

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, geoecology 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.И. Мицкевич, В.К. Липский.  
Редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 27.12.2013. Бумага офсетная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 15,58. Уч.-изд. л. 18,78. Тираж 100 экз. Заказ 1859.

УДК 378.2

## ПОДГОТОВКА НАУЧНЫХ РАБОТНИКОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ В ПОЛОЦКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

*канд. техн. наук, доц. Е.Г. КРЕМНЕВА, канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматриваются вопросы подготовки научно-педагогических работников в Полоцком государственном университете. Показано, что в современных условиях отбор кандидатов для подготовки в аспирантуру ведется путем выявления среди студентов и магистрантов наиболее одаренных молодых людей, которые в будущем смогут пополнить ряды научных работников. При этом отмечается, что для успешной работы необходимо создание условий для подготовки научных работ в коллективах аспирант – научный руководитель, а также выпускник – заведующий кафедрой. Анализируются данные по приему и выпуску аспирантов и соискателей, результаты аттестаций в аспирантуре. Делается вывод, что для молодых исследователей в УО «ПГУ» имеются необходимые условия для плодотворной научной деятельности.*

Подготовка инженерно-педагогических работников в Полоцком регионе началась более четырех десятилетий назад. Задача по обеспечению квалифицированными работниками диктовалась потребностями предприятий строящегося нефтехимического комплекса и необходимостью обеспечения кадрами молодого политехнического института.

Из крупных научных и вузовских центров постсоветского пространства были приглашены известные ученые в области строительства: профессора А.М. Левин, С.И. Луговский, А.И. Семенов, а также научные работники с большим потенциалом: Д.Ф. Белый, В.Д. Гринев, А.Е. Дубровин, Г.К. Дымчук, Л.Ф. Калмыков, В.А. Майоров, Л.Н. Фомица и другие, благодаря которым заложены основы соответствующих кафедр и их научные направления. Ориентируя наиболее талантливых и способных выпускников тогда политехнического института на обучение в целевой аспирантуре, им удалось существенно повысить обеспеченность кафедр строительного факультета научными работниками высшей квалификации.

Дальнейшее развитие системы подготовки научных работников в Полоцком университете связано с открытием в 1989 году *аспирантуры*. Первоначально обучение велось по трем специальностям, две из которых относились к области строительства и архитектуры – «Строительные конструкции, здания и сооружения», «Теплогазоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение». В 1991 году в аспирантуре была открыта специальность «Технология и организация строительства»; 2011 году в области новых материалов и новых источников энергии – «Строительные материалы и изделия» [1].

В период с 1989 по 2013 год в аспирантуре по строительным специальностям прошли обучение 54 человека. Из них 21 успешно защитили кандидатские диссертации.

На сегодняшний день в аспирантуре университета проводится обучение по четырем строительным специальностям. Следует отметить, что аспирантуры таких ведущих организаций в области строительства, как ГП «Институт НИПТИС им. Атаева С.С.», РУП «Институт БелНИИС», также имеют специальности по данному профилю, соответственно 4 и 5 [2; 3].

В общем, в аспирантуре УО «ПГУ» 22 специальности, причем 73 % из них относятся к техническим наукам, наибольшее количество (25 %) составляют специальности строительного профиля (рис. 1).

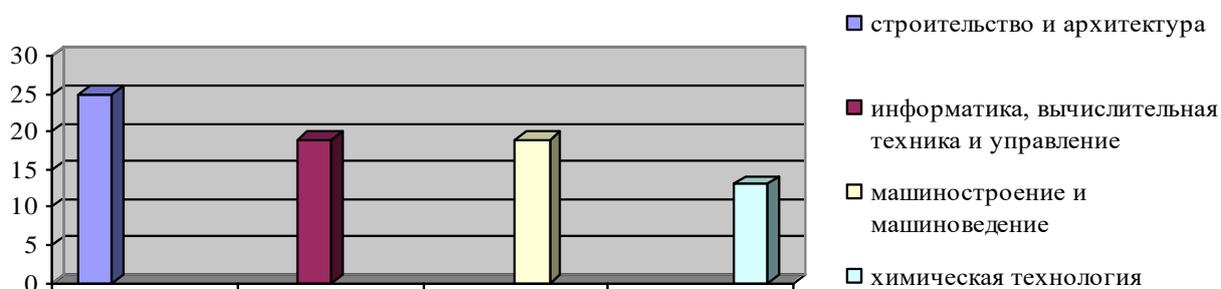


Рис. 1. Соотношение технических специальностей аспирантуры

В целом по Республике Беларусь более 20 % учреждений и организаций Министерства образования имеют аспирантуры по специальностям строительства и архитектуры.

На гистограмме (рис. 2) приведен сравнительный анализ количества специальностей архитектуры и строительства в общем объеме специальностей в шести вузах Министерства образования: Брестский государственный технический университет, Белорусский национальный технический университет, Белорусский государственный университет транспорта, Полоцкий государственный университет, Белорусско-российский университет, Белорусский государственный технологический университет [4 – 9].

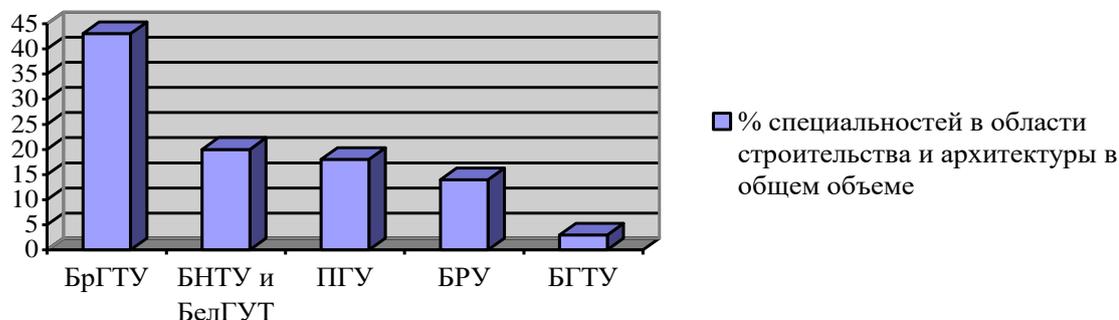


Рис. 2. Количество специальностей в области строительства и архитектуры в аспирантурах вузов Беларуси

В условиях интенсивного инновационного развития и жесткой конкурентной борьбы на первый план выдвигается задача по внедрению в строительную отрасль новых конструктивных элементов, материалов, технологий и оборудования. Эта задача может быть решена только при обеспечении строительства высококвалифицированными кадрами, в том числе и высшей квалификации, способными обеспечить интеграцию науки и производства.

