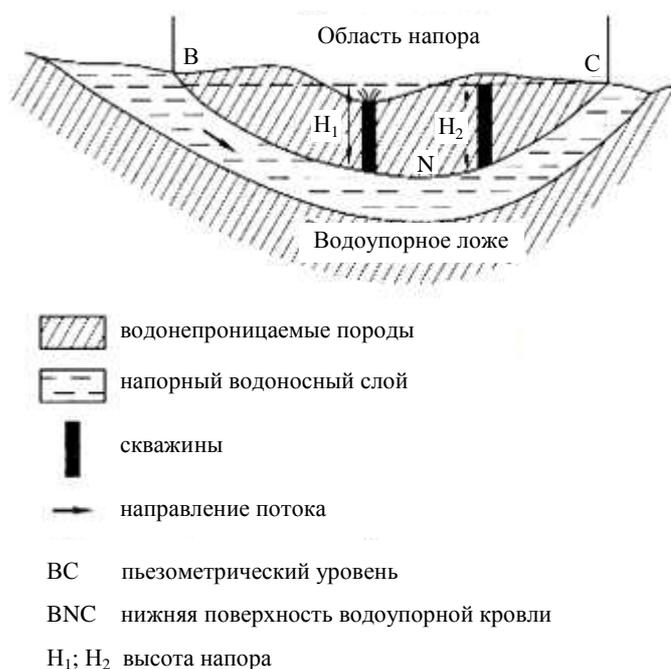


Рис. 3. Схема залегания и движения грунтовых вод в междуручечном массиве (по Л.К. Давыдову и др.)

Однако приведенные классификации земель и грунтовых вод не отражают суть проникновения нефти вглубь земель, поэтому целью настоящего исследования является разработка производственной классификации земель и грунтовых вод.

Проведенный анализ на кафедре трубопроводного транспорта Полоцкого университета известных классификаций земель и подземных вод показал, что эти классификации не учитывают признаки, позволяющие оценить глубину проникновения нефти в землю, распространение по поверхности земли и подземным водам, а также причиненный ущерб окружающей среде при авариях на нефтепроводах. Главным признаком оценки загрязнения земель может быть ущерб окружающей среде.

На основании вышеназванного принципа *производственная классификация* должна включать следующие показатели:

- хозяйственное назначение земель;
- пористость грунтов;
- степень влажности грунтов.

Классификация грунтовых вод должна содержать такие признаки, как:

- глубина залегания грунтовых вод;
- возможность попадания грунтовых вод в водные объекты.

Эти классификационные признаки земель и грунтовых вод позволят оценить ущерб, который может произойти в результате аварии на нефтесодержащем объекте при попадании нефти на землю и проникновении её в грунтовые воды.

Заключение. Результатом проведенной работы является проведенный анализ потенциальных источников загрязнения земель и грунтовых вод нефтью и нефтепродуктами. Рассмотрены последствия загрязнения земель и грунтовых вод нефтью. Проведен анализ известных классификаций земель и грунтовых вод, выявлены признаки, которые помогут создать производственную классификацию, которая позволит разработать типовые технологии ликвидации аварийных разливов нефти, тем самым минимизировать последствия аварий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита водных объектов при аварийных разливах нефти / Д.П. Комаровский [и др.]; под ред. В.К. Липского. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 220 с.
2. Грунты. Классификация: СТБ 943-93 / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск.
3. Классификация. Кодекс Республики Беларусь о земле. 23 июля 2008 г. № 425-3: ГОСТ 25100-2011 Грунты. – Минск.
4. Любушкина, С.Г. Общее землеведение: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по спец. «География» / С.Г. Любушкина, К.В. Пашканг, А.В. Чернов; под ред. А.В. Чернова. – М.: Просвещение, 2004. – 288 с.

Поступила 12.03.2015

THE KNOWN CLASSIFICATION OF LANDS AND GROUNDWATER ANALYSIS FOR THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION CLASSIFICATION TO MINIMIZE THE EFFECTS OF OIL CONTAMINATED SOIL

L. SPIRIDENOK, T. KAZMIRKIVSKAYA, Y. KISELYOV, A. GRINEVICH

The main potential sources of oil pollution caused by accidents are studied in the article. The analysis of oil-contaminated sites, among which the main oil and gasoline lines, representing the greatest danger of such pollution is given. The effects of oil contaminated soil and groundwater are considered. The effects of soil contamination cause irreversible changes, unwanted processes. Irreversible changes are expressed in the change of morphological, physical, physiochemical properties of soils, and sometimes a substantial reorganization of the whole soil profile is observed. The analysis of existing classifications of soils and groundwater is made. On the basis of the analysis the main features which help to create a classification of industrial land and groundwater are identified.

УДК.504.5:621.6.033

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ В РАЙОНЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

канд. техн. наук, доц. В.Е. САВЕНОК; Н.А. КОВАЛЕВСКАЯ
(Витебский государственный университет им. П.М. Машерова)

Анализируются методики оценки загрязнения почв, а также прогнозный расчет возможного нефтяного загрязнения почв в районе строящегося промышленного объекта. В качестве объекта исследования рассматривается прибрежная зона строительства Витебской гидроэлектростанции на реке Западная Двина. Представлена математическая модель трансформации загрязненных участков, которая использовалась для проведения исследований возможного загрязнения почв нефтепродуктами в рассматриваемом районе. Показана актуальность оценки загрязнения почв нефтепродуктами – важной составляющей комплексной оценки экологического состояния почв. Результаты прогностических расчетов могут быть использованы как для оценки масштабов загрязнения нефтепродуктами непосредственно почвенного покрова районов водосбора с учетом рельефа местности, так и при оценке масштабов возможного загрязнения водотоков, протекающих по этим районам.

Введение. Побочным эффектом роста современного уровня развития промышленного производства является всевозрастающая техногенная нагрузка на окружающую среду. Большие масштабы принимает загрязнение территорий вокруг развитых промышленных комплексов, что оказывает негативное влияние на состояние почв этих территорий. Спектр химического загрязнения почв в результате техногенного воздействия очень широк. Одними из наиболее распространенных загрязнителей являются нефть и нефтепродукты. При попадании в почву нефтепродукты аккумулируются, что приводит к изменениям в химическом составе, свойствах и структуре почв. Загрязнение углеводородами нефти приводит к резкому нарушению в почвенном микробиоценозе, подавляется фотосинтетическая активность растительных организмов, а также при длительном воздействии на почвенную биоту возникает массовая гибель животных. Из-за отсутствия надежных методик имеет место необходимость в создании адекватной оценки и дальнейшем прогнозе последствий воздействия нефтепродуктов на почву [1].

Целью данной работы является анализ методик оценки загрязнения почв, а также прогнозный расчет возможного нефтяного загрязнения почв в районе строящегося промышленного объекта. В качестве района исследования нами рассматривалась прибрежная зона строительства Витебской мини-ГЭС на реке Западная Двина.

Оценка воздействия нефтепродуктов на состояние почв может осуществляться по двум направлениям: исследование физико-химических и биологических показателей. В качестве главного показателя загрязнения почв выступает концентрация нефтепродуктов в грунте. Для расчета данного показателя необходимо знать нефтеёмкость грунта, которая определяется с помощью инструментального метода или экспериментальным путем с использованием данных о влажности грунта:

$$\alpha = \frac{M_{\text{вг}}}{M_{\text{г}}} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где α – концентрация нефти в грунте, г/кг; $M_{\text{вг}}$ – нефтенасыщенность грунта (количество нефти, впитавшейся в грунт), т; $M_{\text{г}}$ – количество нефтезагрязнённого грунта, т.

Нефтенасыщенность грунта может быть рассчитана по формуле

$$M_{\text{вг}} = K_{\text{н}} \rho_{\text{н}} F_3 h_c, \quad (2)$$

где $K_{\text{н}}$ – нефтеёмкость грунта (определяется инструментальным или экспертным путем в зависимости от влажности грунта); $\rho_{\text{н}}$ – плотность нефти, т/м³; F_3 – площадь разлива, м²; h_c – средняя глубина пропитки грунта нефтью, м.

Количество нефтезагрязнённого грунта определяется как

$$M_z = \rho_z F_3 h_c, \quad (3)$$

где ρ_z – плотность нефтезагрязнённого грунта, т/м³.

При масштабных разливах нефти может быть рассчитано количество низкомолекулярных углеводородов, испарившихся с поверхности земли. Но для данного показателя необходимо знать удельную величину выбросов углеводородов в атмосферу с поверхности нефти, разлившейся по земле. Количество

низкомолекулярных углеводородов $M_{из}$, испарившихся с поверхности нефти, разлившейся по поверхности земли, определяется по формуле

$$M_{из} = q_3 \cdot F_3 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где q_3 – удельная величина выбросов углеводородов в атмосферу с поверхности нефти, разлившейся по земле, кг/м².

Удельная величина выбросов углеводородов определяется по табличным данным в зависимости от толщины слоя свободной нефти на поверхности земли (м), продолжительности процесса испарения свободной нефти с поверхности земли (ч), средней температуры поверхности испарения при испарении нефти с поверхности земли (°С).

Необходимо обратить внимание на то, что при определении нефтепродуктов в почве обязательно учитывается содержание органических соединений самой почвы, так как существуют методы определения накопления нефтепродуктов по содержанию органического углерода. Изначально вычисляют суммарную долю углерода, входящего в состав нефти. А затем вводят поправочный коэффициент накопления нефтепродуктов в почве для сравнительной характеристики загрязненных районов. Данная методика базируется на знании данных о качественном составе нефти.

Нефтезагрязненные почвы теряют способность впитывать и удерживать влагу, для них характерны более низкая гигроскопическая влажность, водопроницаемость, влагоемкость и влагоемкость по сравнению с незагрязненными участками. При загрязнении почв нефтью увеличивается дисперсность почв, уменьшается структурность и степень агрегатности, снижается коэффициент фильтрации воды. В процессе проникновения углеводородов нефти в грунт наблюдается фильтрация несмешивающихся фаз. Так, с помощью математических моделей исследуются характеристики порового пространства, однако данная модель применима только для верхних однородных слоев почвы. Для ее построения необходимо учитывать вязкость и плотность углеводородов, а также пористость и проницаемость грунта. Основными уравнениями, описывающими движение жидкости в пористой среде, являются уравнение неразрывности и закон фильтрации Дарси. Закон Дарси используется в обобщенном виде для описания многофазного течения. На основании данной модели мы сможем установить степень загрязнения почвенной среды, а также скорость образования загрязненной территории. Закон сохранения массы в пористой среде или уравнение неразрывности в декартовой системе координат для однородной жидкости в недеформированном грунте имеет вид:

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \right] = 0, \quad (5)$$

где s – насыщенность пористой среды; m – пористость материала; ρ – плотность; u (u_x, u_y, u_z) – вектор скорости фильтрации; u_x, u_y, u_z – компоненты вектора фильтрации; x, y, z – координаты; t – время.

Обобщение закона фильтрации (закон Дарси) для трехмерного течения:

$$\vec{u} = -k \frac{k(s)}{\mu} (\nabla_p - \rho \vec{g}), \quad (6)$$

где k – проницаемость пористой среды; μ – динамическая вязкость; p – давление; ρ – плотность; $k(s)$ – относительная проницаемость; g – вектор ускорения свободного падения.

Для описания многофазного течения используются законы Дарси в обобщенном виде:

$$\vec{u}_l = -k \frac{k_l(s)}{\mu_l} (\nabla_{p_l} - \rho_l \vec{g}), \quad (7)$$

где k – проницаемость пористой среды; μ_l – динамическая вязкость l -й фазы; p_l – давление l -й фазы; ρ_l – плотность l -й фазы; $k_l(s)$ – относительная фазовая проницаемость l -й фазы; g – вектор ускорения свободного падения.

Глубина проникновения нефти в грунт определяется в зависимости от физико-механических свойств грунта и физико-химических характеристик взаимодействия жидкости с частицами грунта. Процесс фильтрации нефти и нефтепродуктов будет зависеть от нахождения воды в различном состоянии и от свойств дисперсных частиц в грунте. Нефть будет адсорбироваться почвенной влагой, а взаимодействие загрязнителя с поровой водой будет определяться поверхностным натяжением воды. Дисперсные же частицы почвы будут двигаться к границе раздела двух сред, что приведет к снижению вязкости нефти. Фильтрацию нефти и нефтепродуктов в почве необходимо рассматривать как послойное движение, в данном случае движущей силой будут выступать поверхностные явления между нефтью и водой. Глубина проникновения углеводородов нефти может быть определена экспериментальным путем в лаборатор-

ных условиях на моделях грунта. Грунт в связанном состоянии имеет дисперсные частицы, следовательно, вода в данном случае будет участвовать в транспортировке нефти.

Рассмотрение грунта в виде связанной среды с однородной пористостью позволит получить формулу для определения количества воды, выступающей в роли транспорта нефти и нефтепродуктов:

$$q = 10^{-2} \frac{\rho_w}{\rho_r} m[\varphi_0 - \varphi - W_m], \quad (8)$$

где q – удельное количество воды в порах грунта, $\text{м}^3/\text{м}^3$; ρ_w – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_r – плотность грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$; m – пористость грунта, $\text{м}^3/\text{м}^3$; φ_0 – относительная влажность грунта, %; φ – массовое процентное содержание частиц в поровом пространстве размером менее 0,1 мм, %; W_m – максимальная молекулярная влагоёмкость дисперсных частиц размером менее 0,1 мм, %.

При биодиагностике почв устанавливаются показатели, связанные с биологической активностью почв. Определяют изменение численности и видового разнообразия почвенной мезо- и микрофауны, а также микрофлоры. При этом типы ответных реакций различных групп неодинаковы. В почвах, загрязненных углеводородами нефтепродуктов, появляется дополнительный пищевой субстрат, который будет оказывать определенное воздействие на микробную биомассу, а следовательно, будет наблюдаться изменение активности микроорганизмов и изменение дыхательной активности почв. Так происходит увеличение численности следующих групп микроорганизмов: денитрифицирующих, азотфиксирующих, аммонифицирующих, сульфатредуцирующих бактерий, а также дрожжей и микромицетов. В свою очередь, численность нитрифицирующих бактерий, целлюлозоразрушающих микроорганизмов и актиномицетов снижается. В ходе модельных экспериментов может быть установлена общая численность колониеобразующих единиц (КОЕ) основных групп микроорганизмов. На основании данных КОЕ чистых почв и загрязненных проводится сравнение показателей для выявления степени и характера действия нефтепродуктов. На загрязненных почвах проводятся исследования активности определенных групп ферментов. Активность почвенной уреазы и каталазы зависит от гранулометрического состава почвы.

Так, почвы тяжелого гранулометрического состава имеют высокую активность уреазы и каталазы. Для определения целлюлозолитической активности пользуются аппликационным методом в чашках Петри путем учета остаточного количества нерасщепленной целлюлозы. Выявляют изменение кинетики ферментативных реакций природно-технической системы, возникшей при загрязнении почвы нефтью. Оценку фитотоксичности почв проводят по проросткам и тест-растениям. Изучают длину корней растений, которая позволит выявить токсическое или ингибирующее действие нефти и нефтепродуктов. Выявляют всхожесть, выживаемость и вес сухой биомассы выращенных культур. Представленный набор биологических показателей дает информативную картину протекающих в почве биологических процессов и ее экологического состояния. Критерием степени нарушения экологических функций почвы может служить интегральный показатель биологического состояния почв. Для расчета интегрального показателя берутся контрольные образцы, и каждый из перечисленных биологических показателей принимается за 100 %. Далее выражаются в процентах относительно контроля остальные показатели опыта и проводится сравнение.

При разработке критериев оценки загрязнения почв нефтепродуктами можно применить и балльную систему оценок. Данная система основывается на том, что каждый фактор (показатель), независимо от единиц измерения, оценивается в баллах. Взяв один фактор, мы оцениваем его величину по выбранному способу. Далее суммируем полученные баллы по разным альтернативам и сравниваем между собой по общей сумме набранных баллов. Данная система ясно позволяет интерпретировать полученные результаты: чем хуже условия, тем выше балл. Однако здесь имеет место большой недостаток – не учитывается вклад каждого фактора в конечный результат.

Территория строительства Витебской мини-ГЭС располагается в районе городского поселка Лужесно и населенного пункта Букатино по правому берегу реки Западной Двины, по левому – в районе населенных пунктов Биберевка и Подберезье. Недалеко от строящегося объекта находится карьер «Тяково-Койтово» и действующий карьер «Гралёво».

Рельеф территории Витебского района формировался на протяжении длительного периода времени под совокупным воздействием различных геологических процессов, важнейшим из которых была деятельность покровных оледенений. Современная поверхность представлена чередованием обширных холмистых возвышенностей и плоских, расчлененных долинами рек низинами. Поверхность в целом имеет котловинообразную форму, причем приподнятые края созданы ледниковыми возвышенностями и грядами. О ее озерно-ледниковом происхождении свидетельствуют плосковогнутая форма и распространение ленточных глин. Рельеф Витебской возвышенности холмисто-моренный денудированный. Рельеф территории оказывает существенное влияние на процессы почвообразования. Кроме озерных отложений, широко представлены водно-ледниковые наносы (гравий, пески, иногда супеси). В отдельных местах

сквозь них проступает морена, которая образует скопление холмов. Наиболее заболочена центральная часть низины, высланная озерными осадками.