Послевузовское образование в аспирантуре дает реальную возможность значительно повысить свой профессиональный уровень, реализовать свой инженерный и научный потенциал. Молодые специалисты все чаще рассматривают обучение в аспирантуре не только как возможность остаться на преподавательской работе в вузе, но и как способ существенно повысить свой рейтинг на рынке труда. В связи с этим повышаются требования не только к желающим обучаться в аспирантуре, но и к научным руководителям, научным школам, которые готовы и аккумулируют вокруг себя исследователей.

В области строительства в Полоцком государственном университете сформировалась *научная школа «Прочность и надежность железобетонных и каменных конструкций»*. Основоположник – профессор А.И. Семенов; научный руководитель школы (с 1992 г.) – профессор Д.Н. Лазовский.

Направление научных исследований – *зависимости технического состояния железобетонных конструкций от дефектов изготовления и повреждений, физико-механических и реологических характеристик материала, напряженно-деформированного состояния частей конструкций*.

Сотрудниками научной школы разработан метод расчета и программный комплекс, широко применяемый при проектировании в Республике Беларусь и за ее пределами, в частности при расчете строительных конструкций Национальной библиотеки Республики Беларусь. На основе деформационной модели и вероятностного подхода создан *программный комплекс R-Beta*, предназначенный для статистического моделирования железобетонных элементов.

Исследователи научной школы участвовали в разработке значимых проектов республики. Ими проводилось исследование напряженно-деформированного состояния конструкций структурного покрытия летнего амфитеатра г. Витебска, разрабатывалось решение по устройству неразрезной плиты ледового поля в культурно-спортивном комплексе «Минск-Арена» (г. Минск). Для этого же комплекса исследовалось напряженно-деформированное состояние конструкций покрытия конькобежного стадиона, рассчитывался стальной каркас большой и малой арены с учетом оценки на прогрессирующее обрушение культурно-развлекательного спортивного комплекса в жилом районе «Чижовка» (г. Минск) и многих других объектов. Накопленные знания по проектированию уникальных объектов помогают молодым ученым получить бесценный опыт от теории до практики и впоследствии, став педагогическими работниками, преподавать дисциплины строительного профиля на более высоком уровне, продолжая свои исследования в диссертационных работах, являясь аспирантами или соискателями.

В условиях современного состояния послевузовского образования, с учетом сложившихся традиций организационная работа по подготовке научных работников в университете проводится по нескольким направлениям:

- отбор возможных кандидатур в аспирантуру на стадии получения I и II ступени высшего образования, проведение профориентационной работы со студентами, проявившими склонность к научной работе;

- подбор научных руководителей, включая оценку их научной и научно-педагогической работы по различным критериям;
- организация постоянного мониторинга за ходом обучения на протяжении всего срока обучения и после окончания аспирантуры до защиты диссертации.

Отбор кандидатов для подготовки в аспирантуре на протяжении последних нескольких лет ведется путем выявления среди студентов наиболее одаренных, талантливых молодых людей, которые в будущем смогут пополнить состав научно-педагогических работников.

В вузе, как правило, студенты начинают заниматься научными исследованиями с первых курсов по образовательным предметам, которые им знакомы со школы, в основном это – физика, математика, история и другие. Углубленное изучение фундаментальных дисциплин позволяет студенту научиться осуществлять поиск информации, анализировать ее, ставить цели и задачи исследований. Как правило, изучение образовательных дисциплин заканчивается на третьем курсе, когда по учебному плану вводятся специализированные дисциплины. Это позволяет студентам более тесно познакомиться с ведущими учеными и детально изучить научно-исследовательскую деятельность специализированных кафедр.

В области строительства и архитектуры студенты могут заниматься научно-исследовательской деятельностью на трех факультетах и шести кафедрах. Именно с третьего по пятый курс проводятся предметные олимпиады и конкурсы по специальностям, студенческие научные конференции. Студентам, занимающимся научно-исследовательской деятельностью, предоставляется возможность опубликовать свои результаты в периодическом сборнике «Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета» и ежегодном сборнике материалов конференции «Junior researchers' conference» на английском языке. Результаты лучших научных работ в соавторстве с научным руководителем могут быть опубликованы в ежемесячном научно-теоретическом журнале «Вестник Полоцкого государственного университета».

В то же время анализ приема в аспирантуру Полоцкого государственного университета показывает, что не все поступающие в аспирантуру ранее занимались студенческой наукой на кафедрах и участвовали в республиканском конкурсе студенческих работ. С другой стороны, наиболее способные студенты, получившие призовые места в республиканском конкурсе научных работ, не изъявляют желания продолжить свою научную карьеру. К примеру, количество поступивших в аспирантуру и участвовавших ранее в республиканском конкурсе студенческих работ показано на рисунке 3.

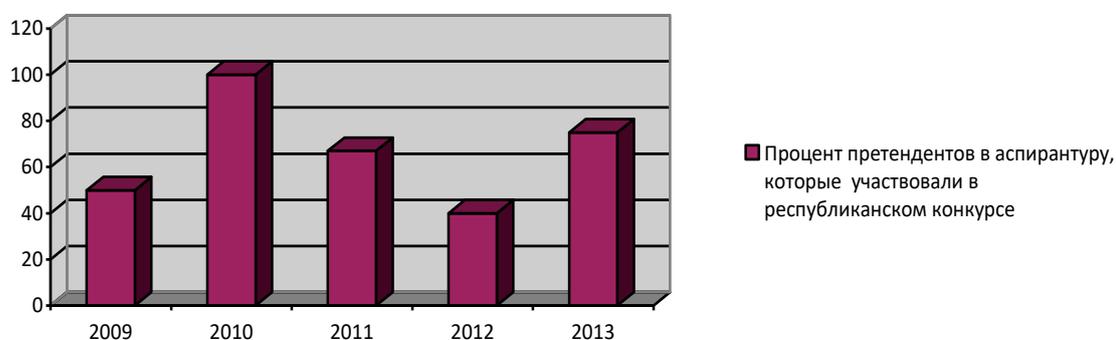


Рис. 3. Доля поступающих в аспирантуру и участвовавших в республиканском конкурсе научных работ

Научные работы студентов в большинстве случаев продолжают в исследованиях по программам магистратуры. **Магистратура** как вторая ступень высшего образования начала функционировать в Полоцком государственном университете с 1997 года по 7 техническим специальностям нефтехимического, машиностроительного и строительного направления. Подготовка магистров сегодня ведется по 21 специальности. Причем более 50 % специальностей магистратуры – это специальности технического профиля, из них область строительства и архитектуры составляет в среднем 15 %. Подготовка магистров осуществляется как для собственных нужд, так и по запросам других учреждений и предприятий Республики Беларусь. В частности, за последние три года в области строительства подготовка осуществлялась для УО «ГрГУ им. Янки Купалы», «Витебскгражданпроект», ОАО «Химремонт», ОАО «Нафтан» и других организаций.

Подготовка научных работников высшей квалификации в УО «ПГУ» проводится как для собственных нужд, так и для научно-образовательной, производственной, инновационной и административной сфер региона и Республики Беларусь в целом. Подготовка для собственных нужд университета осу-

ществляется на трех кафедрах: «Строительные конструкции», «Строительное производство», «Теплогазоснабжение и вентиляция», что связано в первую очередь с возросшей потребностью университета в квалифицированных научных работниках в связи с увеличением количества студентов [10]. Кроме того, осуществляется подготовка научных работников в области строительства для УО «ГрГУ им. Янки Купалы», УО «БРУ», ОАО «Химремонт», КУППСП «Полоцксельстрой» и других.

Численность обучающихся в аспирантуре на протяжении последних пяти лет значительно возросла. Причем доля аспирантов дневной формы получения образования составила около 70 % всех обучающихся. Количество обучающихся аспирантов и соискателей по строительным специальностям с 2009 по 2013 год в среднем возросло на 60 %, о чем свидетельствуют данные рисунка 4.

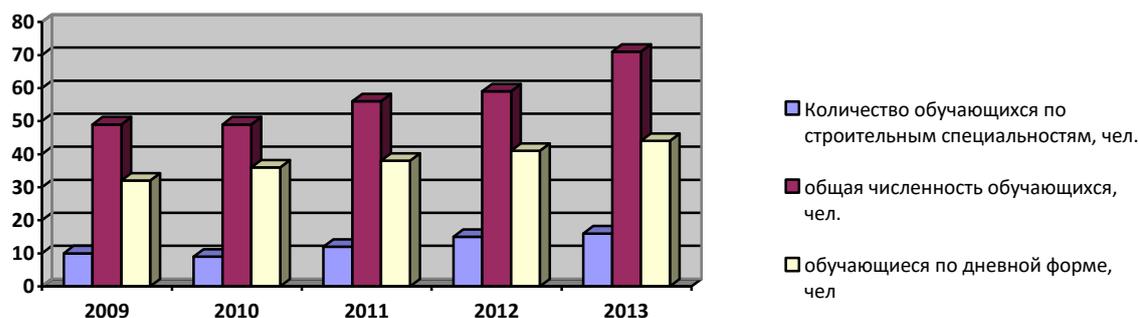


Рис. 4. Количество обучающихся в аспирантуре

В условиях государственного заказа на подготовку научных работников высшей квалификации с 2012 года введена *оценка компетентности научного руководителя*, осуществляемая по итогам года на Совете университета [11]. Наряду с этим наметилась тенденция снижения количества аспирантов и соискателей у одного научного руководителя. Это связано не только с большой ответственностью научного руководителя, но и повышенными требованиями к аспирантам и соискателям, более жесткими правилами контроля за обучением и своевременной подготовкой рукописи диссертации.

С целью *стимулирования труда научных руководителей*, повышения эффективности подготовки научных работников, в 2013 году на Совете университета было принято *«Положение о поощрении труда научных руководителей учреждения образования «Полоцкий государственный университет»* [12].

Количество научных руководителей за последние пять лет увеличилось более чем на 30 %, при этом среднее соотношение кандидатов наук и докторов наук остается практически неизменным – 60 и 40 %.

Итоги обучения аспирантов и соискателей рассматриваются на аттестациях. Начиная с 2006 года вводятся ежеквартальные *аттестации аспирантов*. С 2011 года введены текущие (полугодовые и годовые) аттестации обучающихся в аспирантуре. В 2012 году при завершении освоения содержания образовательной программы аспирантуры назначается *итоговая аттестация аспирантов и соискателей за весь период обучения на государственных аттестационных комиссиях*.

Начиная с 2012 года аспирантам и соискателям, успешно завершившим обучение в аспирантуре, государственной аттестационной комиссией присваивается *научная квалификация «Исследователь»* и выдается диплом исследователя [11]. Научная квалификация «Исследователь» позволяет трудоустроившимся выпускникам на должность не ниже преподавателя (ассистента), замещать должности ассистента, преподавателя без конкурса два года и участвовать в конкурсе на замещение вакантной должности старшего научного сотрудника.