В соответствии с почвенно-географическим районированием данная территория относится к Витебско-Лиезненскому району северной провинции дерново-подзолистых пылевато-суглинистых и супесчаных почв. Преобладающими являются дерново-подзолистые сильно- и среднеподзоленные почвы, развивающиеся на легких водно-ледниковых слабозавалуненных суглинках, реже – лессах, подстилаемых моренными суглинками [2]. Под влиянием наиболее типичных для данного региона подзолистого, дернового и болотного процессов почвообразования формируются основные типы почв: дерново-подзолистые, дерново-подзолистые заболочиваемые, торфяно-болотные, пойменные дерновые и др. Более 50 % почв рассматриваемого региона переувлажнены, поэтому в этом регионе преобладают минеральные заболоченные почвы. Они формируются на породах тяжелого механического состава, чаще всего на донно-моренных и озерно-ледниковых глинах [3].

Нами проведена оценка площади возможного загрязнения почв нефтепродуктами на четырех участках водосбора в районе строительства мини-ГЭС на реке Западная Двина. Рассматривались по два участка, непосредственно прилегающие к месту строительства с каждой стороны реки. Вся территория строительства может быть ограничена по периметру крайними точками 1...4 с координатами, измеренными по программе «Google Earth» (табл. 1).

Таблица 1

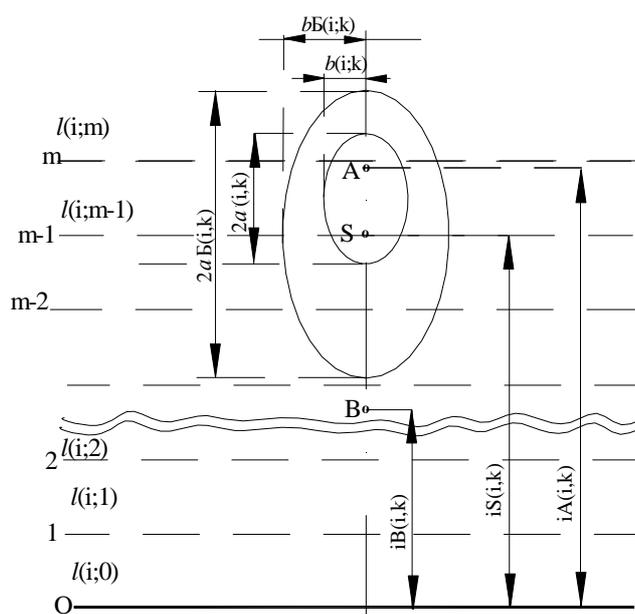
Координаты граничных точек

№ точки	широта	долгота	Расстояние до реки, м	Уклон, %	
				максимальный	средний
1	55°15'14.33"C	30°9'17.46"В	397	-11,9	-3,5
2	55°15'13.37"C	30°9'37.11"В	210	-13,5	-7,3
3	55°14'51.27"C	30°10'0.38"В	470	-28,9	-9,9
4	55°14'46.03"C	30°9'21.98"В	330	-26,8	-12,0

Моделировались ситуации, связанные с аварийным проливом различных нефтепродуктов (плотность 600...900 кг/м³) на почву на расстояниях от максимальных, указанных в таблице, до 100 м от реки Западная Двина. В качестве контрольной массы брались массы пролитого нефтепродукта от 0,5 до 20 тонн.

Для проведения исследований использовалась математическая модель трансформации загрязненных участков [4–6].

Известно, что форма пятна определяется наклоном поверхности. В данной модели принимается, что разлившееся по поверхности земли пятно нефтепродукта принимает форму эллипса, при этом загрязненный участок состоит из двух пятен: основного и буферного (рисунок).



Геометрическая схема пятна

Длина большой полуоси обозначена $a(i,k)$ – основного пятна, $aБ(i,k)$ – буферной зоны. Длина малой полуоси обозначена $b(i,k)$ – основного пятна, $bБ(i,k)$ – буферной зоны.

Алгоритм расчета был следующий. Ландшафт, лежащий в зоне стока, делился на m зон. Для каждой зоны выделялись линейные координаты $l(i,m)$, показывающие расстояние соответствующей зоны от водотока (от пятна до водотока) вдоль линии стока AB . Введенные обозначения: i – номер участка (i -тый участок); k – переменная дискретного времени; A – рассматриваемая точка (место аварии); B – точка стока; S – точка условного центра стока загрязненного участка. Далее определялись и позиционировались параметры эллипса пятна загрязнителя: длина большой полуоси $a(i,k)$, длина малой полуоси $b(i,k)$.

Зависимость между площадью пятна и массой загрязнителя:

$$S(i,k) = \beta(i) \cdot M(i,k)^{2/3}, \quad (9)$$

где $\beta(i) = \frac{1}{\delta \cdot \rho}$ – коэффициент, учитывающий зависимость площади пятна от массы содержащегося в нём загрязнителя; δ – предполагаемая конечная толщина нефтяного пятна, м; ρ – плотность нефтепродукта, кг/м³; $2/3$ – степень, которая определяется формой тела пятна (конус); $M(i,k)$ – масса загрязнителя в пятне на i -том участке в момент времени k , кг.

Затем по формуле (1) определялись параметры геометрической схемы пятна: площадь загрязненного участка $S(i,k)$; площадь буферной зоны загрязненного участка определяется по формуле (9), в которую подставлялся коэффициент, учитывающий зависимость площади буферной зоны от массы содержащегося в ней загрязнителя и массы загрязнителя в буферной зоне.

Условный радиус загрязненного участка

$$r(i,k) = (S(i,k) / \pi)^{0.5}. \quad (10)$$

Условный радиус буферной зоны загрязненного участка по уточненной формуле (10):

$$r_B(i,k) = [(S(i,k) + S_B(i,k)) / \pi]^{0.5}. \quad (11)$$

При проведении оценочных расчетов на загрязненном участке учитывались следующие массообменные процессы: трансформация подвижного загрязнителя в неподвижный; перенос подвижного загрязнителя в неподвижный; перенос подвижного загрязнителя из пятна в буферную зону; миграция загрязнителя в водные объекты; поступление загрязнителя в загрязненном участке по фактам аварий; изъятие загрязнителя из загрязненного участка при рекультивационных работах.

Изменение массы загрязнителя в пятне происходит за счет таких процессов: биохимический распад жидкой и связанной фаз; переход жидкой фазы в связанную; вынос жидкой фазы в буферную зону участка; вынос жидкой фазы с территории (сток в водотоки); поступление жидкого загрязнителя с авариями; изъятие жидкой и связанной фаз при рекультивации.

Для буферной зоны характерны аналогичные процессы, за исключением выноса жидкой фазы в буферную зону (по логике моделирования). Вычисления были проведены с использованием разработанной нами компьютерной программы, реализующей приведенный выше алгоритм расчета.

В таблице 2 представлены результаты расчетов распространения нефтяного пятна на почве при его начальной толщине 0,001 м для различных начальной массы и плотности нефтепродукта. За максимальную длину распространения нефтяного пятна может быть принята длина большой полуоси буферной зоны загрязненного участка.

Таблица 2

Результаты расчетов

Масса нефтепродукта, кг	2000		5000		10 000	
	Плотность, кг/м ³		Плотность, кг/м ³		Плотность, кг/м ³	
Параметры	600	800	600	800	600	800
Площадь загрязненного участка, м ²	265,20	198,00	487,30	365,00	773,60	580,20
Условный радиус загрязненного участка, м	9,17	7,94	12,45	10,78	15,70	13,60
Площадь буферной зоны загрязненного участка, м ²	2466,12	924,82	2271,40	1703,50	3605,60	2704,20
Условный радиус буферной зоны загрязненного участка, м	29,48	18,9	29,6	25,66	37,33	32,33
Длина большой полуоси эллипса буферной зоны загрязненного участка, м	38,44	24,65	38,64	33,46	48,68	42,16

По результатам проведенных исследований установлено, что масса нефтепродукта, который может попасть в реку, пропорциональна уклону, расстоянию добегающего и зависит от рельефа местности. Пролиты различных нефтепродуктов на почву в количестве не более 10 тонн (10 000 кг) на расстояниях более 50 м от уреза реки в районе строительства мини-ГЭС не приводят к ее загрязнению. Увеличение объема аварийного разлива нефтепродуктов ведет к увеличению безопасного расстояния от уреза реки, которое зависит от рельефа местности.

Глубина миграции нефти и нефтепродуктов в горизонтальном и вертикальном направлениях зависит от механического состава почв и грунтов, водного режима почв, уровня грунтовых вод. Проведенный анализ рельефа местности и составляющих его почв в районе строительства мини-ГЭС позволяет сделать вывод, что достижение нефтяным загрязнением уровня грунтовых вод при нефтепроливах на рассматриваемой территории не прогнозируется. Можно отметить, что наибольшая глубина проникновения нефти на этой территории будет наблюдаться на песчаных и супесчаных почвах, наименьшая – на суглинках и глинистых грунтах, имеющих примерно одинаковое процентное соотношение в районе строительства.

Заключение. Каждая методика оценки загрязнения почв в отдельности позволяет лишь в определенной степени и по отношению к определенному фактору установить негативное влияние, не давая полного представления о последствиях и возможности восстановления целостности всей биосистемы. Считаем необходимым отметить, что в зоне расположения объектов такого типа, как мини-ГЭС, целесообразно проводить комплексную оценку экологического состояния почв как на этапе проектирования и строительства, так и при последующей эксплуатации таких объектов. Данный комплексный подход может быть использован при оценке любой промышленной территории, включающей в себя районы водосбора рек.

Оценка загрязнения почв нефтепродуктами является важной составляющей комплексной оценки экологического состояния почв. Представленные в работе результаты прогностических расчетов могут быть использованы как для оценки масштабов загрязнения нефтепродуктами непосредственно почвенного покрова районов водосбора с учетом рельефа местности, так и при оценке масштабов возможного загрязнения водотоков, протекающих по этим районам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мотузова, Г.В. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия / Г.В. Мотузова, Е.А. Карпова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013. – 304 с.
2. Клебанович, Н.В. Почвоведение и земельные ресурсы: учеб. пособие / Н.В. Клебанович. – Минск: БГУ, 2013. – 373 с.
3. Мержвинский, Л.М. Биологическое разнообразие Белорусского Поозерья / Л.М. Мержвинский. – Витебск: УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2011. – 413 с.
4. Караблин, У.С. Методы ликвидации и предупреждения ситуаций при освоении месторождений углеводородного сырья: моногр. / У.С. Караблин. – Алмааты: Изд-во «Эверо», 2008. – 185 с.
5. Юденко, А.Е. Модель трансформации участков / А.Е. Юденко // Вычислительные технологии 2000: сб. тр. междунар. конф. – Новосибирск, 2000. – С. 156–163.
6. Оразбаев, Б.Б. Гидродинамические модели для расчета растекания нефти и нефтепродуктов / Б.Б. Оразбаев, А.К. Кенжегалиев, С.Н. Гайсина // Нефть и газ: науч.-техн. журнал. – 2007. – № 4. – С. 98–108.

Поступила 04.05.2015

ASSESSMENT OF POLLUTION OF SOILS IN THE INDUSTRIAL PROPERTY

V. SAVENOK, N. KOVALVSKAYA

The purpose of this paper is to analyze valuation techniques of soil contamination, as well as prediction calculation of possible oil contamination of soil in the area is being built industrial facility. As the study area we consider the construction of the coastal zone Vitebsk small hydropower plants on the Western Dvina river. For studies of possible soil contamination by oil products in this region used a mathematical model of transformation of contaminated sites. Evaluation of soil contamination by oil products is an important component of a comprehensive assessment of the ecological status of soils. Presented in this paper the results of prognostic calculations can be used to assess the extent of oil pollution of soil directly catchment areas based on terrain and in assessing the extent of possible contamination of streams flowing through these areas.

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.482

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ ЛЕТНЕГО АМФИТЕАТРА В ГОРОДЕ ВИТЕБСКЕ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЕВ;
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ; А.И. КОЗАКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

На основе многолетних наблюдений за изменением геометрических параметров уникального арочного сооружения показано, что для такого типа сооружений можно получить хорошие результаты не только на основе индивидуальной программы наблюдений, а и на основе традиционных схем, но с использованием самых современных средств измерений и углубленного этапа проектирования. Результаты выполненных работ подтверждают сформулированные теоретические утверждения. Выполнен анализ полученных результатов, который показывает, что все смещения арочного покрытия имеют значительную корреляцию с температурным фактором.

Летний амфитеатр в городе Витебске – сложная металлическая конструкция, состоящая из множества сопряженных между собой структурных элементов, что определяет уникальность этого объекта. Структурные элементы и их связи несут различные нагрузки не только самих конструктивных элементов, но и изменяют свое пространственное положение в зависимости от многих факторов, основным из которых является температурный. Опыта строительства и эксплуатации подобных объектов как в Республике Беларусь, так и за рубежом не имеется. Так как сооружение достаточно сложное, с множеством степеней свободы, вероятность нарушения геометрических характеристик будет намного выше, чем у других, более простых объектов [1; 2]. Очевидно, что для подобных сооружений в качестве процедуры наблюдения за деформациями в процессе эксплуатации должна была бы разрабатываться индивидуальная программа, учитывающая все особенности такого объекта.

В предлагаемой работе показана возможность использования достаточно традиционной последовательности наблюдений, но на основе современных средств измерений, что позволило, как показали циклические измерения, достаточно эффективно и успешно решить поставленную задачу без привлечения индивидуальных программ.

Объективной информацией поведения конструктивных элементов и, в конечном итоге, всего сооружения в целом является получение этой информации для тех точек сооружения, в которых наиболее возможны возникновения напряженного состояния. В таком случае важным является именно расположение точек для получения наибольшей информативности поведения конструктивных элементов сооружения. Для определения пространственного положения деформационных марок с целью ослабления влияния систематических ошибок при измерениях использовались одни и те же приборы и приспособления во всех циклах мониторинга [2–4].

Исследовательская часть. При выполнении измерений использовался тахеометр TPS 1201 производства Швейцарской фирмы Leica Geosystems. Применение данного прибора дает возможность получить необходимую точность определения деформаций сооружения при выполнении измерений по соответствующей методике.

Основным методом определения координат точек арочного металлического покрытия использовалась пространственная линейно-угловая (векторная) засечка, или обычная сферическая система координат (см., например, [5]).

Приращения координат Δx , Δy и превышения Δh определяемых точек относительно геометрического центра прибора вычислялись по формулам [5; 6]:

$$\begin{aligned}\Delta x &= d \cos v \cdot \cos \alpha; \\ \Delta y &= d \cos v \cdot \sin \alpha; \\ \Delta h &= d \sin v,\end{aligned}\tag{1}$$

где d – измеренное расстояние; α – дирекционный угол; v – измеренный вертикальный угол.

Средние квадратические погрешности приращений координат и превышений связаны со средними квадратическими погрешностями измеренных величин известными формулами:

$$m_{\Delta x} = \sqrt{(\cos(v) \cdot \cos(\alpha))^2 m_d^2 + (d \cos(v) \cdot \sin(\alpha))^2 \left(\frac{m_\alpha''}{\rho}\right)^2 + (d \cos(\alpha) \cdot \sin(v))^2 \left(\frac{m_v''}{\rho}\right)^2};$$

$$m_{\Delta y} = \sqrt{(\cos(v) \cdot \sin(\alpha))^2 m_d^2 + (d \cos(v) \cdot \cos(\alpha))^2 \left(\frac{m_\alpha''}{\rho}\right)^2 + (d \sin(\alpha) \cdot \sin(v))^2 \left(\frac{m_v''}{\rho}\right)^2};$$

$$m_h = \sqrt{(\sin(v))^2 m_d^2 + (d \cos(v))^2 \left(\frac{m_v''}{\rho}\right)^2}.$$

Откуда общая погрешность пункта M_p по Гельмерту будет найдена из следующего выражения:

$$M_p = \sqrt{m_d^2 + \left(\frac{d \cos(v) \cdot m_\alpha''}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{d m_v''}{\rho}\right)^2}. \quad (2)$$

Учитывая реальные условия на объекте, следует принять возможно наихудшие геометрические параметры засечки. Местоположение станции определялось из соображений обеспечения наивыгоднейших условий для производства измерений. Поэтому расстояния от прибора до фиксируемой точки на элементах конструкций арочного покрытия составили не менее двух значений превышений определяемой точки над прибором и не превосходили 100 м, вертикальные углы v при этом не превышали 30° .

Основной фактор, снижающий точность измерений электронным тахеометром, – влияние внешних условий. При передаче приращений координат и превышений на малые расстояния, когда луч проходит в идентичных атмосферных условиях, главная составляющая атмосферных влияний компенсируется, и реальная точность измерений может быть даже несколько выше паспортных. Так, точность линейных измерений в среднем составила 1,5 мм (при паспортных данных 2 мм), и на точность угловых (особенно при малых расстояниях) в основном влияет точность центрирования прибора и отражателя. Для минимизации влияния этой составляющей на объекте использовался метод принудительного центрирования отражателя (на исходных пунктах), обеспечивающий точность центрирования не хуже 0,2 мм. Координаты прибора определялись методом свободной станции.