Мониторинг закрепления аспирантов дневной формы получения образования, окончивших обучение в аспирантуре за последние пять лет, показал, что все они работают на преподавательских должностях или являются сотрудниками научно-исследовательского сектора университета. Однако не у всех выпускников аспирантуры научные исследования вызывают интерес.

Результативность успешной подготовки диссертации во многом зависит от взаимодействия в коллективах *аспирант (соискатель) – научный руководитель – заведующий кафедрой*, за которой закреплена специальность аспирантуры, а также *выпускник аспирантуры – научный руководитель – заведующий кафедрой*, на которую направлен на работу выпускник. При этом выпускники, направленные на работу на должности ассистента или преподавателя, вынуждены после окончания обучения осваивать большое количество учебных дисциплин, в среднем от трех до пяти, готовится к занятиям, и зачастую продолжение работы над диссертацией замедляется. По университету средняя продолжительность подготовки диссертаций после окончания обучения составляет около пяти лет.

В Полоцком государственном университете для молодых исследователей имеются необходимые условия для плодотворной научной деятельности. Действующая система многоступенчатой подготовки позволяет выявлять наиболее способных молодых людей, которые смогут работать в условиях реального производства, над конкретными задачами экономики республики. Однако рыночные отношения, в которые также вовлечена наука, накладывают свой отпечаток на систему ценностей и поведение молодых исследователей. В условиях рынка знание – это не только продукт научной деятельности, но и товар, который нужно продать. В последние годы отмечается падение престижа научно-педагогической работы, связанное с постоянно растущим прагматизмом современного молодого поколения, вступающего в активную трудовую жизнь, что приводит к оттоку наиболее способных молодых людей в различные отрасли экономики и бизнеса.

Для закрепления молодых научно-педагогических работников в университете длительное время проводится комплекс мероприятий. Работа по повышению материального благосостояния аспирантов и соискателей в университете ведется главным образом путем создания временных научных коллективов для выполнения фундаментальных и прикладных исследований по заказам предприятий, а также путем совмещения педагогической нагрузки с работой в Институте повышения квалификации УО «ПГУ», однако это отвлекает молодых исследователей от работы над диссертацией.

Жилищные проблемы квалифицированных молодых сотрудников решаются в основном путем предоставления мест в общежитии квартирного типа. Вместе с тем для долгосрочного закрепления научно-педагогических работников, подготовка и повышение квалификации которых является длительным процессом, необходима государственная социальная поддержка, прежде всего в жилищных вопросах.

Для нашего вуза вопрос о закреплении научно-педагогических кадров стоит достаточно остро, в том числе и по строительным специальностям. За последние десять лет шесть молодых кандидатов наук переехали на постоянное место жительства в город Минск и в областные центры.

Несмотря на определенные успехи в работе аспирантуры, по-прежнему многие кафедры испытывают нехватку в кандидатах наук. Перед аспирантурой поставлена задача – обеспечить ежегодный прием в аспирантуру УО «ПГУ» по строительным специальностям не менее 5 человек.

Подводя итог всему вышеизложенному можно сказать, что совершенствование системы подготовки высококвалифицированных кадров должно вестись по следующим направлениям:

- проводить профориентационную работу со студентами, проявившими склонность к научной работе на стадии получения I и II ступени высшего образования, показывать привлекательность карьеры молодого ученого;

- привлекать способных, талантливых молодых людей к работе во временных научных коллективах для выполнения исследований по заказам предприятий и организаций;

- считать работу в качестве научного руководителя аспирантов и соискателей одной из приоритетных в нагрузке по кафедрам.

- создавать условия для успешной работы при подготовке рукописи диссертации в коллективах аспирант (соискатель) – научный руководитель, а также выпускник аспирантуры – заведующий кафедрой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Классификация специальностей научных работников в соответствии с приоритетными направлениями научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2006 – 2010 годы: утв. приказом Председателя Гос. комитета по науке и технологиям Респ. Беларусь 18.12.2006 № 332 // Консультант Плюс: Беларусь. Технология 3000 [Электронный ресурс] / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2013.
2. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Республиканское унитарное предприятие (Государственное предприятие). Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С.С. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://nasb.gov.by/rus/publications/vestifm/vfm07\\_lb.php](http://nasb.gov.by/rus/publications/vestifm/vfm07_lb.php). – Дата доступа: 08.04.2013.
3. Институт БелНИИС. РУП «Институт БелНИИС» – в Ассоциации по высотному строительству (СТВУН). Аспирантура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belniis.by/page/aspirantura>. – Дата доступа 08.04.2013.
4. Брестский государственный технический университет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bstu.by:80/ru/studentam/magistratura-i-aspirantura>. – Дата доступа: 08.04.2013.
5. Белорусский национальный технический университет. Управление подготовки научных кадров высшей квалификации. Аспирантура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bntu.by/upnkvk-2.html>. – Дата доступа: 08.04.2013.

6. Белорусский государственный университет транспорта. Аспирантура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belsut.gomel.by/nauchnye-issledovaniya-i-innovacionnaya-deyatelnost/aspirantura-i-doktorantura/html>. – Дата доступа: 08.04.2013.
7. Полоцкий государственный университет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.psu.by/index.php/nauka.htm](http://www.psu.by/index.php/nauka.htm). – Дата доступа: 10.12.2012.
8. Белорусско-Российский университет. Аспирантура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bru.mogilev.by/speciality.php>. – Дата доступа: 08.04.2013.
9. Белорусский государственный технологический университет. Аспирантура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bstu.unibel.by/aspirant/index.shtml>. – Дата доступа: 08.04.2013.
10. Справаздача ўстанова адукацыі, якая рэалізуе адукацыйныя праграмы вышэйшай адукацыі, па стану на 1 кастрычніка 2012/2013 навучальнага года, 05.10.12 // Номенклатура дел учреждения образования «Полоцкий государственный университет». – 2012. – 02-15.
11. Положение о подготовке научных работников высшей квалификации в Республике Беларусь: утв. Указом Президента Респ. Беларусь 01.12.2011 № 561 // Консультант Плюс: Беларусь. Технология 3000 [Электронный ресурс] / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2013.
12. Положение о поощрении труда научных руководителей учреждения образования «Полоцкий государственный университет»: утв. решением Совета университета 26.04.2013 № 8 // Номенклатура дел учреждения образования «Полоцкий государственный университет». – 2013. – 11-04.

Поступила 02.12.2013

**HIGH LEVEL RESEARCHERS' TRAINING  
IN THE FIELD OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE  
IN POLOTSK STATE UNIVERSITET**

***E. KREMNEVA, A. BAKATOVICH***

*The questions of the teaching staff training in PSU are examined. It is shown that in modern conditions the selection of candidates for postgraduate training is conducted through identification of students and masters of the most gifted young people who will be able to join the ranks of scientists in the future. It is noted that for the successful work on a dissertation paper it is necessary to create certain conditions for prosperous activity between a postgraduate student and a supervisor as well as between postgraduate student and a Head of the Department. The data of enrollment and graduation of postgraduate students and applicants evaluation in the postgraduate school are analyzed. It is shown that young researchers in PSU have necessary conditions for fruitful scientific activity.*

## АРХИТЕКТУРА

УДК 72.03(476)

### РАЗВИТИЕ ОБЪЕМНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ПЛАНИРОВОЧНЫХ СТРУКТУР В ИСТОРИЧЕСКИХ ГОРОДАХ БЕЛАРУСИ

канд. архит., доц. Г.И. ЗАХАРКИНА  
(Полоцкий государственный университет);

М.В. КАБАЕВА, А.А. ПУЗЕЕВ  
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

*Рассмотрены принципы проектирования реконструкции исторических городов на основе современных задач формирования оптимальной городской среды. Проекты реконструкции и восстановления центров исторических городов основываются на результатах анализа состояния городской среды, которые используют для создания гармоничных отношений между архитектурой и человеком. Комплексный анализ базируется на проведении историографических и культурных исследований. Прослежено воздействие рельефа местности на формирование планировки, образа и силуэта городской застройки. Рассмотрены особенности развития планировочных структур двух разных по типологии исторических городов Беларуси – Полоцк и Несвиж. Предложены варианты по их совершенствованию в композиционном аспекте.*

**Введение.** В свете новых подходов к реконструкции исторических городов проблема сохранения архитектурного и историко-культурного наследия может быть решена эффективно только в том случае, когда цели и методы созвучны современным задачам формирования оптимальной городской среды.

Проектирование реконструкции или преобразования сложившейся планировочной структуры города требует предварительного проведения историографических и натуральных исследований с целью составления аналитической картины. Комплексный анализ состояния городской среды должен отражать характер пространственных взаимоотношений различных элементов этой среды, пропорциональность и соразмерность объемов, малых архитектурных форм, цветовую среду и содержать эстетическую оценку всех её составляющих, характеризующих не только композицию, но и качество исполнения этих элементов.

**Основная часть.** Символами белорусской истории, культуры и государственности являются города Полоцк и Несвиж. Они различаются по размерам, по функциональному и социальному значению в структуре региональных связей, но древность этих городов позволяет правомерно считать их историческими. В настоящее время эти города объединены общими духовными ценностями, сформировавшимися в течение столетий. Под воздействием многих исторических факторов роль и функция этих городов совершенствовалась, а их архитектура и планировка отражали культуру и эстетику каждой эпохи.

*Полоцк* – это исторический торговый и культурный центр Полоцкого княжества (XI – XIII вв.), тяготевшего к Прибалтийскому региону и проводившего активную внешнюю политику.

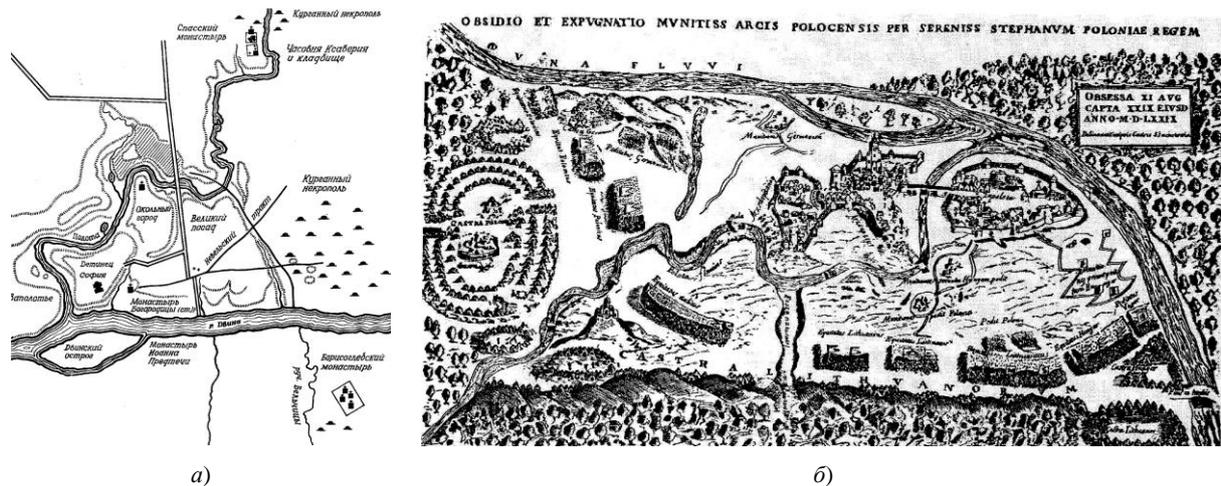
*Несвиж* – небольшое поселение, получившее свое развитие после 1547 года как центр официального Несвижского княжества и ставшее торговым центром местного значения, а в дальнейшем – культурным центром региона.