При геодезических измерениях на точки, расположенные на металлоконструкциях арочного покрытия, использовался безотражательный метод измерений на специальные марки, закрепленные на металлоконструкциях (рис. 1).

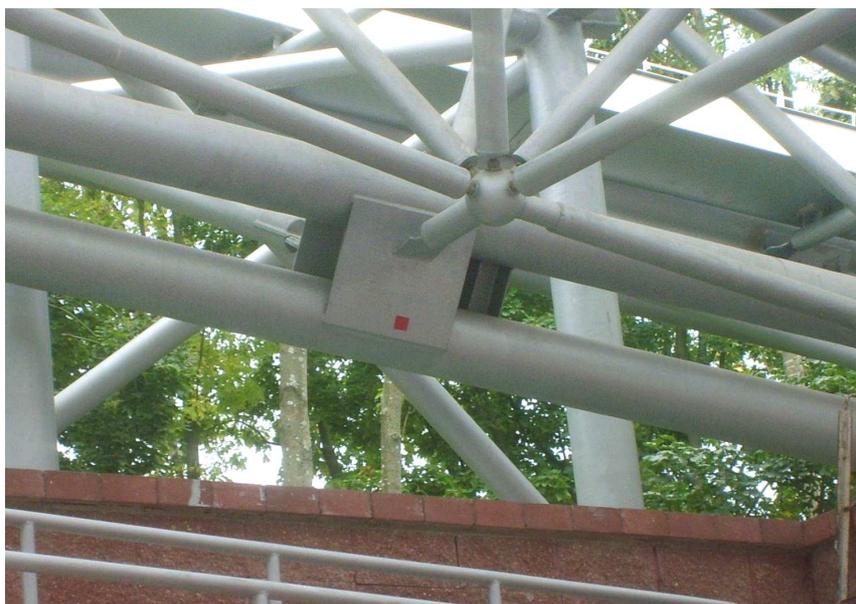


Рис. 1. Деформационные марки на металлоконструкциях

В качестве стабильных пунктов опорной геодезической сети для производства мониторинга выбранные точки на анкерных выходах фундаментов устоявшейся арочной конструкции над сценой Амфитеатра. Стабильность положения их центров анализировалась в процессе строительно-монтажных работ в период реконструкции амфитеатра и после их завершения в течение 3-х лет [2; 3].

Таким образом, на основании анализа формулы (2) и принятой методики выполнения работ средняя квадратическая ошибка определения пространственных координат деформационных марок не должна превышать 3 мм.

За период мониторинговых наблюдений арочного покрытия с 2007 по 2010 год было выполнено 16 циклов измерений по маркированным точкам покрытия. Количество таких маркированных контрольных точек на металлоконструкциях составило 48 (рис. 2).

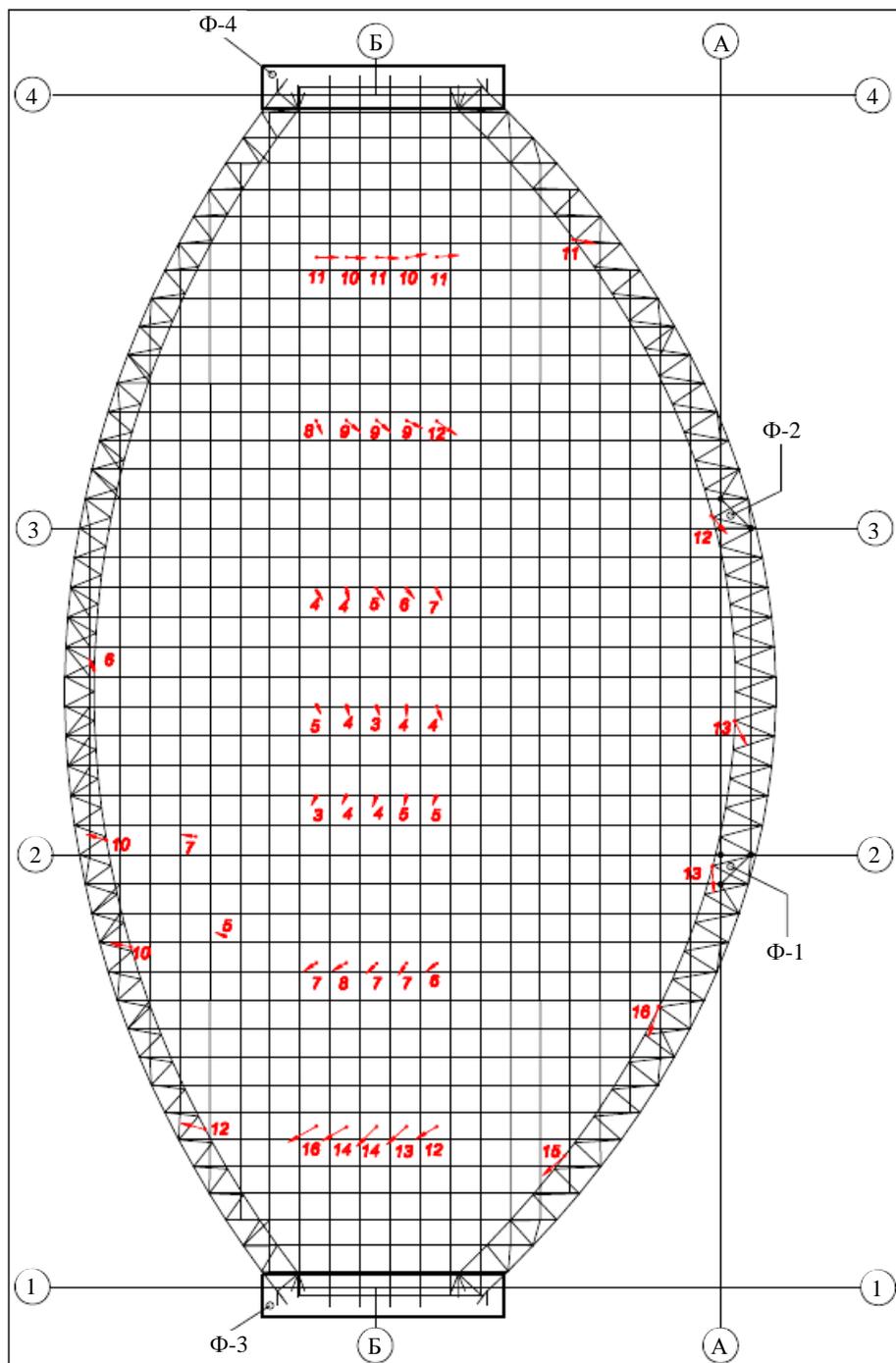


Рис. 2. Схема расположения и горизонтальные перемещения деформационных марок на металлоконструкции арочного покрытия

Методика измерений во всех циклах была неизменной. Прибор и наблюдатель – те же, что и в начале проводимого мониторинга. Это позволило максимально исключить систематические ошибки. Геодезические измерения по контрольным точкам арочного покрытия за 3-х летний период проводились в марте, июне, сентябре и декабре каждого года. Причем следует отметить, что время измерений по возможности совмещалось с моментами максимальных температур и нагрузок на арочное покрытие в виде снега. После математической обработки результатов измерений [6] составлялись векторные графики пространственных изменений контролируемых точек. На рисунке 2 показаны схема расположения и векторы смещений в горизонтальной плоскости контролируемых точек, полученных по результатам измерений в ноябре 2010 года по отношению к начальному циклу наблюдений [3].

Для большей наглядности высотные деформации представлялись графически. Так, на рисунке 3 показаны высотные перемещения арочного покрытия в вертикальной плоскости по строительной оси Б–Б от фундамента Ф-3 к фундаменту Ф-4. На рисунке 4 приведены графики высотных деформаций в поперечном направлении между строительными осями 2–3 по направлению с точки, расположенной над сценой сооружения, к фундаментам Ф-1 и Ф-2.

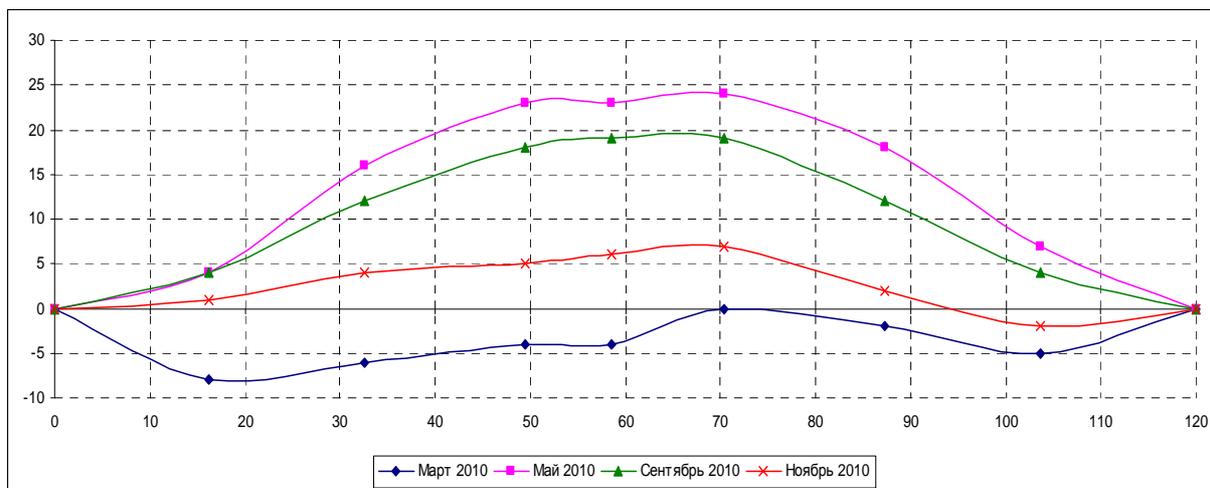


Рис. 3. Вертикальные перемещения деформационных марок на металлоконструкциях по оси Б–Б (с Ф-3 на Ф-4)

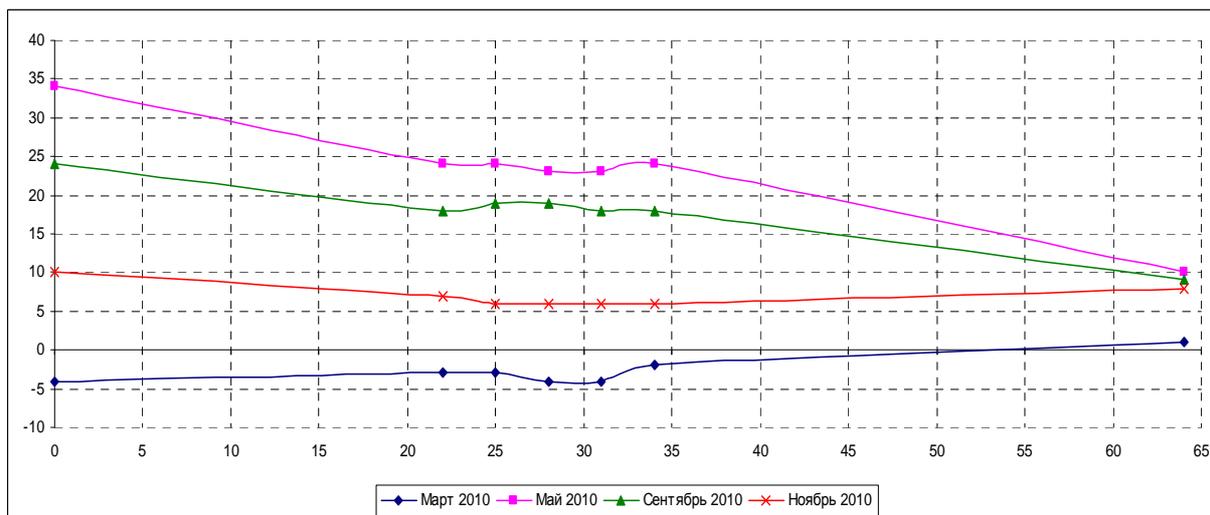


Рис. 4. Вертикальные перемещения деформационных марок на металлоконструкциях между осями 2–3

Как следует из полученных результатов, все смещения арочного покрытия имеют значительную корреляцию с температурным фактором. Сравнивая результаты мониторинга арочного покрытия с результатами, полученными в предыдущие годы (при близких параметрах внешних условий), можно

констатировать, что направления деформаций и их величины имеют незначительные расхождения. Этот факт характеризует стабильность положения металлоконструкций.

По результатам геодезического мониторинга металлоконструкций и фундаментов за трехлетний период наблюдений с 2007 по 2010 год можно сделать следующие **выводы**:

- пространственные перемещения маркированных контрольных точек не превышают расчетных и обусловлены главным образом изменениями влияния внешних факторов (в основном температурного). Максимальные перемещения по высоте металлоконструкций относительно нулевого цикла составили: 69; 53; 61 и 42 мм в 2007, 2008, 2009 и 2010 годах соответственно. Плановые деформации металлоконструкций в 2007, 2008, 2009 и 2010 годах имеют практически одинаковые величины и направления в соответствующих циклах наблюдений;

- как и в предыдущих циклах измерений, вызывает интерес поведение металлоконструкций в направлении на точки их сопряжения со вспомогательными опорами (Ф-1 и Ф-2 (см. рис. 2). Согласно графикам вертикальных перемещений деформационных марок на металлоконструкциях между осями 2–3 в поперечном сечении амплитуда вертикальных перемещений в 2010 году над сценой составила 38 мм, а около опор Ф-1, Ф-2 только 9 мм, что говорит о не равномерности вертикальных перемещений в поперечном сечении;

- вертикальные деформации вдоль оси Б–Б имеют практически симметричную форму (см. рис. 3 и 4), что говорит о равномерном распределении нагрузок на арочное покрытие;

- предложенная методика позволяет достоверно определить геометрические параметры структуры покрытия Летнего амфитеатра в городе Витебске в процессе эксплуатации. Результаты выполненных работ подтверждают сформулированные теоретические утверждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геодезические работы в строительстве. Технический кодекс установившейся практики. Правила проведения: ТКП45-1.03-26-2006 (02250). – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2006.
2. Геодезическое обеспечение монтажа фундаментов и покрытия при реконструкции Летнего амфитеатра в городе Витебске: техн. отчет. – ХД № 26640 от 26.10.06.
3. Инженерно-геодезические измерения перемещений конструкций фундаментов и покрытия при их эксплуатации (2010 г.): техн. отчет. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2010. – 40 с.
4. Подшивалов, В.П. Тригонометрическое нивелирование коротким лучом / В.П. Подшивалов, А. Салим // Геодезия и картография. – 1994. – № 6. – С. 12–14.
5. Дегтярев, А.М. Геодезия: учеб.-метод. компл.: в 2 ч. Ч. 1 / А.М. Дегтярев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2010. – 364 с.
6. Геодезия. Вычисления и уравнивание в геодезии: справ. пособие / под ред. В.П. Савиных и В.Р. Яценко. – М.: Недра, 1992. – 250 с.

Поступила 03.03.2015

ENGINEERING AND GEODETIC MEASUREMENTS OF DEFORMATIONS OF STRUCTURES COVERAGE OF THE SUMMER AMPHITHEATRE IN VITEBSK DURING THEIR OPERATION

A. DEGTJAREV, V. JALTYHOV, A. KOZAKEVICH

Based on long-term observation of dynamics in geometric parameters of an arch structure, the article shows that it is possible to get good results not only using an individual observation program, but also with the help of traditional schemes and usage of up-to-date measurement techniques and a profound design stage. The results of carried work prove the formulated theoretic theses. The analysis of results shows that all arch coverage deformations have a significant correlation with temperature.

УДК 528.27

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*канд. техн. наук, доц. И.Е. РАК**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассматриваются вопросы, с которыми сталкиваются специалисты, занимающиеся созданием ГИС города инженерного назначения на основе архивного картографического материала. Исследованы методы преобразования и даны рекомендации по учету возможных ошибок исходных материалов, возникающих под влиянием нелинейных деформаций основы, на которой отпечатан исходный материал.

Необходимость проведения градостроительных и учетно-кадастровых работ, мониторинга земельных ресурсов, потребность власти на местах иметь возможность оперативного принятия управленческих решений определили развитие геоинформационных систем (ГИС) инженерного назначения.

Сегодня идея создания городской ГИС инженерного назначения, возникшая в начале развития компьютерных технологий, до сих пор практически не реализована ни в одном крупном городе СНГ. Главная причина этого (например, в Республике Беларусь) заключается не в отсутствии финансирования и не в отсутствии специалистов, готовых заниматься этой проблемой, а в том, что нет системного подхода к решению глобальной задачи по сбору и использованию уже накопленной информации, нет единого информационного пространства для обмена информацией между отдельными ведомствами [5].

И первым шагом к решению данной проблемы должны быть законодательные акты, закрепляющие концепцию создания и развития электронного векторного топографического плана города.

Кроме того, для создания ГИС инженерного назначения необходима современная, точная цифровая топографическая и картографическая информация. Но из-за того, что в городах имеется несколько местных систем координат, сети неравноточные, не согласованы друг с другом, совместно не уравниваются, формировать единое равноточное пространство территории города невозможно. Поэтому вопрос о создании единой системы координат города, которая бы учитывала особенности уже существующих систем и обеспечивала бы свободный доступ исполнителям, не противореча в то же время действующему законодательству о сведениях, составляющих государственную тайну, потребует согласованных решений [6].

Еще одна проблема – архивный картографический материал. Архивный материал – это планшеты, созданные 20–30 лет назад и, соответственно, имеющие на сегодняшний день устаревшую информацию. Поэтому назрела необходимость в разработке технических приемов, которые позволят исследовать содержание архивного картографического материала и привести его к современному состоянию. Наиболее эффективным методом перевода информации с бумажного носителя в цифровой является сканирование и трансформирование планшетов. В то же время для этого нужны четкие рекомендации по учету возможных ошибок исходных материалов, возникающих под влиянием нелинейных деформаций основы, на которой отпечатан исходный материал. Но отсканировать планшет – это еще не значит получить топографо-геодезическую основу данной территории.

Технология исследования точности трансформирования была опробована на двух издательских оригиналах на пластике (В-1 и Б-4 в системе координат 1963 года).

Сканирование было выполнено с геометрическим разрешением 85,3 мкм (300 dpi). Трансформирование выполнялось с помощью программных средств ГИС ArcGis и реализованных в ней методов аффинного преобразования и полиномиальных преобразований второй и третьей степени.

В качестве исходных и контрольных точек были использованы углы рамки трапеции, точки ее пересечения с линиями километровой сетки и узлы километровой сетки (рис. 1, 2).

Минимальное число контрольных точек (n) устанавливалось исходя из известного соотношения между точностью вычисления ожидаемой средней квадратической ошибки m_m и самой средней квадратической ошибкой (m):

$$\frac{m_m}{m} = \frac{1}{\sqrt{2n}}. \quad (1)$$

Потребовав, чтобы отношение m_m/m не превышало 1/7...1/5 (15...20 %), получим, что число контрольных точек n должно быть не менее 12.

Определение параметров преобразования одной координатной системы в другую выполняется методом наименьших квадратов, эффективность применения которого (как и надежность оценки точности уравнительных вычислений) определяется наличием систематических ошибок. В связи с этим была выполнена статистическая обработка сформированных рядов остаточных расхождений координат то-

чек (Δ_x , Δ_y) для проверки случайного характера этих расхождений и гипотезы о нормальности распределения погрешностей соответствующего ряда с помощью известных критериев при 5 %-ном уровне значимости (то есть при доверительной вероятности 95 %).

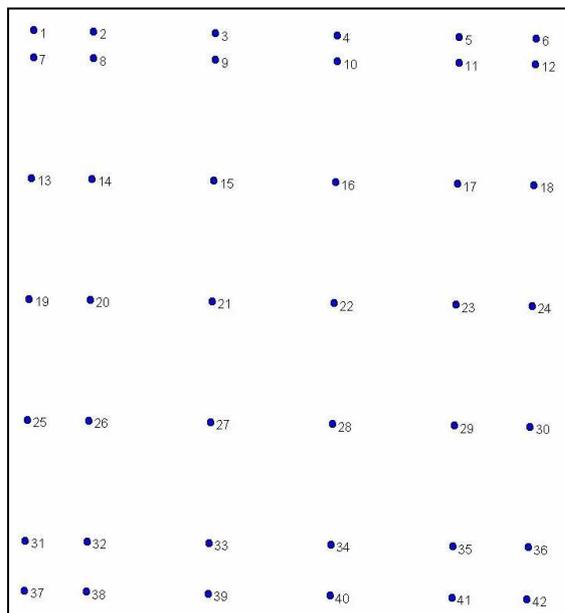


Рис. 1. Схема размещения опорных и контрольных точек на трапеции В-1



Рис. 2. Схема размещения опорных и контрольных точек на трапеции Б-4

Таким образом, всего на трапеции В-1 и Б-4 было выбрано 42 и 36 опорных точек соответственно, что позволило в последующем выполнить определение параметров трансформирования растровых изображений несколькими способами с различным числом исходных и контрольных точек (табл. 1).

Таблица 1

Исходные и контрольные точки

Способ трансформирования	Число точек на листе					
	В-1			Б-4		
	вариант	исходный	контрольный	вариант	исходный	контрольный
Аффинный	1	4	38	10	4	32
	2	8	34	11	8	28
	3	12	30	12	12	24
	4	22	20	13	20	16
Полиномиальный 2-й степени	5	8	34	14	8	28
	6	12	30	15	12	24
	7	22	20	16	20	16
Полиномиальный 3-й степени	8	12	30	17	12	24
	9	22	20	18	20	16

Первичный анализ результатов измерений

Для оценки точности преобразования дискретных точек исходных оригиналов по расхождениям эталонных и вычисленных координат контрольных точек, в каждом эксперименте были вычислены средние (v) и средние квадратические ошибки (m) по координатным осям и в плане:

$$\left. \begin{aligned} m_x &= \sqrt{\frac{\sum \Delta_x^2}{n}}, \quad m_y = \sqrt{\frac{\sum \Delta_y^2}{n}}, \quad m_s = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_x^2 + \Delta_y^2)}{n}}; \\ v_x &= \frac{\sum |\Delta_x|}{n}, \quad v_y = \frac{\sum |\Delta_y|}{n}, \quad v_s = \frac{\sum \sqrt{(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)}}{n}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

После этого все точки, на которых остаточные невязки превышали утроенное значение установленной Инструкцией [3] средней погрешности положения точек плановой съемочной сети относительно пунктов государственной геодезической сети (0,3 мм или 3,0 м), были исключены как ошибочные. Уточненные значения средних и средних квадратических погрешностей преобразования были вычислены по формулам (2) повторно. Всего по этому основанию исключена 21 точка (5 % от общего их числа).

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

- 1) установленные по контрольным точкам погрешности преобразования во всех вариантах близки между собой (кроме вариантов 10 и 11, где эти погрешности оказались несколько больше), а различия между ними не превышают 15...30 % от их величины, что соответствует расчетным значениям надежности оценки;
- 2) исключение из обработки контрольных точек с остаточными расхождениями, превышающими 0,3 мм в масштабе плана, улучшило средние и средние квадратические погрешности на 15...20 %;
- 3) во всех случаях средние квадратические ошибки планового положения на 15...20 % больше средних, что подчеркивает незначительное влияние ошибок систематического характера и свидетельствует в пользу нормального распределения;
- 4) все измерения выполнены с надлежащей точностью, заметного влияния систематических ошибок не обнаружено. Результаты обработки данных могут быть использованы для выработки обоснованных рекомендаций;
- 5) при использовании полиномов второй и тем более третьей степени и размещении опорных точек по периметру изображения значения остаточных расхождений координат точек существенно уменьшаются;
- 6) при обработке трапеции **В-1** средние и средние квадратические ошибки контрольных точек по оси ординат оказались на 10...25 % больше, чем ошибки абсцисс. Для трапеции **Б-4** ситуация обратная: ошибки абсцисс превышают ошибки ординат.

Так как в соответствии с требованиями Инструкции [3] средняя погрешность положения точек плановой съемочной сети относительно опорной геодезической сети не должна превышать 0,1 мм, то привязка растровой копии должна быть выполнена так, чтобы был обеспечен указанный допуск. Следовательно, погрешность положения точки привязанного к требуемой координатной системе и трансформированного по параметрам преобразования цифрового оригинала должна быть также 0,1 мм, а предельная – 0,2 мм. Применительно к масштабу 1:10000 этот допуск составит 1 и 2 м соответственно.

Однако сканирование издательских оригиналов выполнено с геометрическим разрешением 0,085 мм, что увеличивает ошибку измерения растровой копии и делает ее сопоставимой с ошибкой исходного оригинала (0,1 мм). Поэтому суммарную ошибку положения точки на исходном оригинале и ошибку измерения ее координат по растру можно полагать равной

$$M = \sqrt{(0,100)^2 + (0,085)^2} \approx 0,131 \text{ мм.}$$

С учетом этого средняя ошибка преобразования составит 1,3 м, а предельная – 2,6 м. В этот допуск укладываются все выполненные измерения, что свидетельствует об их достаточно высоком качестве. Причем, как и следовало ожидать, применение полиномиальных преобразований уменьшает эту погрешность на 20 % и более.

Следовательно, для приведения в соответствие точности исходного и цифрового оригиналов геометрическое разрешение растровой копии нужно уменьшить до пренебрегаемо малой величины, и оно должно составлять около 40 % от средней ошибки положения пунктов плановой сети, то есть иметь разрешение 500...600 dpi.

Статистические исследования остаточных расхождений координат контрольных точек

Статистические характеристики результатов экспериментальных работ были выполнены для выявления случайности погрешностей измерений, оценки достоверности найденных критериев, обоснованности используемых или предлагаемых технологических допусков и правомерности применения метода наименьших квадратов для определения вероятнейших значений неизвестных, которыми в контексте выполненных исследований являются параметры трансформирования исходной картографической основы – растровых копий соответствующих материалов.

Технология таких исследований достаточно хорошо отработана, описана в технической литературе и сводится к проверке с помощью соответствующих критериев гипотезы о нормальном распределении исследуемых погрешностей. Такая оценка выполняется по результатам сравнения параметров кривой эмпирического (реального) и теоретического распределения с помощью тех или иных критериев.

Проверка гипотезы о нормальном распределении рядов ошибок с помощью мощных критериев Пирсона, Колмогорова, Ястремского и целого ряда иных выполняется только для оценки достаточно больших рядов, с числом ошибок несколько десятков или сотен [1]. В условиях эксперимента это требо-

вание не выполнялось, поэтому было принято решение ограничить исследования оценкой основных параметров кривой распределения и сравнением их с теоретическими значениями.

К основным параметрам, определяющим форму кривой распределения погрешностей, относятся: математическое ожидание (M); начальные моменты первого – четвертого порядков ($v_1 \dots v_4$); центральные моменты второго – четвертого порядков ($\mu_2 \dots \mu_4$); асимметрия (S); эксцесс (E); дисперсия (σ); среднее (v) и среднее квадратическое (m) значения; отношение (z) средней погрешности к средней квадратической, определяемые по приведенным ниже формулам [1], а также иные параметры (например, параметры «спрямленной» диаграммы).

$$M = \sum \Delta_i; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{1}{n} \sum \Delta_i, & v_3 &= \frac{1}{n} \sum \Delta_i^3, \\ v_2 &= \frac{1}{n} \sum \Delta_i^2, & v_4 &= \frac{1}{n} \sum \Delta_i^4; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_2 &= \sigma^2 = v_2 - v_1^2, \\ \mu_3 &= v_3 - 3v_2v_1 + 2v_1^3, \\ \mu_4 &= v_4 - 4v_3v_1 + 6v_2v_1^2 - 3v_1^4; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} S_k &= \frac{\mu_3}{\sigma^2} = \frac{\mu_3}{\mu_2}, \\ E_k &= \frac{\mu_4}{\sigma_4} - 3, \\ z_k &= \frac{v}{m}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где Δ_i – погрешность измерений (элемент исследуемого ряда); v , m – средняя и средняя квадратическая погрешности соответственно.

Тесноту размещения погрешностей относительно центра группирования (их «разброс») характеризуют математическое ожидание, дисперсия и средняя погрешность, форму кривой эмпирического распределения – эксцесс, а ее положение относительно центра группирования – асимметрия. Как известно, при нормальном распределении исследуемых погрешностей значения асимметрии и эксцесса равны нулю, а отношение средней погрешности к средней квадратической составляет 0,8.

Исследуемое (эмпирическое) распределение может отличаться от нормального с заданной степенью приближения к нему, поэтому перечисленные величины должны заключаться в некотором диапазоне допустимых значений, границы которого находятся по следующим формулам [7]:

$$\left. \begin{aligned} |S_k| &\leq 3\sigma_s, & \sigma_s &\approx \sqrt{\frac{6}{n+3}}; \\ |E_k| &\leq 3\sigma_m, & \sigma_m &\approx \sqrt{\frac{24(n-3)}{(n+3)(n+5)}}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где n – число погрешностей в исследуемой выборке; z_a , z_b – критические значения отношения z , выбираемые из [1, табл. 19] в зависимости от числа погрешностей и уровня значимости (при оценке асимметрии и эксцесса уровень значимости учитывается косвенно, с помощью коэффициента при стандарте σ , значение которого может колебаться от 2,0 до 3,0).

Заметим, что начальные моменты первого порядка характеризует величину систематической погрешности.

Для проверки гипотезы нормального распределения довольно часто используют так называемый способ «спрямленных» (выпрямленных) диаграмм (рис. 3), для чего исследуемые погрешности размещают в ряд по возрастанию их значений.

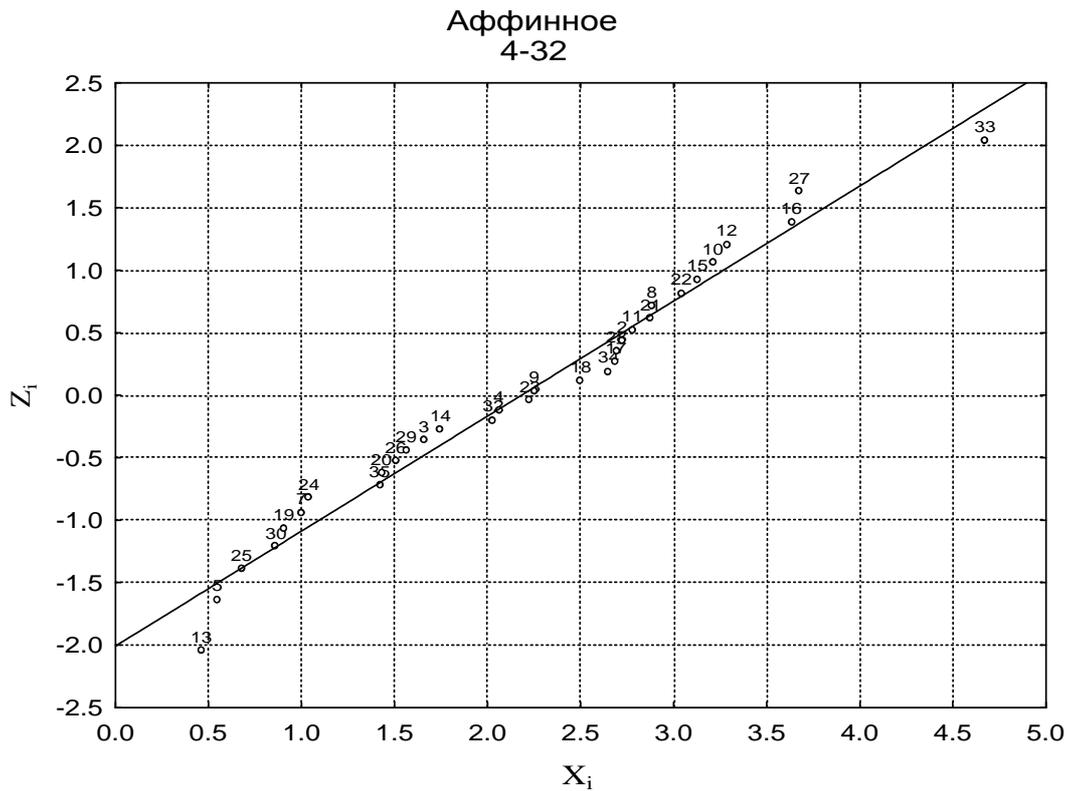


Рис. 3. Пример использования способа «спрямленных» диаграмм

Каждому элементу i этого ряда соответствует функция распределения, вычисляемая по формуле:

$$\bar{F}(z_i) = \frac{i-0,5}{n}, \quad (8)$$

по значению которой из выражения

$$F(\bar{z}_i) = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} e^{\frac{z^2}{2}} dz + 0,5 = \bar{F}(z_i) \quad (9)$$

по вспомогательной таблице в [1] находят величину z .

Гипотеза нормальности распределения считается непротиворечащей результатам измерений, если удаление точек от прямой, соответствующей желаемому (нормальному) распределению, не превышает вычисленного для принятого уровня значимости величины

$$|\bar{z} - z_i| \frac{t_i}{\phi(z_i)} \sqrt{\frac{[0,5 + \Phi(z_i)] \cdot (0,5 - \Phi(z_i))}{n}}, \quad (10)$$

где $\phi(z_i)$ – нормальная плотность распределения; t_i – критерий, выбираемый в зависимости от принятого уровня значимости (доверительной вероятности) и числа погрешностей; n – общее число членов ряда.

При выполнении расчетов были использованы рекомендации и вспомогательные таблицы, имеющиеся в работе [1, с. 99–100, 180, 182–183].

Результаты статистической обработки данных и их анализ

Статистический анализ полученных данных включал проверку гипотезы о нормальном распределении исследуемых погрешностей по следующим параметрам:

- по размаху выборки, определяемому величинами средних, средних квадратических погрешностей и их отношению;
- по форме кривой, определяемой значениями асимметрии и эксцесса, зависящими от величин погрешностей и их частот (с учетом знаков);
- по параметрам «спрямленных» диаграмм.

Параметры размаха выборки были вычислены без учета исключенных из обработки точек, что несколько изменило отношения z_k в сторону увеличения. При этом критические значения z_a, z_b найдены по таблице 19 в [1] для 5 %-ного уровня значимости в зависимости от числа исследуемых погрешностей.