На примерах этих городов можно видеть, как характер рельефа местности отражался на формировании их планировки и соответственно, предопределял образ и силуэт городской застройки. По дошедшим до нас документам и графическим материалам можно представить процесс развития планировочных структур этих городов. На современном этапе градостроительные тенденции и нормы требуют формирования в сложившихся исторических центрах и кварталах плотной городской среды, насыщенной различными коммуникациями.

Эстетические вопросы формирования среды исторического города в настоящее время не могут рассматриваться вне контекста общеградостроительных вопросов. Поэтому проблематика сочетания старого и нового в современной градостроительной практике включает и такое психологическое понятие, как «дух города». Всем историческим городам присущ свой особый характер, и при знакомстве с ними у людей складываются художественные образы-символы этих городов.

**Полоцк** – самый древний город Беларуси – упоминается в летописи 862 года «Повесть временных лет». Поселение древнего Полоцка размещалось в низовьях реки Полоты (притока Западной Двины), на ее правом берегу. В конце X века центр поселения переместился на высокий холм у самой Двины и образовал Верхний замок, а между ним и старым городищем с течением времени сформировался околный город, который стал называться Нижним замком (рис. 1, а).

На гравюре Дж.Б. Кавальери изображена осада Полоцка войском Стефана Батория (рис. 1, б).



а)

б)

Рис. 1. Планировка города и его визуальные доминанты:

а – схема древнего Полоцка периода X – XI веков (по реконструкции Л. Алексеева);

б – осада Полоцка войском Стефана Батория в 1579 году (гравюра Д.Б. Кавальери)

Панорама (вид с севера) показывает размещение войск и состояние оборонительных сооружений вокруг замков, которые были к этому времени обновлены и достроены. Здесь можно видеть условное графическое изображение обширной территории, прилегающей к замкам древнего Полоцка, которое отражает особенности рельефа и характер природного окружения замков в последней четверти XVI века.

Улицы в пригородах застраивались стихийно и хаотично. Рельеф местности определял их трассировку, а силуэт застройки формировался архитектурными акцентами – каменными зданиями (в основном культовые), размещенными на господствующих высотах окружающих холмов.

В конце XVIII века (после второго раздела Речи Посполитой) начался процесс упорядочения городского плана Полоцка в соответствии с общим планом переустройства городов Российской империи. И в начале XIX века планировка Полоцка уже представляла собой относительно регулярную структуру, которая была заложена проектом перепланировки города, что можно видеть на чертеже 1793 года (рис. 2).

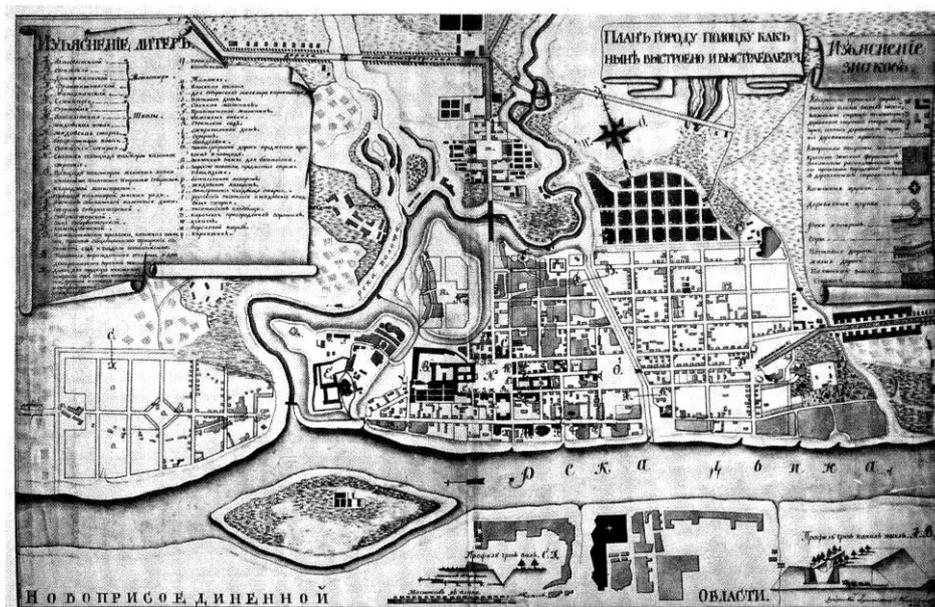


Рис. 2. Проект перепланировки Полоцка. 1793 год (архитектор И. Зигфриден)

План учитывал исторически сложившиеся деловые и культовые центры, упорядочивал уличную сеть, формировал кварталы и площади у главных административных зданий, определял места для жилой застройки. Таким образом, план предполагал как экстенсивное, так и интенсивное освоение городских территорий. Элементы средневекового и ренессансного города уступали место капиталистической архитектуре, формирующей город новой, индустриальной эпохи.

В последней четверти XX века активно проходил процесс разработки проектов реконструкции генпланов исторических городов на основе новейших методологических приемов. В проекте развития и совершенствования генплана Полоцка были выделены заповедные зоны гражданских и культовых зданий, даны предложения по формированию планировочных структур города в соответствии с его функциональным назначением и ролью в схеме комплексной территориальной организации.

На протяжении почти двух веков (с 1745 по 1964 г.) здание Николаевского собора (костела св. Стефана), имевшего высоту 60 метров, являлось доминантой в ансамбле Парадной площади и всего города и весьма эффективно выполняло свою идейно-символическую и композиционную функцию. В процессе реконструкции площади в 70-х годах прошлого столетия на месте Николаевского собора был построен 9-этажный жилой дом. С точки зрения пространственной композиции площади этому зданию была придана функция предшественника (доминанта в ансамбле). По пропорциям здание приближено к окружающей застройке. Но решение его фасада диссонирует со стиливым образом исторического Полоцка (рис. 3).