Полученные данные показали, что по исследуемому параметру гипотеза о нормальном распределении не отвергается для рядов, полученных при использовании полиномов второй и третьей степени. Для рядов погрешностей, полученных при использовании аффинных преобразований, отношения z_k близки к верхнему пределу критических значений z_b , превышая их на 0,01...0,02 (соответствующие значения в таблице выделены). Одной из возможных причин этого является достаточно малое число измерений в рядах.

Параметры, определяющие форму кривой, вычислены по остаточным расхождениям эталонных и вычисленных координат (а не по невязкам планового положения, не имеющих знака).

Полученные данные позволили сделать следующие основные выводы:

- во всех случаях уклонения асимметрии и эксцесса от их теоретических значений не превышают утроенных значений стандартов соответствующих ошибок и должны быть признаны несущественными;
- значения математических ожиданий во всех случаях соответствуют систематическим погрешностям, составляющим несколько сантиметров, что никак не может признаваться существенным;
- во всех случаях значения дисперсии, вычисленной по формуле

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (11)$$

и соответствующей средней квадратической погрешности m_s , вычисленной по формуле (2), отличаются на величину, не превышающую стандарта среднего квадратического отклонения σ_σ .

Изложенное свидетельствует о том, что вычисленные значения асимметрии и эксцесса не противоречат нормальному распределению исследуемых погрешностей.

Способ спрямленных диаграмм, использованный для исследования результатов обработки данных двух трапеций, показывает, что ни в одном из исследованных рядов измерений гипотеза о нормальности исследуемых выборок не опровергается по малости уклонений точек от соответствующих прямых.

Подводя итог статистических исследований, следует отметить, что все использованные критерии проверки гипотезы о нормальном распределении, за исключением отношения средней погрешности к средней квадратической для вариантов аффинных преобразований, не отвергают ее при 5 %-ном уровне значимости. Что же касается аффинных преобразований, то выход эмпирических значений отношений z_k средних погрешностей к средним квадратическим не может служить серьезным основанием для опровержения проверяемой гипотезы как по малости величины отклонения, так и в связи с малым числом исследуемых погрешностей, число которых для уверенной оценки должно быть более 30 [1].

Изложенное дает основание полагать, что выполненные измерения не содержат заметных систематических погрешностей, а остаточные расхождения координат контрольных точек подчиняются закону нормального распределения, что позволяет использовать их для установления соответствующих допусков и выработки рекомендаций.

Выводы и предложения

Приведенные выше результаты исследования некоторых способов координатных преобразований с целью последующего трансформирования растрового изображения и подтверждение гипотезы о нормальном распределении остаточных расхождений координат контрольных точек позволяют сделать несколько выводов и рекомендаций, касающихся отработки и совершенствования технологии создания геоинформационных систем на растровой картографической основе:

- 1) при сканировании исходных материалов геометрическое разрешение выходного изображения не должно вносить дополнительных искажений, сохраняя точность положения объектов в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Это можно обеспечить в случае, если размер пикселя растрового оригинала будет не более 30...40 % от средней погрешности положения опорных точек на исходном оригинале. Применительно к составительскому оригиналу это соответствует геометрическому разрешению порядка 30...40 мкм или 500...600 dpi;
- 2) в качестве исходных и контрольных опорных точек желательно принимать углы рамки трапеции, точки пересечения линий координатной сетки и ее выходы на рамку;
- 3) при большом числе исходных опорных точек, равномерно размещенных по рамке трапеции, все исследованные способы координатных преобразований обеспечивают получение результатов одинаковой точности, не зависящей от положения контролируемой точки;
- 4) при использовании в качестве исходной основы составительских оригиналов на пластике допустимо использование аффинных преобразований по четырем точкам, совмещенным с углами трапеции. Контроль результатов такого преобразования можно выполнить по четырем – пяти точкам, расположенным по серединам северной, восточной, южной и западной рамок трапеции;

5) полиномы второй и третьей степени целесообразно использовать в случаях, когда есть основание предполагать возможность наличия неравномерной или случайной деформации исходного оригинала. Исправить ее влияние можно не менее чем по восьми точкам, размещенным по углам рамки и на ее серединах. В этом случае контрольные точки можно располагать в центре трапеции и вблизи ее рамки;

6) применение полиномиальных преобразований при размещении исходных с нарушением их симметрии относительно центра листа приводит к искажениям, что следует считать недопустимым;

7) точность координатных преобразований может быть установлена по четырем – пяти контрольным опорным точкам, размещенным в местах, наиболее удаленных от исходных точек. Надежность оценки точности по такому числу точек может составить 20...25 %;

8) для определения параметров растровых оригиналов, полученных с рекомендованным в пункте 1 геометрическим разрешением, величина остаточной невязки на исходных точках не должна превышать 0,1 мм, а предельная – 0,2 мм в масштабе плана. Средняя невязка, найденная по контрольным точкам, не должна превышать 0,12...0,17 мм в масштабе плана;

9) трансформирование растрового изображения должно выполняться возможно меньшими фрагментами, хотя это и требует дополнительных затрат времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Видуев, Н.Г. Вероятностно-статистический анализ погрешностей измерения / Н.Г. Видуев, Г.С. Кондра. – М.: Недра, 1969.
2. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – М.: Недра, 1985.
3. Калинин, А.С. Технологии организации данных при ведении дежурных планов городов при использовании систем CREDO третьего поколения / А.С. Калинин // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования: материалы конф. – М., 2007.
4. Пыко, Т.В. Современное состояние и перспективы развития топографо-геодезического картографического производства Республики Беларусь / Т.В. Пыко // Материалы Первого конгресса геодезистов и картографов. – Минск, 2002.
5. Рак, И.Е. Разработка и исследование методики топографо-геодезических работ для использования ГИС-технологий в средних и малых городах Беларуси / И.Е. Рак // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 3.
6. Федосеев, Ю.Е. Создание цифровых карт масштаба 1:2000 с применением устаревших архивных данных / Ю.Е. Федосеев, Н.М. Никитина // Геопрофи. – 2004. – № 3, 4.
7. Федосеев, Ю.Е. Некоторые проблемы и технологии создания топоосновы для комплексной модели населенного пункта / Ю.Е. Федосеев, И.Е. Рак // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 3.

Поступила 13.05.2015

INVESTIGATING THE ACCURACY OF TRANSFORMING OF THE RASTER IMAGES

I. RAK

The article discusses the issues faced by professionals involved into creation of GIS city for engineering purposes on the basis of archival cartographic material. Also here explored methods of the conversion and given recommendations for registration possible mistakes arising under the influence of nonlinear deformation of the base which is used for printing the source material.

УДК 528.71

РАСЧЕТ РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ СНИМКА

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА
(Полоцкий государственный университет);
А.В. ИЛЬЮШЕНКО
(Минскремстрой)

Рассматривается сканирование снимков как важный этап технологии создания топографических карт и планов с использованием цифровых фотограмметрических систем. Перед сканированием снимков Инструкцией рекомендуется выполнить расчет оптимального элемента геометрического разрешения исходя из требуемой точности определения плановых координат и высот точек фотограмметрической модели, передачи разрешающей способности исходного снимка, разрешающей способности графического фотоплана. Полагаем, что в Инструкции надо требовать рассчитывать размер разрешения при сканировании для обеспечения качественного дешифрирования. Приводится методика расчета разрешения при сканировании для обеспечения дешифрирования с вероятностью 75 %.

Сканирование снимков является важным этапом технологии создания топографических карт и планов с использованием цифровых фотограмметрических приборов и систем, так как от его качества зависят все последующие процессы обработки цифровых изображений.

Перед сканированием снимков Инструкцией [1] рекомендуется выполнить расчет оптимального элемента геометрического разрешения исходя из следующих факторов: требуемой точности определения плановых координат V_s (0,2 мм) и высот V_z (0,2hc) точек фотограмметрической модели; передачи разрешающей способности исходного снимка R (в мм⁻¹); разрешающей способности графического фотоплана 70 мкм; масштаба карты (плана) 1: M_k , масштаба обрабатываемых снимков 1: M_c , величины фокусного расстояния камеры f , базиса фотографирования на снимке b , высоты сечения рельефа hc .

Величины элементов разрешения составят [1]:

- для обеспечения точности определения плановых координат P_s :

$$P_s = \frac{M_k}{2M_c} V_s; \quad (1)$$

- для обеспечения точности определения высот P_z :

$$P_z = \frac{f}{2bM_c} V_z; \quad (2)$$

- для обеспечения разрешающей способности графических фотопланов P_p :

$$P_p = 70 \frac{M_k}{M_c}; \quad (3)$$

- для обеспечения разрешающей способности снимка P_R :

$$P_R = \frac{0,4}{R}. \quad (4)$$

В формулах (1) и (2) цифра 2 – коэффициент, учитывающий потерю точности из-за процессов обработки [1]: сканирования, опознавания, стереонаведения и измерения точек. За окончательное из разрешений P_s, P_z, P_p, P_R берется их минимальное значение.

В данной работе мы остановимся на рассмотрении вопроса определения геометрического разрешения для обеспечения разрешающей способности R снимка (формула (4)). Чтобы обеспечить качественное дешифрирование важно правильно рассчитать разрешение при сканировании снимков. Воспользуемся примером из Инструкции по фотограмметрическим работам [1].

Если план масштаба 1:2000 с сечением рельефа 1,0 м составляется по аэрофотоснимкам масштаба 1:10000, полученным аэрофотоаппаратом (АФА) формата 18×18 см с фокусным расстоянием 100 мм и разрешающей способностью 40 мм⁻¹, то $P_s = 20$ мкм, $P_z = 14$ мкм, $P_R = 10$ мкм, $P_p = 14$ мкм [1].

Расчеты свидетельствуют, что геометрическое разрешение для обеспечения разрешающей способности снимка получилось $P_R = 10$ мкм. Как видим, мы получили наименьший размер геометриче-

ского разрешения для выполнения качественного дешифрирования, который и должен быть применен для сканирования снимков. Отсканировать снимки с таким разрешением можно только на фотограмметрических сканерах.

Изначально можно обратить внимание на то, что в формуле (4) используют ошибочный коэффициент 0,4. По результатам расчетов в работе [2] был подобран новый коэффициент, равный 0,5.

С учетом исправленного коэффициента формула (4) примет вид [2]:

$$P_R = \frac{0,5}{R}. \quad (5)$$

В Инструкции [1] для сканирования снимков с разрешающей способностью $R = 40 \text{ мм}^{-1}$ получено разрешение 10 мкм, но с учетом нового коэффициента, чтобы получить разрешающую способность 40 мм^{-1} , снимки необходимо сканировать с разрешением 12,5 мкм, что подтверждает следующая формула [3; 4]:

$$R = \frac{1}{2P_R} = \frac{1}{2 \cdot 12,5} = 40 \text{ мм}^{-1}. \quad (6)$$

В этом случае разрешающая способность цифрового изображения будет такая же, как и на снимке. Возможны и более значительные различия в разрешениях при сканировании.

Например, рассчитаем разрешение при сканировании для создания плана масштаба 1:М...1:5000 с сечением рельефа 2,0 м, составляемого по аэрофотоснимкам масштаба 1:м...1:8000, полученным аэрофотоаппаратом (АФА) с форматом кадра $23 \times 23 \text{ см}$, фокусным расстоянием 153 мм и разрешающей способностью $R = 40 \text{ мм}^{-1}$. Результаты приведем в таблице 1.

Таблица 1

Расчет разрешения при сканировании

$P_S = \frac{M_k}{2M_C} V_S$	$P_Z = \frac{f}{2bM_C} V_Z$	$P_P = 70 \frac{M_k}{M_C}$	$P_R = \frac{0,5}{R}$
62,5 мкм	41,6 мкм	43,8 мкм	12,5 мкм

Из таблицы 1 видно, что по четырем формулам для расчета разрешений при сканировании P_S , P_Z , P_P , P_R значение размера пикселя для обеспечения разрешающей способности снимка P_R получили в пять раз меньше, чем при определении P_S . Так как Инструкция требует сканировать снимки с минимальным размером пикселя, то это приведет к значительному увеличению объема информации, а следовательно и к увеличению времени обработки, а в конечном итоге – к повышению цены продукции в целом. Поэтому возникает вопрос, так ли важно обеспечивать разрешающую способность снимка. Правильнее было бы привести в Инструкции расчет размера разрешения при сканировании для обеспечения качественного дешифрирования.

Математическое выражение вероятности распознавания простых объектов P имеет вид [3]:

$$P = \exp \left[- \left(B \frac{A}{L} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где L – геометрический размер простого объекта (диаметр, диагональ, длина и т.п.), который сможем отдешифрировать с вероятностью P ; A – разрешение аэрофотоснимка, указывающее размер минимального еще раздельно изобразившегося на снимке объекта; B – коэффициент распознавания формы простого объекта.

Соотношение аргументов A и L в формуле (7) выражает закономерность: чем больше геометрические размеры объекта и чем совершеннее качество снимка, тем лучше условия распознавания и выше его результат [3].

Разрешение аэрофотоснимка A дает достаточно полное и дифференцированное представление о качестве фотоизображения. Величина A формируется под влиянием условий фотографирования (освещенности местности, состояния атмосферы, выбора объектов и режима химико-фотографической обработки экспонированных материалов). Разрешение аэрофотоснимка A можно рассчитать по формуле [3; 4]:

$$A = \frac{M_C}{2R}. \quad (8)$$

Кроме разрешения снимка A и размера объекта L , который сможем отдешифрировать камерально, большое влияние на достоверность распознавания оказывает форма объекта. Объекты, имеющие одинаковые размеры, но отличающиеся по форме, воспринимаются по-разному и распознаются с различной степенью достоверности. Влияние этого фактора принято выражать через коэффициент B (коэффициент распознавания формы) [3].

В таблице 2 приводятся значения коэффициента B для объектов с простейшими геометрическими формами, которые характерны для большинства топографических элементов местности [3].

Таблица 2

Значения коэффициента B

№ п/п	Форма объекта	Величина коэффициента распознавания формы, B
1	 Круг	0,97
2	 Прямоугольник	1,45
3	 Угол	1,58
4	 Квадрат	1,72
5	 Стенка	2,78

На абсолютное значение вероятности распознавания влияет множество факторов. Основные из них [3]: условия получения снимка (высота полета, характеристики аэрофотоаппарата и фотоматериалов, др.) и условия дешифрирования (квалификация оператора, применяемые технические средства).

Требовать, чтобы вероятность качественного дешифрирования была равна или близка к единице, не всегда целесообразно и возможно. Это, как говорится в работе [3], вытекает из экономических соображений. Считается вполне удовлетворительным результат дешифрирования, характеризующийся вероятностью распознавания 0,75. При этом большинство задач будет выполнено с минимумом затрат на производство дешифрирования [3].

Согласно таблице 2 для расчета вероятности дешифрирования следовало бы принять коэффициент $B = 2,78$, о чем свидетельствует формула (7). Однако объекты в форме «стенка» не всегда имеют малые размеры на местности.

Наиболее сложно будет дешифрировать объекты, имеющие небольшие размеры, соизмеримые с разрешением аэроснимков, поэтому далее будем рассматривать именно такие объекты.

Выполнив анализ условных знаков [5; 6], мы пришли к выводу, что отображаемые на картах (планах) разных масштабов объекты, имеющие минимальные размеры, будут круглой формы. Поэтому рассмотрим вопрос расчета вероятности распознавания объектов, имеющих круглую форму.

Исходя из этого, в таблице 3 приведем минимальные размеры объектов круглой формы, которые отобразятся на картах разных масштабов.

Таблица 3

Минимальные размеры объектов, отображаемые на картах разных масштабов

Масштаб карты (плана) 1: M_k	Наименование объекта	Размер объекта L , см
1: 2000	Столбы, гидранты	20
1: 5000	Колодцы коллективного пользования	150
1: 10000	Буровые скважины	220
1: 25000	Буровые скважины	220

Для масштаба создаваемого плана 1:2000 выбрали размер круглого объекта диаметром 20 см. Такой диаметр будут иметь круглые столбы, гидранты. Другие объекты будут иметь больший размер. Для масштаба 1:5000 минимальным оказался размер, равный 1,5 м. Такой размер имеют колодцы коллективного пользования. Для других масштабов минимальным оказался размер буровой скважины диаметром 2,2 м.

Для создания карты (плана), например, масштаб плана 1:Мк...1:5000, аэрофотосъемка может быть выполнена в разных масштабах 1:Мс, в частности 1:10000; 1:15000; 1:20000. Выполним расчеты минимального размера объекта A , видимого на снимке, и размер распознаваемого объекта L круглой формы. Разрешающую способность снимка примем $R = 40 \text{ мм}^{-1}$. Расчеты будем выполнять по формуле (7). Значение коэффициента распознаваемого объекта круглой формы $B = 0,97$ возьмем из таблицы 2.

Сначала по формуле (8) рассчитаем разрешение аэрофотоснимка A , то есть минимальный размер объекта, который будет воспроизводиться при съемке. Значения сведем в таблицу 4.

Таблица 4

Расчет минимального размера объекта, видимого на снимке

1:Мс	1:10000	1:15000	1:20000
$A = \frac{M_c}{2R}$ (8), мм	125	187,5	250

Как отмечалось в [3], для обеспечения качественного дешифрирования считается удовлетворительным результат распознавания объекта около 0,75. Поэтому рассчитаем геометрический размер дешифрируемого камерально объекта L с вероятностью 75 %. Для этого воспользуемся формулой (7) нахождения вероятности P :

$$P = \exp \left[- \left(B \frac{A}{L} \right)^2 \right] = e^{-\left(\frac{BA}{L} \right)^2} = 0,75. \quad (9)$$

Как видим, на основании формулы (9) вероятность 0,75 будет при $\left(B \frac{A}{L} \right)^2 = 0,28$,

откуда

$$\frac{BA}{L} = \sqrt{0,28} = 0,53,$$

тогда

$$L = \frac{BA}{0,53}. \quad (10)$$

Рекомендуемой нами формулой (10) легче пользоваться при расчетах, чем подбирать вероятность 0,75 под размер дешифрируемого объекта L . Значение L в этом случае легко вычислить по формуле (10), подставив коэффициент $B = 0,97$:

$$L = \frac{BA}{0,53} = \frac{0,97A}{0,53} = 1,8302A. \quad (11)$$

Результаты расчетов размера распознаваемого объекта по формуле (11) приведем в таблице 5.

Таблица 5

Расчет размера распознаваемого объекта

1:Мс	1:10000	1:15000	1:20000
L , мм	228,8	343,2	457,6

Таким образом, мы сможем отдешифровать камерально все объекты круглой формы, размер которых будет больше значений, приведенных в таблице 5.

Из таблицы 5 видно, что размеры распознаваемых объектов растут пропорционально знаменателю масштаба съемки, то есть наблюдается линейная зависимость. Также пропорционально масштабу растут и размеры объектов, которые увидим на снимке (см. табл. 4).

Из этого можно сделать вывод, что для других масштабов будет легко получить как размер объекта, отобразившегося на снимке A , так и размер распознаваемого объекта L по снимкам разных мас-

штабов. Приняв, например, масштаб аэросъемки 1:10000 за исходный 1: $M_{исх}$, для принятого масштаба аэросъемки 1: $M_{прин}$ (например, 1:5000) найдем отношение $\frac{M_{Сприн}}{M_{Сисх}}$.

Умножив размер дешифрируемого с вероятностью 0,75 объекта для масштаба аэросъемки 1:10000 на полученное отношение, получим размер дешифрируемого объекта на снимках масштаба 1:5000.

$$L_{прин} = \frac{M_{Сприн}}{M_{Сисх}} L_{исх} = \frac{5000}{10000} 228,8 \text{ мм} = 114,4 \text{ мм}. \quad (12)$$

Расчеты по формуле (7) подтвердили полученный результат.

Для вывода формулы расчета разрешения при сканировании для обеспечения дешифрирования с вероятностью 0,75 на основании формулы (8) определим, какая разрешающая способность будет достаточна, чтобы увидеть объект:

$$R = \frac{M_C}{2A}, \quad (13)$$

где M_C – знаменатель масштаба снимка; A – минимальный размер объекта, который увидим на снимке.

На основании формулы (11) найдем значение A

$$A = \frac{L}{1,8302}, \quad (14)$$

где L – размер дешифрируемого объекта с вероятностью 0,75.

Из формулы (14) подставим величину A в формулу (13):

$$R = 1,8302 \frac{M_C}{2A}. \quad (15)$$

Подставив значение R из формулы (15) в формулу (5), получим формулу расчета разрешения при сканировании в зависимости от масштаба снимка 1: M_C и размера распознаваемого объекта L с вероятностью 0,75. Для отличия введем новое обозначение P_D , которое назовем «разрешение при сканировании для обеспечения качественного дешифрирования»:

$$P_D = \frac{2L \cdot 0,5}{1,8302 M_C} = \frac{L}{1,8302 M_C}. \quad (16)$$

Формула (16) учитывает масштаб снимка и размер распознаваемого круглого объекта L с вероятностью 75 %.

В соответствии с данной формулой рассчитаем разрешение при сканировании для обеспечения качественного дешифрирования для создания карт (планов) масштабов 1: M_k ...1:2000 и 1:10000 и разных масштабов фотографирования 1: M_C . Размеры распознаваемых объектов с вероятностью 0,75 возьмем из таблицы 5. Результаты расчетов приведем в таблицах 6 и 7.

Таблица 6

Расчет разрешения при сканировании для масштаба создаваемого плана 1:2000

M_C	5 000	10 000	15 000	20 000
$\frac{M_C}{M_k}$	2,5	5	7,5	10
P_R , мкм	12,5			
P_D , мкм	21,8	10,9	7,2	5,5
$R = \frac{1}{2P_D}$, мм ⁻¹	22,9	45,8	69,4	90,9

Таблица 7

Расчет разрешения при сканировании для масштаба создаваемого плана (карты) 1:10000

M_C	15000	20000	25000	30000
$\frac{M_C}{M_k}$	1,5	2	2,5	3
P_R , мкм	12,5			
P_D , мкм	80,0	60,0	48,0	40,0
$R = \frac{1}{2P_D}$, мм ⁻¹	6,2	8,3	10,4	12,4

Примечание. В таблицах 6 и 7 R – требуемая разрешающая способность снимка для обеспечения дешифрирования с вероятностью 0,75.

Анализируя таблицы 6 и 7, можно отметить, что с уменьшением масштаба фотографирования по отношению к масштабу создаваемого или обновляемого плана (карты) уменьшается размер пикселя при сканировании снимка. Для большинства масштабов создаваемых или обновляемых карт (планов) разрешение при сканировании для обеспечения дешифрирования с вероятностью 0,75 значительно превышает рекомендуемую величину, составляющую в 12,5 мкм, которая обеспечит разрешающую способность снимка $R = 40$ мм⁻¹. Для качественного дешифрирования достаточно иметь разрешающую способность изображения $R = 5 \dots 20$ мм⁻¹. Проблемы возникнут при крупномасштабном картографировании (см. табл. 6).

Как видим, разрешение при сканировании может составить 5,5 мкм (см. табл. 6). Если P_D окажется меньше значения P_R , вычисленного по формуле (5), то отдешифрировать такие объекты не удастся даже по оригинальным снимкам. Если разрешающая способность будет очень низкая, о качественном дешифрировании не может быть и речи. Если мелкие объекты отдешифрировать сложно, как в случае масштаба плана 1:2000 (см. табл. 6), то такие объекты придется дешифрировать в поле либо повышать качество изображения путем увеличения разрешающей способности, или выполнять аэрофотосъемку в более крупном масштабе.

Произведем полный расчет разрешений при сканировании для создания карт (планов) разных масштабов и с разной высотой сечения рельефа для аэрофотоснимков, полученных аэрофотоаппаратом (АФА) с форматом кадра 23×23см, фокусным расстоянием 153 мм и разрешающей способностью $R = 40$ мм⁻¹ по формулам (1)...(3) и (16). Результаты приведем в таблицах 8 и 9.

Таблица 8

Расчет разрешения при сканировании для создания плана масштаба 1:2000 с высотой сечения рельефа $h = 0,5$ м

M_C	5000	10000	15000	20000
P_S , мкм	40	20	13,3	10
P_Z , мкм	16,6	8,3	5,5	4,6
P_P , мкм	28	14	9,3	7
P_D , мкм	21,8	10,9	7,2	5,5

Таблица 9

Расчет разрешения при сканировании для создания карты (плана) масштаба 1:10 000 с высотой сечения рельефа $h = 1$

M_C	15000	20000	25000	30000
P_S , мкм	66,6	50	40	33,3
P_Z , мкм	11,1	8,3	6,6	5,5
P_P , мкм	46,6	35	28	33,3
P_D , мкм	80	60	48	40

Анализируя таблицы 8 и 9, можно сделать следующие **выводы**:

1) при создании плана масштаба 1:2000 необходимо выполнять аэрофотосъемку при соотношении масштабов $A = \frac{M_c}{M_k} < 5$. В противном случае при дешифрировании мелких объектов возникнут

сложности. Кроме того, при соотношении масштабов $A = \frac{M_c}{M_k} > 5$ необходимо будет сканировать снимки с малым размером пикселя и по другим параметрам, рассматриваемым в таблицах 8 и 9, что приведет к значительному увеличению объема информации, времени и стоимости выполняемых работ;

2) как рекомендует Инструкция [1], снимки необходимо сканировать с наименьшим размером пикселя из рассчитанных величин. Самый малый размер пикселя необходим для обеспечения точности определения высот, что видно из таблиц 8 и 9. Следовательно, дешифрирование будет выполнено с вероятностью более 75 %;

3) в случае расчета разрешения при сканировании для обеспечения разрешающей способности снимка P_R , как рекомендует Инструкция [1], сканировать снимки пришлось бы с разрешающей способностью $P_R = 10$ мкм независимо от масштабов фотографирования и масштабов создаваемых карт (планов), а это в большинстве случаев значительно снизит производительность труда и повысит цену продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. – Минск: УП «БелНИЦЗЕМ», 2003. – 78 с.
2. Михеева, А.А. Анализ расчета элемента геометрического разрешения при сканировании снимков для обеспечения разрешающей способности графических фотопланов и для обеспечения разрешающей способности снимка / А.А. Михеева // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 122–125.
3. Живичин, А.Н. Дешифрирование фотографических изображений / А.Н. Живичин, В.С. Соколов. – М.: Недра, 1980. – 253 с.
4. Щербаков, Я.Е. Расчет и конструирование аэрофотоаппаратов / Я.Е. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
5. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000; 1:2000; 1:1000; 1:500. – М.: Недра, 1989. – 286 с.
6. Руководство по картографическим и картоиздательским работам / В.А. Бабичев [и др.]. – М.: Ред.-издат. отдел ВТС, 1978. – 111 с.

Поступила 16.02.2015

RESOLUTION CALCULATION DURING SCANNING FOR HIGH-GRADE INTERPRETATION OF IMAGES

A. MIHEEVA, A. ILUSHENKO

Image scanning is an important stage of the ground map creation with the use of digital photogrammetric systems. Before image scanning the instruction recommends to make a calculation of optimal element of geometrical expansion on the basis of required horizontal-position accuracy and sport height of photogrammetric models, on the transmission of the definition of an original picture, on the definition of photographic plan. We supposed, that in the instruction it is necessary to ask to calculate the image resolution during scanning for high-grade interpretation of images. This article provides methods of resolution calculation during scanning for interpretation of images with a probability of 75 %.

УДК 528.48

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАШЕН СВЯЗИ

*канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ; А.А. ШАБЛОВА
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается возможность более качественного и эффективного отслеживания кренов сооружений башенного типа на основе современных измерительных и вычислительных средств. Описан метод определения крена антенных башен радиорелейной и сотовой связи, основанный на использовании электронного тахеометра и применении полученных данных для анализа геометрических параметров инженерного сооружения. Показано преимущество использования современных электронных тахеометров для решения подобных задач. Даются рекомендации по рациональному использованию предложенных методик.

Введение. Башни связи представляют собой специализированные трех- и четырехгранные конструкции из металла, на которых размещается различное оборудование и антенно-фидерные устройства для организации различных видов связи и вещания. В башенных сооружениях, обладающих повышенной чувствительностью к деформациям грунтов основания, крен является одним из важных показателей общей деформации сооружения. К возникновению крена могут привести такие факторы, как изменение гидрогеологии несущих грунтов, тектонические и техногенные процессы и другие.

Для сооружений башенного типа крен – это отклонение вертикальной оси сооружения от отвесной линии. Существенное влияние на величину и направление крена оказывают ветровые нагрузки и односторонний солнечный нагрев, в результате чего верх сооружения совершает амплитудно-частотные колебания [1]. Определение крена башен связи производится в основном геодезическими методами. Для осуществления этих работ можно использовать как обыкновенные оптические приборы, так и электронные тахеометры. Для определения крена башенных сооружений применяют следующие методы [2]: горизонтальных углов и направлений; вертикальных углов и зенитных расстояний; вертикального проектирования; координат; нивелирования осадочных марок.

Применение того или иного метода измерения крена зависит от требуемой точности измерения, конструктивных особенностей фундамента, типа сооружения, его высоты, возможности применения и экономической целесообразности метода в данных условиях.

Производство измерений. Методика измерения крена традиционными геодезическими приборами основана в основном на способе проектирования и способе горизонтальных направлений. Для электронных тахеометров эти методы также применимы, однако в современных тахеометрах появляются новые возможности, основанные на автоматизации линейно-угловых измерений и вычислений.

Башни связи представляют собой решетчатые башни, в основном бывают треугольной (трехгранные) и четырехугольной (четырёхгранные) формы. Рассмотрим методику определения крена башен связи треугольной формы (рис. 1) с применением электронного тахеометра.



Рис. 1. Металлическая башня связи треугольного сечения

При проектировании башенных сооружений практически всегда в сечении находится правильная фигура. Фактически, например, из-за неточности изготовления конструкций, деформаций и других факторов мы будем иметь в сечении неправильную фигуру. Так как все расчеты на прочность, устойчивость и воздействие нагрузок всегда относят к оси, проходящей через центры тяжести фигур, полученных в сечениях на различных уровнях, то и все расчеты по определению крена и деформаций ствола башен связи будем относить к этой оси. Тогда для определения координат центра сечения необходимо знать координаты его вершин [3].

В нашем случае за центр тяжести плоской однородной фигуры примем центр треугольника, который получается в точке пересечения его медиан.

Из элементарной геометрии известно, что координаты центра тяжести треугольника равны среднему арифметическому координат его вершин.

Таким образом, координаты центра тяжести треугольника находятся по формулам:

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}; \quad y_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}. \quad (1)$$

В случае если несущие элементы башни имеют в сечении окружность (рис. 2, а), для определения координат вершин треугольного сечения предлагаем следующую методику наблюдений:

- приведем тахеометр в рабочее положение, визируем и берем отсчеты по горизонтальному кругу на левую и правую образующие стойки башни в выбранном сечении;
- вычисляем среднее значение, которое устанавливаем на дисплее наводящим винтом горизонтального круга тахеометра;
- измеряем расстояние до точки O' и, прибавив к нему радиус трубы, определяем координаты центра трубы O (рис. 2, б).

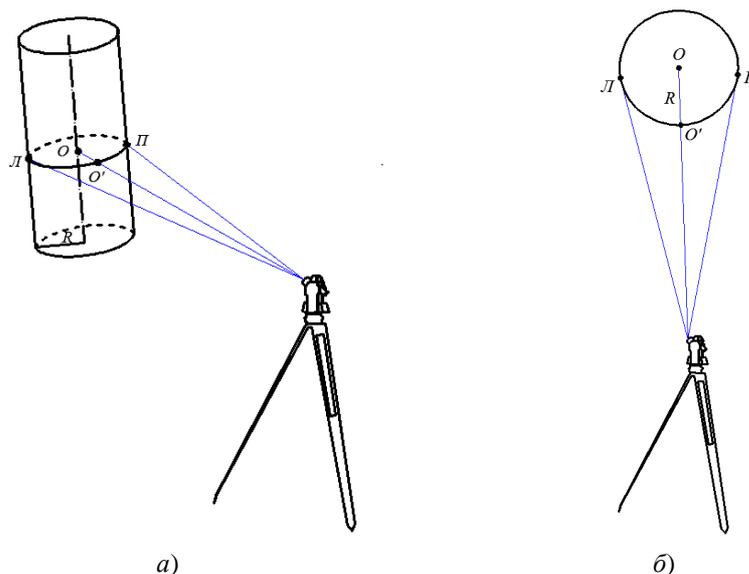


Рис. 2. Схема наблюдения поясов металлической башни

В большинстве тахеометров есть функция «измерение со смещением», используемая для определения местоположения точки, на которой невозможно установить отражатель, либо для определения расстояния и угла на точку, на которую нельзя непосредственно навестись. Положение измеряемой точки (в нашем случае – центра сечения) можно определить, введя горизонтальное проложение между измеряемой и смещенной точками (радиус сечения трубы). После выполнения этих процедур тахеометр будет вычислять и записывать в память координаты центра сечения трубы.

Следует отметить, что для применения этого способа необходимо знать фактические радиусы стойки башни, от точности которых в значительной степени будет зависеть точность получаемых результатов. Фактические радиусы трубы могут быть вычислены путем непосредственных измерений длины окружности трубы на основании общеизвестной формулы:

$$P = 2\pi R.$$

Степень соблюдения вертикальности башенного сооружения определяется положением в пространстве его главной оси. Только совместное определение крена и кривизны может дать полную и достоверную информацию о положении в пространстве главной оси сооружения. Для решения этой задачи необходимо, прежде всего, наряду с верхней и нижней точками наблюдать также и промежуточные точки главной оси.

Апробация предлагаемой методики наблюдений была выполнена на примере башни связи треугольной формы высотой 40 м (см. рис. 1), опорные элементы которой представляют собой металлические трубы. В качестве промежуточных были выбраны сечения на высотах 10, 20, и 30 метров (рис. 3).

Геодезический контроль отклонения от вертикали оси ствола башни выполнялся с использованием тахеометра Trimble M3. Наблюдения осуществлялись с двух станций (рис. 4).