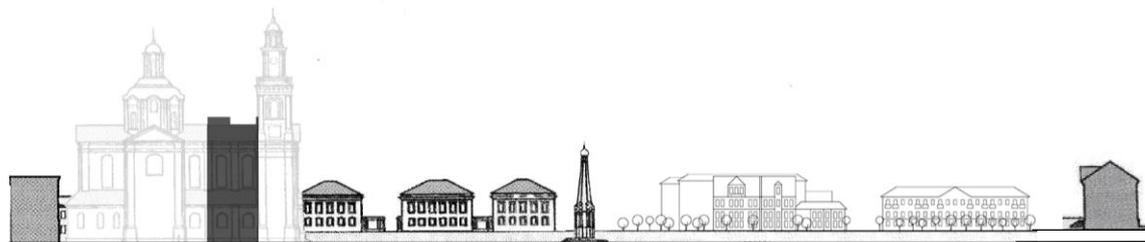


Рис. 3. Развертка северного фасада площади Свободы (Парадной площади)

Следует также отметить, что расширение площади, осуществленное с целью решения транспортных проблем, превратило квадратную площадь в прямоугольную и внесло несоответствие в масштабные и пространственные отношения. В настоящее время пространство центральной площади воспринимается слишком обширным и растянутым в северном направлении из-за примыкания участков сквера вдоль улицы Евфросиньи Полоцкой (210 м от здания горисполкома до улицы Коммунистической). Сквер, размещенный на месте снесённого жилого квартала с низкими градостроительными качествами, пока не сформировался, он кажется пустынным и неудобным.

Наличие малоэтажной застройки на больших территориях и отсутствие фоновой застройки придает пространству старого города характерные признаки «просторности» древнерусских городов. И тем не менее вполне очевидно, что композиция площади нуждается в дальнейшем совершенствовании.

При разработке проекта развития и модернизации исторического города в целом необходимо иметь комплексную аналитическую картину его застройки. Одной из составляющих этой картины является эстетическая оценка визуальных качеств городских пространств, отражающая соотношение параметров и характеристик имеющейся исторической структуры города (табл. 1).

На начальной стадии оценки пространства выполняются схемы силуэтов с показом исторически значимых доминант (рис. 4).

Таблица 1

Характеристика зданий и отдельных участков,  
расположенных на территории исторического центра города Полоцка

№ п/п	Название объекта	Высота, м	Высотные отметки
1	Софийский собор	50	129.50
2	Иезуитский коллегиум	18	132.00
3	9-этажный жилой дом	30	131.50
4	Памятник Героям Отечественной войны 1812 года	24	131.50
5	Богоявленский собор	33	125.00
6	Группа жилых 9-этажных домов по улице Нижнепокровской	30	123.00

Учитывая характер расположения города на берегу Западной Двины, можно определить его дальнейшее совершенствование и развитие с максимальным раскрытием к воде через обустройство прибрежной зоны. Новая высокотехнологичная набережная сможет решить социально-экономические задачи (культурные, образовательные, научные, социальные, демографические, экономические, инвестиционные), а также экологические (энергосберегающие технологии, возобновляемые и альтернативные источники

энергии, охрана и развитие городских зеленых зон) и транспортные (комплексная система мобильности) проблемы и организовать городскую среду на прогрессивном уровне.