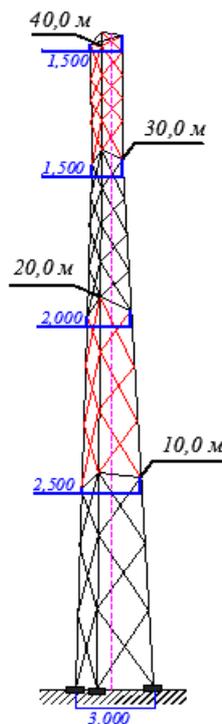


Рис. 3. Схема наблюдаемых сечений треугольной башни

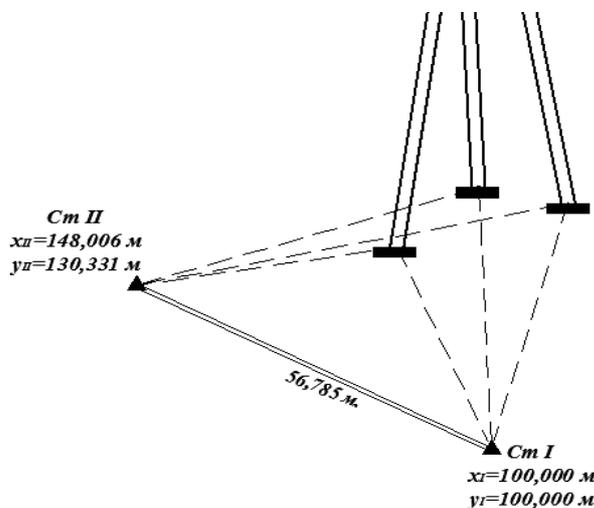


Рис. 4. Схема измерений при проведении работ по определению крена треугольной башни

Радиус стойки R определен путем измерения длины окружности трубы ($L = 53,1$ см):

$$R = L/2\pi = 84,5 \text{ мм.}$$

Контролем определения радиуса (диаметра) трубы может служить сравнение полученного значения со значением по ГОСТу или с проектным значением. Так как в данном случае пояса башни выполнены из труб равного радиуса, то на экране «Измерение со смещением» в поле «Режим» указывался постоянный режим («Пост»), то есть значение введенного нами смещения применялось для всех измерений. После завершения установок смещения выполнили измерения на все выбранные точки.

Обработка результатов измерений. В результате выполненных измерений были получены координаты вершин сечений башни, определённые с двух станций (табл. 1).

Разности координат одноименных точек B в таблице 1 вычислены по формулам (2) и (3):

$$d_x = x_I - x_{II}; \quad (2)$$

$$d_y = y_I - y_{II}. \quad (3)$$

Средняя квадратическая ошибка может быть вычислена по формуле Гаусса [4]:

$$m = \sqrt{\frac{[\theta_i^2]}{n}}, \quad (4)$$

где θ_i – истинные ошибки результатов измерений; n – число измерений.

Таблица 1

Координаты вершин треугольных сечений башни, полученных с двух станций

Номера точек	Координаты вершин, определенные с I станции (м)		Координаты вершин, определенные со II станции (м)		Разности, (м)	
	x_I	y_I	x_{II}	y_{II}	d_x	d_y
1	100,083	203,338	100,077	203,343	0,006	-0,005
2	102,921	202,398	102,924	202,396	-0,003	-0,002
3	102,289	205,36	102,287	205,366	0,002	-0,006
4	100,331	203,408	100,329	203,409	0,002	-0,001
5	102,691	202,599	102,695	202,605	-0,004	-0,006
6	102,275	205,061	102,281	205,065	-0,006	-0,004
7	100,61	203,443	100,605	203,449	0,005	-0,006
8	102,498	202,852	102,497	202,849	0,001	0,003
9	102,127	204,744	102,129	204,749	-0,002	-0,003
10	100,888	203,542	100,877	203,535	0,011	0,007
11	102,314	203,064	102,317	203,055	-0,003	0,009
12	102,009	204,533	102,01	204,532	-0,001	0,001
13	100,865	203,582	100,871	203,583	-0,006	-0,001
14	102,317	203,096	102,322	203,098	-0,005	-0,002
15	102,007	204,534	102,015	204,538	-0,008	-0,004

Однако истинные значения величин и истинные ошибки при ограниченном числе измерений обычно не известны, и в практике измерений получают вероятнейшие значения измеренных величин и вероятнейшие ошибки. В связи с этим, как правило, пользуются для получения средней квадратической ошибки формулой Бесселя:

$$m = \sqrt{\frac{[\delta_i^2]}{n-1}}, \quad (5)$$

где δ_i^2 – вероятнейшие ошибки результатов измерений.

Поэтому среднюю квадратическую ошибку разности координат можно вычислить по формуле

$$m_d = \sqrt{\frac{[d_i^2]}{n-1}}. \quad (6)$$

Тогда среднюю квадратическую ошибку определения координаты m_x или m_y , вычислим из выражения

$$m = \frac{m_d}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{[d_i^2]}{2(n-1)}}. \quad (7)$$

Получаем, что средние квадратические ошибки разностей координат

$$m_{dx} = \sqrt{\frac{[d_{x_i}^2]}{14}} = 5,0 \text{ мм}; \quad m_{dy} = \sqrt{\frac{[d_{y_i}^2]}{14}} = 4,8 \text{ мм}.$$

Средняя квадратическая ошибка определения координат m_x и m_y составила:

$$m_x = \sqrt{\frac{m_d}{\sqrt{2}}} = 3,6 \text{ мм}; \quad m_y = \sqrt{\frac{m_d}{\sqrt{2}}} = 3,4 \text{ мм}.$$

По приведенным выше формулам также возможно выполнить оценку точности для данной задачи путем сравнения длин сторон треугольников, полученных с разных станций, а именно:

$$\delta_i = S_i - S_{in}, \quad (8)$$

где

$$S_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}.$$

В таблице 2 приведены результаты вычислений длин сторон треугольников и их разностей.

Таблица 2

Вычисление длин сторон треугольников и их разностей

№ станции	Параметр, м	1 сечение	2 сечение	3 сечение	4 сечение	5 сечение
I	S_{12}	2,990	2,495	1,978	1,504	1,531
	S_{13}	2,992	2,552	1,998	1,496	1,487
	S_{23}	3,029	2,497	1,928	1,500	1,471
II	S_{12}	3,000	2,499	1,985	1,518	1,530
	S_{13}	2,996	2,560	2,003	1,509	1,490
	S_{23}	3,038	2,495	1,935	1,509	1,472
	δ_{12}	-0,010	-0,004	-0,007	-0,014	0,001
	δ_{13}	-0,004	-0,008	-0,005	-0,013	-0,003
	δ_{23}	-0,009	0,002	-0,007	-0,009	-0,001

По разностям длин сторон треугольников было получено:

$$m_d = \sqrt{\frac{[\delta^2]}{2(n-1)}} = 5,5 \text{ мм.}$$

Так как проект башни предусматривал в сечении треугольники, то по полученным значениям длин сторон треугольников возможно оценить качество изготовления секций башни и точность их монтажа.

Окончательные значения координат центров сечений башни связи определим как среднее арифметическое с двух станций (табл. 3).

Таблица 3

Нахождение прямоугольных координат точек главной оси башни

Номер сечения	Координаты центров (м)				Координаты центров сечений	
	с I станции		со II станции			
	X	Y	X	Y	X (м)	Y (м)
1 (низ)	101,764	203,699	101,763	203,702	101,764	203,701
2	101,766	203,689	101,768	203,693	101,767	203,691
3	101,745	203,680	101,744	203,682	101,745	203,681
4	101,737	203,713	101,735	203,707	101,736	203,710
5 (верх)	101,730	203,737	101,736	203,740	101,733	203,739

По координатам точек главной оси путем решения обратных геодезических задач определим величину крена K и его направление.

Определим отклонения q_x и q_y и центра O_i каждого сечения от вертикали (табл. 4) соответственно по осям x и y ; вычислим величину общих кренов K_i . Отклонение оси ствола башни в плане относительно проектной оси допускается не более 0,001 высоты контролируемого сечения над фундаментом [5].

Таблица 4

Определение отклонений и крена башни связи

Номер уровня	H (м)	Координаты центров (м)		q_x , мм	q_y , мм	Q , мм	Допустимое значение, (0,001 H) мм
		X	Y				
1		101,764	203,701	0	0	0	± 0
2	10	101,767	203,691	+4	-10	11	± 10
3	20	101,745	203,681	-19	-20	28	± 20
4	30	101,736	203,710	-28	+9	29	± 30
5	40	101,733	203,739	-30	+38	48	± 40

По полученным результатам определений отклонений оси ствола от вертикали (см. табл. 4) для наглядности составляются исполнительные схемы вертикальности оси ствола башни (рис. 5).

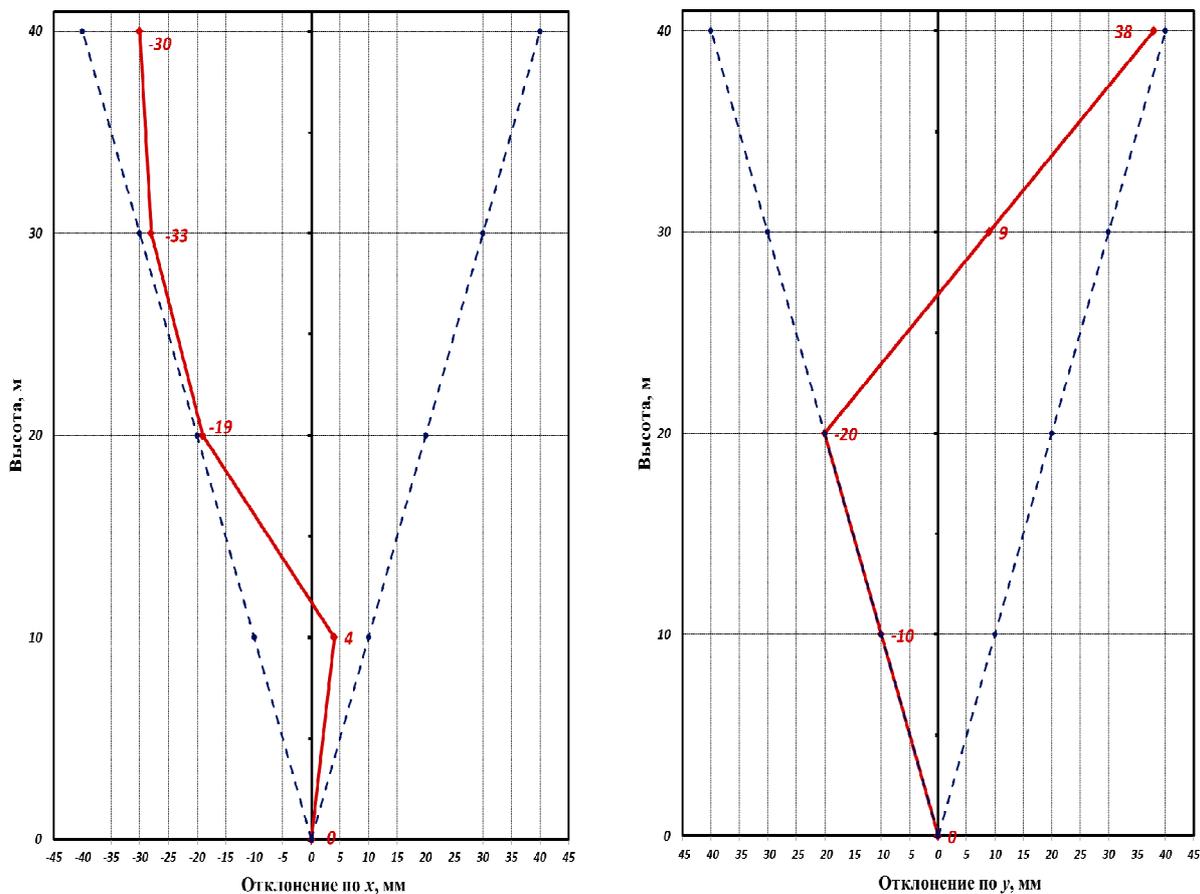


Рис. 5. Схема отклонений оси ствола треугольной башни от вертикали

По результатам геодезического контроля башни связи установлено, что значение общего крена рассматриваемой трёхгранной башни составляет 48 мм, что незначительно превышает предельно допустимое значение (± 40 мм) в соответствии с [5] и не препятствует нормальной эксплуатации данной башни.

Кроме определения крена башни связи, по полученной информации возможно произвести вычисление отклонений центров сечений ствола от прямой, то есть деформацию ствола башни.

Данная задача сводится к вычислению расстояния от точки до прямой в пространстве, которую можно решать разными способами.

Из аналитической геометрии известно, что длина перпендикуляра к прямой (расстояние, показанное на рисунке 6) может быть вычислено по формуле:

$$|M_1H_1| = \frac{|\vec{a} \times \overrightarrow{M_3M_1}|}{|\vec{a}|}, \quad (9)$$

где $\vec{a} = \overrightarrow{M_3M_2} = \{x_2 - x_3; y_2 - y_3; z_2 - z_3\}$ – направляющий вектор прямой (см. рис. 6), проходящей через две точки $M_3(x_3; y_3; z_3)$ и $M_2(x_2; y_2; z_2)$.

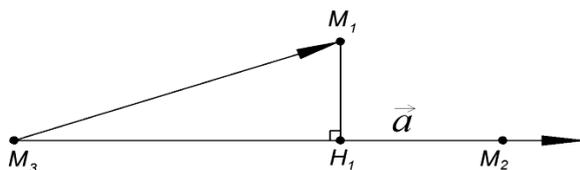


Рис. 6. Определение длины перпендикуляра

В таблице 5 приведены результаты вычислений отклонения оси ствола башни от прямой (изгиб ствола башни).

Таблица 5

Значение изгиба ствола башни

Номер уровня	Н (м)	Отклонение от прямой, мм	Допустимое значение, мм
1		0	40
2	10	22	
3	20	39	
4	30	20	
5	40	0	

Максимальный изгиб ствола башни (отклонение оси башни от прямой, соединяющей центры нижнего и верхнего сечений) составляет 39 мм, что не выходит за пределы допустимого значения, равного $0,001 H$ [5].

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- 1) предложенная методика позволяет определять крен с необходимой точностью в 0,0001 высоты башенного сооружения, то есть 4 мм для башни высотой 40 м;
- 2) по результатам измерений кроме значения крена можно вычислить по приведенным в данной работе формулам величину изгиба ствола сооружения, а также оценить точность изготовления и монтажа металлических конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интулов, И.П. Инженерная геодезия в строительном производстве: учеб. пособие для вузов / И.П. Интулов. – Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, 2004. – 329 с.
2. Шеховцов, Г.А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: моногр. / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2009. – 156 с.
3. Желтко, Ч.Н. Измерения геометрии высоких стальных трёхгранных сооружений / Ч.Н. Желтко // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – М., 2010. – № 6. – С. 13–19.
4. Лесных, Н.Б. Теория математической обработки геодезических измерений / Н.Б. Лесных. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 43 с.
5. Стальные конструкции. Правила монтажа = Стальныя канструкцыі. Правілы мантажу: ТКП 45-5.04-41-2006 (02250). – Введ. 01.07.07 (с отменой раздела 4 СНиП 3.03.01-87). – Минск: М-во архит. и стр-ва, 2007. – 40 с.

Поступила 23.03.2015

THE DETERMINATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF COMMUNICATION TOWERS

V. YALTYKHOV, A. SHABLOVA

The article touches upon the issue of more quality and efficient possibility of tower construction bank's tracking on the basis of modern measuring and computing resources. It is spoken about the method of the radio relay and mobile communication antenna tower bank's determination. This method is based on the use of tachymeter and applying analyzing the data obtained for the geometric parameters of the engineering structure. The advantage of using modern electronic transit instrument for solving such problems. In this article is given the recommendations on the rational use of the proposed methods.

УДК 528.21

АНАЛИЗ НОВЕЙШЕЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЗЕМЛИ EIGEN-6C4 ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОЛОЦКОМУ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМУ ПРОФИЛЮ

К.И. МАРКОВИЧ

(Полоцкий государственный университет)

Представлена оценка точности новейшей глобальной гравитационной модели Земли EIGEN-6C4 по разностям аномалий высот и приращениям ускорения силы тяжести, вычисленных для Полоцкого геодинимического профиля по инструментальным данным и данным модели. На основании полученных данных сделаны соответствующие выводы.

Модель гравитационного поля Земли EIGEN-6C4 является моделью Международного центра глобальных земных моделей (International Centre for Global Earth Models – ICGEM). На 2014 год EIGEN-6C4 – конечная итерация модельного подхода, результат разработки и анализа нескольких последовательно созданных гравитационных моделей EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat.

В результате вывода модели EIGEN-6C4 получен полный набор гармонических коэффициентов геопотенциала до 2190-й степени. Как следствие, точность модели зависит от погрешностей определения гармонических коэффициентов и от предельной степени учитываемых сферических гармоник. По набору гармонических коэффициентов геопотенциала модель гравитационного поля Земли EIGEN-6C4 превосходит такие модели, как EIGEN-6C3stat (1949), EIGEN-6C2 (1949), и сопоставима с моделью Национального агентства геопространственных исследований Министерства обороны США (National Geospatial-Intelligence Agency – NGA) EGM2008 (2190).

Модель EIGEN-6C4 включает в себя детальные гравитационные аномалии в разрешении 2×2 минуты и использует те же константы, связывающие референц-эллипсоид и нормальное гравитационное поле, что и модели EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 [1]:

$$a = 6378137.00 \text{ м (большая полуось эллипсоида WGS 84);}$$

$$a = 1/298.257223563 \text{ (сжатие эллипсоида WGS 84);}$$

$$GM = 3.986004418 \cdot 10^{14} \text{ м}^3\text{с}^{-2} \text{ (геоцентрическая гравитационная постоянная);}$$

$$\omega = 72291115 \cdot 10^{-11} \text{ рад/с (угловая скорость вращения Земли).}$$

Из ранее выполненных исследований [2; 3] установлено, что модель Министерства обороны США EGM2008, а также модели EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat не уступают по точности друг другу.

В данном случае практический интерес представляет оценка точности новейшей глобальной гравитационной модели Земли EIGEN-6C4 с моделями EGM2008, EIGEN-6C2 и EIGEN-6C3stat.

Выполненный нами анализ состоит из следующих этапов:

1) оценка моделей EIGEN-6C4, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 по разностям аномалий высот, вычисленных для Полоцкого геодинимического профиля по результатам высокоточного геометрического и спутникового нивелирования и выбранных из моделей;

2) оценка моделей EIGEN-6C4, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 по приращениям ускорений силы тяжести для Полоцкого геодинимического профиля по результатам инструментальных гравиметрических измерений и данным моделей.

Для выполнения **первого этапа анализа** было отобрано 9 геодезических пунктов Полоцкого геодинимического профиля, геодезические координаты и эллипсоидальные высоты которых определены из спутниковых измерений. Ортометрические высоты этих пунктов известны из геометрического нивелирования I класса.

В результате выполнена оценка точности глобальной гравитационной модели EIGEN-6C4 в сравнении с моделями EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 для Полоцкого профиля путем сравнения аномалий высот реперов, полученных с помощью гравитационных моделей, и аномалий высот, полученных как разность геодезических и ортометрических высот.

Аномалии высот в определяемых пунктах по всем моделям получены на основании данных Calculation Service сайта Международного центра глобальных земных моделей (International Centre for Global Earth Models – ICGEM) [1].

Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям, представлены в таблице 1.

Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям, а также по результатам GNSS-измерений и высокоточного геометрического нивелирования, выполненного в меридиональном направлении, относительно пункта № 59, принятого за стабильный, представлены в таблице 2 [4].

Таблица 1

Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям

№ пункта	ζ EGM2008	ζ EIGEN 6C2	EIGEN-6C3stat	EIGEN-6C4
59	20.613	20.639	20.630	20.654
7130	20.586	20.612	20.602	20.627
8372	20.570	20.595	20.586	20.610
7701	20.532	20.556	20.498	20.523
7873	20.523	20.547	20.537	20.563
3895	20.522	20.546	20.537	20.562
6931	20.516	20.540	20.531	20.556
7100	20.483	20.507	20.498	20.523
3902	20.459	20.483	20.475	20.499
5960	20.432	20.456	20.448	20.471

Таблица 2

Значения аномалий высот относительно пункта № 59

Названия пунктов	59	7130	8372	7701	7873	3895	6931	7100	3902	5960
EGM2008, м	0	-0.027	-0.043	-0.081	-0.09	-0.091	-0.097	-0.13	-0.154	-0.181
EIGEN 6C2, м	0	-0.027	-0.044	-0.083	-0.092	-0.093	-0.099	-0.132	-0.156	-0.183
EIGEN-6C3stat, м	0	-0.028	-0.044	-0.084	-0.093	-0.093	-0.099	-0.132	-0.155	-0.182
EIGEN-6C4, м	0	-0.027	-0.044	-0.082	-0.091	-0.092	-0.098	-0.131	-0.155	-0.183
GPS-нивелирование, м	0	-0.032	-0.052	-0.085	-0.098	-0.104	-0.106	-0.134	-0.151	-0.197

Для данных пунктов проведена статистическая обработка разностей значений аномалий высот, полученных из моделей EIGEN-6C4, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008, и разностей геодезических и ортометрических высот (геодезические высоты относительно эллипсоида WGS-84). Результаты обработки представлены в таблице 3.

Таблица 3

Статистическая обработка разностей значений аномалий высот

Погрешности	Модель EGM2008 в сравнении с GPS-измерениями и геометрическим нивелированием	Модель EIGEN-6C2 в сравнении с GPS-измерениями и геометрическим нивелированием	Модель EIGEN-6C3stat в сравнении с GPS-измерениями и геометрическим нивелированием	Модель EIGEN-6C4 в сравнении с GPS-измерениями и геометрическим нивелированием
$[\Delta]/n$, м	0.007	0.005	0.005	0.006
+ Δ , max, м	0.016	0.014	0.015	0.014
- Δ , max, м	-0.003	-0.005	-0.004	-0.004
СКП, м	0.009	0.008	0.008	0.008

По данным статистического анализа можно отметить, что закон распределения разностей аномалий высот близок к нормальному.

Систематическое смещение моделей относительно результатов GNSS-измерений и геометрического нивелирования составляет: 0,6 см для модели EIGEN-6C4; 0,5 см для модели EIGEN-6C2; 0,5 см для модели EIGEN-6C3stat; 0,7 см для модели EGM2008.

На рисунке графически отображены аномалии высот относительно пункта 59.

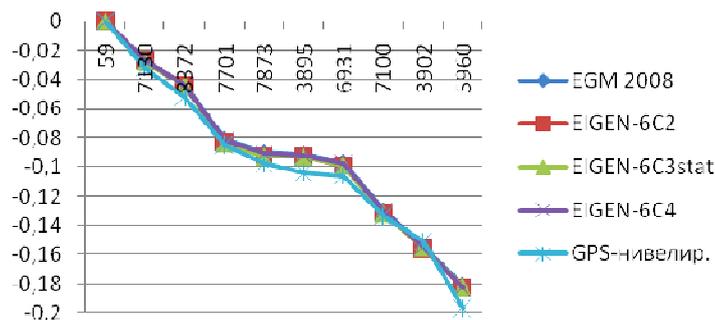


График аномалий высот относительно пункта 59

Второй этап анализа, представляющий сравнение приращений ускорения силы тяжести, полученных на основании данных гравитационных моделей и инструментальных гравиметрических данных, представлен ниже. Для определения приращений по гравитационным моделям использовались данные Calculation Service сайта Международного центра глобальных земных моделей (ICGEM). В таблице 4 приведены значения ускорения силы тяжести для пунктов профиля, полученные по моделям.

Таблица 4

Значения ускорения силы тяжести для пунктов профиля, полученные по моделям

№ пункта	EGM2008, мГл	EIGEN-6C2, мГл	EIGEN-6C3stat, мГл	EIGEN-6C4, мГл
59	981507.046	981507.461	981507.331	981508.007
7130	981507.009	981507.303	981507.180	981507.967
8372	981506.736	981506.970	981506.852	981507.693
7701	981503.709	981503.773	981503.665	981504.661
7873	981503.898	981503.969	981503.864	981504.848
3895	981504.467	981504.585	981504.482	981505.417
6931	981504.782	981504.911	981504.810	981505.732
7100	981506.596	981506.803	981506.713	981507.541
3902	981507.625	981508.080	981508.000	981508.568
5960	981508.037	981508.542	981508.471	981508.973

В качестве инструментальных гравиметрических данных были взяты гравиметрические измерения на Полоцком профиле, выполненные «Институтом геохимии и геофизики НАН Беларуси» (месяц/год: 8/2009) [данные Г.И. Каратаева, О.В. Мясникова (Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси)]. Приращения ускорения силы тяжести между пунктами Полоцкого профиля, полученные по инструментальным гравиметрическим данным и данным глобальных гравитационных моделей Земли, представлены в таблице 5.

Таблица 5

Приращения ускорения силы тяжести между пунктами Полоцкого профиля

№ пункта	Инструментальные данные, мГл	EGM2008, мГл	EIGEN-6C2, мГл	EIGEN-6C3stat, мГл	EIGEN-6C4, мГл
59	0	0	0	0	0
7130	-2.685	-0.037	-0.158	-0.151	-0.040
8372	-0.389	-0.309	-0.491	-0.479	-0.314
7701	-1.828	-3.336	-3.688	-3.667	-3.346
7873	-0.966	-3.148	-3.492	-3.467	-3.158
3895	0.686	-2.579	-2.876	-2.849	-2.589
6931	0.673	-2.264	-2.550	-2.521	-2.275
7100	2,041	-0.450	-0.658	-0.618	-0.465
3902	0.472	0.580	0.619	0.669	0.561
5960	-3.873	0.991	1.081	1.139	0.966

Отклонения модельных приращений ускорения силы тяжести от приращений, полученных по инструментальным гравиметрическим данным, представлены в таблице 6.

Таблица 6

Отклонения модельных приращений ускорения силы тяжести от инструментальных

№ пункта	Инструментальные данные EGM-2008, мГл	Инструментальные данные EIGEN-6C2, мГл	Инструментальные данные EIGEN-6C3stat, мГл	Инструментальные данные EIGEN-6C4, мГл
59	0	0	0	0
7130	2.648	2.527	2.534	2.645
8372	0.08	-0.102	-0.09	0.075
7701	-1.508	-1.86	-1.839	-1.518
7873	-2.182	-2.526	-2.501	-2.192
3895	-3.265	-3.562	-3.535	-3.275
6931	-2.937	-3.223	-3.194	-2.948
7100	-2,491	-2.699	-2.659	-2.506
3902	0.108	0.147	0.197	0.089
5960	4.864	4.954	5.012	4.839

Для данных пунктов (см. табл. 6) проведена статистическая обработка разностей приращений ускорения силы тяжести, полученных из моделей EIGEN-6C4, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 и по инструментальным гравиметрическим данным. Результаты обработки представлены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты статистической обработки разностей приращений ускорения силы тяжести

Погрешности	EGM2008	EIGEN-6C2	EIGEN-6C3stat	EIGEN-6C4
[Δ]/n, мГл	-0.243	-0.705	-0.675	-0.532
+Δ, max, мГл	4.864	4.954	5.012	4.839
-Δ, max, мГл	-3.265	-3.562	-3.535	-3.275
Число + разности	4	3	3	4
Число - разности	5	6	6	5
СКП, мГл	2.650	2.812	2.808	2.650

По данным статистического анализа можно отметить, что систематическое смещение моделей относительно результатов инструментальных гравиметрических измерений составляет: 0,532 мГл для модели EIGEN-6C4; 0,705 мГл для модели EIGEN-6C2; 0,675 мГл для модели EIGEN-6C3stat; 0,243 мГл для модели EGM2008.

На основании полученных данных можно сделать следующие **выводы**:

- согласно данным аномалий высот, полученным как с помощью гравитационных моделей, так и с помощью сочетания GNSS-измерений и геометрического нивелирования, можно утверждать, что корректное использование данных гравитационных моделей дает неплохие по точности результаты, которые могут быть использованы и без привлечения других данных. Кроме того, модели EGM2008, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat не уступают по точности определения аномалий высоты новейшей гравитационной модели EIGEN-6C4. Модели дают практически одинаковые результаты и имеют хорошую сходимость с результатами, полученными на основе данных спутниковых измерений, и данных геометрического нивелирования;

- анализ разностей приращений ускорения силы тяжести на пунктах Полоцкого профиля показал сходимость по точности модели EIGEN-6C4 в сравнении с моделью EGM2008. Следует отметить, что все модели имеют плохую сходимость с инструментальными гравиметрическими данными (СКП 2.650-2.808 мГл), что накладывает значительные ограничения в использовании значений ускорения силы тяжести, полученных по данным моделям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Gravity Field Models // International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: [http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/International Centre for Global Earth Models \(ICGEM\)](http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/International%20Centre%20for%20Global%20Earth%20Models%20(ICGEM)).
2. Глобальная гравитационная модель EIGEN-6C2. Предварительный анализ // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – 2013. – Вып. 67. Строительство. – С. 172–176.
3. Оценка точности глобальной гравитационной модели EIGEN-6C2 в сравнении с моделью EGM2008 применительно к Полоцкому геодинамическому профилю // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – 2013. – Вып. 67. Строительство. – С. 168–171.
4. Недра Беларуси 13 за 2006–2010 гг. «Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований»: отчет о НИР ГПОФИ / Полоц. гос. ун-т; науч. рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2010. – ГБ-4026.

Поступила 11.03.2015

ANALYSIS OF THE LATEST GLOBAL GRAVITY MODEL OF THE EARTH EIGEN-6C4 ON GEODETIC AND GRAVIMETRIC DATA IN RELATION TO POLOTSK GEODYNAMIC PROFILE

K. MARKOVICH

The paper presents an assessment of the accuracy of the latest global gravity model of Earth EIGEN-6C4 anomalies from the difference of heights and increments of the acceleration of gravity calculated for Polotsk geodynamic profile on instrumental data and model data.

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Захаркина Г.И., Давидович А.С.</i> Бывший дом купца Муравьева в Гродно – памятник архитектуры XIX века	2
<i>Соловьёв А.А.</i> Архитектурно-исторические подземные сооружения: колодец Полоцкого иезуитского коллегия (середина XVIII – начало XX века)	7
<i>Орловская Е.Ю.</i> Типы жилых ячеек в специализированном жилище	17
<i>Книга Е.Н.</i> Учреждения дополнительного образования детей в архитектурно-градостроительной среде города (на примере города Минска)	22
<i>Мартысюк Н.А.</i> Особенности организации прибрежных городских территорий рек: опыт стран ближнего и дальнего зарубежья	28

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

<i>Жданов Д.А., Уласевич В.П., Зинкевич И.В.</i> Экспериментальные исследования фрагмента пологого арочного покрытия из тонколистового холодногнутого профиля типа МС-120 с поперечными гофрами	33
<i>Турищев Л.С.</i> К определению собственных частот свободных колебаний балок	40
<i>Надольский В.В., Мартынов Ю.С.</i> Вероятностное моделирование сопротивления стальных элементов	44
<i>Ноліцкі М., Марковіч А., Сько́ра М.</i> Target reliability levels in Eurocodes and ISO standards	50
<i>Дубатовка А.И.</i> Огневые испытания стеновых панелей с каркасом из тонкостенных холодноформованных профилей со сборной обшивкой из стекломгнезиевого листа	57
<i>Моради Сани Б.</i> Предварительная оценка несущей способности песчаных оснований одиночных свай по международным стандартам	62

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Давыденко Н.В., Бакатович А.А.</i> Повышение водостойкости жидкого стекла, применяемого в качестве вяжущего при производстве теплоизоляционных костросоломенных плит	71
<i>Tur V., Píkula A.</i> Experimental studies of ecologically-clean thermal insulation non-autoclave composites based on flax shive and different kinds of lime containing binders	76
<i>Калыска А.О., Бусел А.В.</i> Активация процессов твердения электросталеплавильных шлаков и блокирование ионов тяжелых металлов	83
<i>Халецкая К.В., Яловая Н.П., Яловая Ю.С.</i> Аммиак и его соединения в железобетонных изделиях: обзор аналитических методик и результаты потенциометрического и фотометрического определения	88
<i>Бозылев В.В., Лисовский А.Л., Язубкин А.Н.</i> Промышленное внедрение технологии колебательного уплотнения арболита ..	97
<i>Вавилов П.В., Кравченко С.Е.</i> Классификация и критерии эффективности применения добавок в эмульсионно-минеральных смесях	103
<i>Plauys M., Bakatovich A.</i> Features of the modified concrete strength in climatic conditions of the Middle East countries	109
<i>Пикула А.И.</i> Эффективные стеновые композитные материалы с повышенным уровнем экологичности	115
<i>Гречухин В.А.</i> Ремонтные бетоны с добавкой из вторичных продуктов производства минеральных масел	120

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Серенков П.С.</i> Анализ совместимости подходов оценивания точности результатов измерений	127
<i>Александров О.И., Свирский Д.Н., Жуковская Т.Е.</i> Энергосберегающая методика для выбора состава оборудования энергетических объектов	132
<i>Питолин В.Е.</i> Анализ современных методов расчета показателей топливоиспользования на теплоэлектроцентралях	140
<i>Ющенко В.Д., Галузо А.В., Куприяничик Т.С.</i> Анализ работы сооружений биологической очистки для удаления соединений азота из сточных вод	147
<i>Спириденко Л.М., Казмиркивская Т.С., Киселев Д.А., Гриневич А.А.</i> Анализ известных классификаций земель и грунтовых вод для разработки производственной классификации для минимизации последствий загрязнения грунтов нефтью	153
<i>Савенок В.Е., Ковалевская Н.А.</i> Оценка загрязнения почв в районе промышленного объекта	158

ГЕОДЕЗИЯ

<i>Дегтярев А.М., Ялтыхов В.В., Козакевич А.И.</i> Инженерно-геодезические измерения деформаций конструкций покрытия Летнего амфитеатра в городе Витебске при их эксплуатации	164
<i>Рак И.Е.</i> Исследование точности трансформирования растровых изображений	169
<i>Михеева А.А., Ильюшенко А.В.</i> Расчет разрешения при сканировании для обеспечения качественного дешифрирования снимка	176
<i>Ялтыхов В.В., Шаблова А.А.</i> Определение геометрических параметров башен связи	183
<i>Маркович К.И.</i> Анализ новейшей глобальной гравитационной модели Земли EIGEN-6C4 по геодезическим и гравиметрическим данным применительно к Полоцкому геодинамическому профилю	190