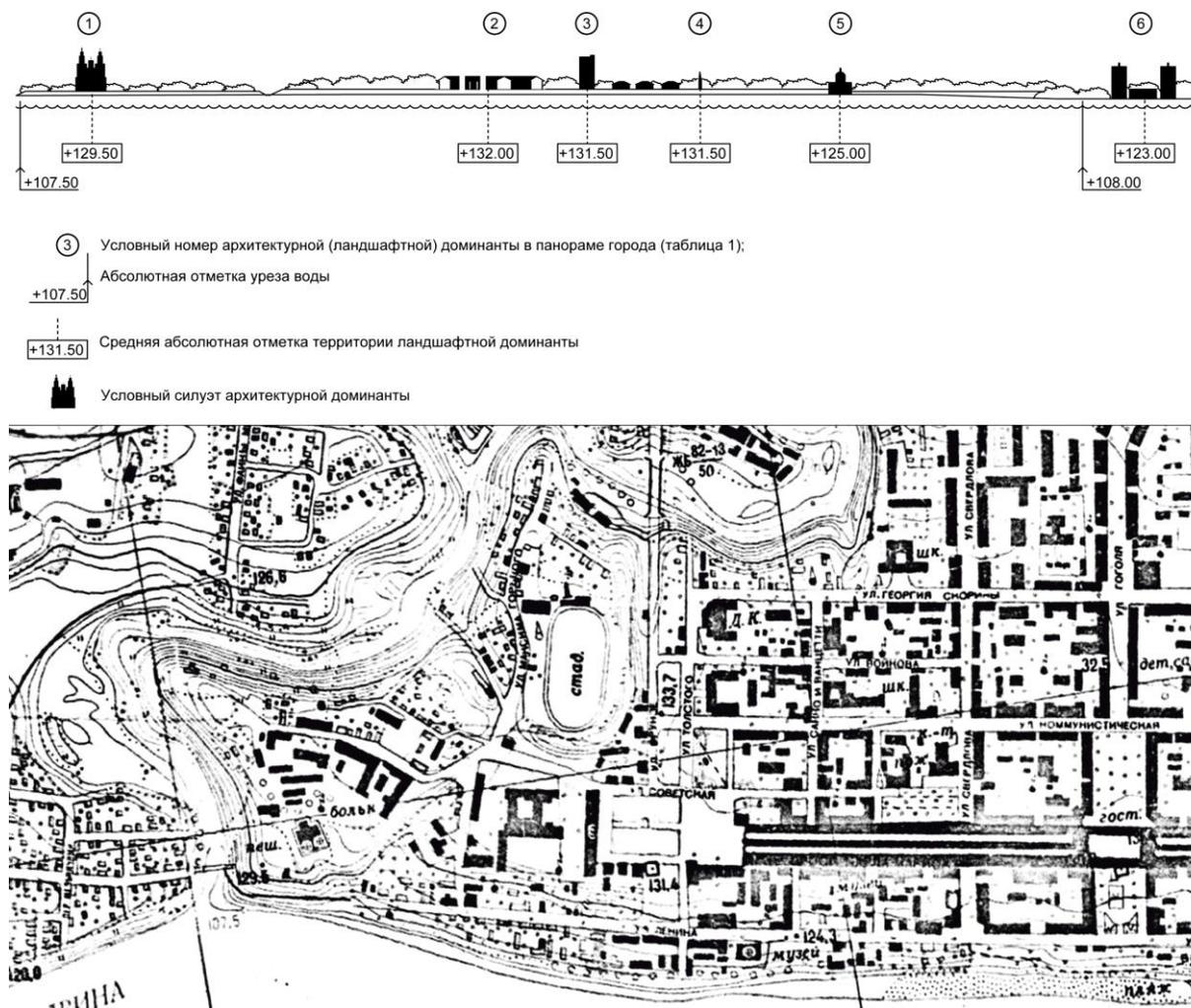


Рис. 4. Схема панорамы центральной части города вдоль Западной Двины (фрагмент генплана)

На основе аналитических данных и объемно-планировочных принципов градостроительства можно будет развить новые качества городской структуры и сохранить присущие именно Полоцку индивидуальные черты. Надо только найти верный масштаб новых элементов, чтобы они не вступили в резкий контраст с исторической застройкой и не уничтожили рельеф долины реки. По мере удаления от исторического центра возможно введение в пространственную структуру более высоких объектов, однако они должны обязательно сохранять, выявлять и подчеркивать композиционные связи искусственных и естественных элементов городского ландшафта.

**Несвиж.** Первые летописные упоминания о городе относятся к XIII веку. С XV века небольшое поселение на берегу речки Уша с переходом во владение княжеского рода Радзивиллов начинает активно развиваться и приобретает черты европейского города. В конце XVI века Несвиж представлял собой образец сознательной градостроительной деятельности в соответствии с европейскими тенденциями, хотя и был частновладельческим городом.

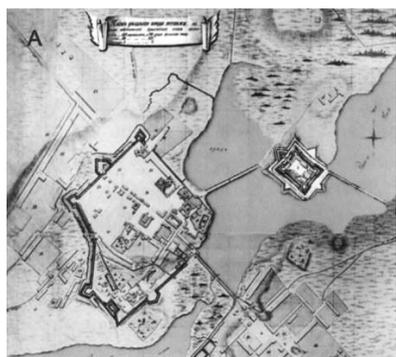
На гравюре начала XVII века (рис. 5) показан вид города с северо-востока. На изображении хорошо видны окружающие город холмы и искусственные водоемы, сформировавшиеся после сооружения дамб. С течением времени дамбы пришли в запустение, и первоначальный вид водоемов и зданий к концу XIX века лишился своей гармоничности. Несвиж в XVIII – XIX столетиях показан на рисунке 6.

После утраты своей оборонительной функции фортификационные сооружения приходят в негодность, однако остаются в структуре города, преобразуются или приспособляются к новым функциям.

Моноцентричная планировочная структура исторического малого города (в 1673 году в Несвиже было около 2600 жителей) не изменялась, а только обрастала небольшими окрестными поместьями.



Рис. 5. Несвиж на гравюре Томаша Маковского (XVII в.)



а)



б)

Рис. 6. Несвиж в XVIII – XIX столетиях:

а – план города в XVIII веке; б – вид на монастырь бенедиктинок и речку Уша (фото И. Баретти, 1894 г.)

В Несвиже, так же как и в Полоцке, силуэт исторического центра сформирован системой архитектурных акцентов (рис. 7, табл. 2).



а)



б)

Рис. 7. Виды Несвижа:

а – вид с запада; б – центр города (2012 г.)

Таблица 2

Характеристика зданий и отдельных участков, расположенных на территории исторического центра Несвижа и в зонах охраняемого природного ландшафта

№ п/п	Название объекта	Высота, м	Высотные отметки
1	Замок	32	192
2	Костел	45	184
3	Рагуша	45	184
4	Бенедиктинский монастырь	36	187
5	Слуцкая брама	10	180
6	Строящаяся православная церковь	32	191
7	Дворец культуры	16	189
8	Здания поместья XIX века	10 – 12	185
9	Сельское кладбище (группа деревьев)	До 25	186
10	Идеальное место в ландшафтном пространстве для размещения доминанты		184
11	Приемлемая по регламентам и визуальным связям зона для рекреационного комплекса или санатория	До 30 (в зависимости от композиции)	180
12	Проект: Администрация парка «Альба», центр обслуживания туристов и др.	До 20 – 30	

В настоящее время Несвиж обладает высоким туристско-рекреационным потенциалом, поэтому в современном генеральном плане отражены не только вопросы обеспечения комфортной среды для жителей города, но и рациональные связи городского центра с изолированными от жилых районов подцентрами для обслуживания туристов. Перспективным планом развития Несвижа определена стратегия создания туристско-рекреационных комплексов, а также объектов для более продолжительного пребывания отдыхающих на территории города-заповедника. В качестве градообразующего объекта допускается возможность строительства в будущем комплекса курортно-оздоровительного характера, место для которого в рекреационной структуре пока не определено.

С целью определения места для строительства комплекса курортно-оздоровительного характера проведена исследовательская работа по анализу пространства между старым и новым городом.

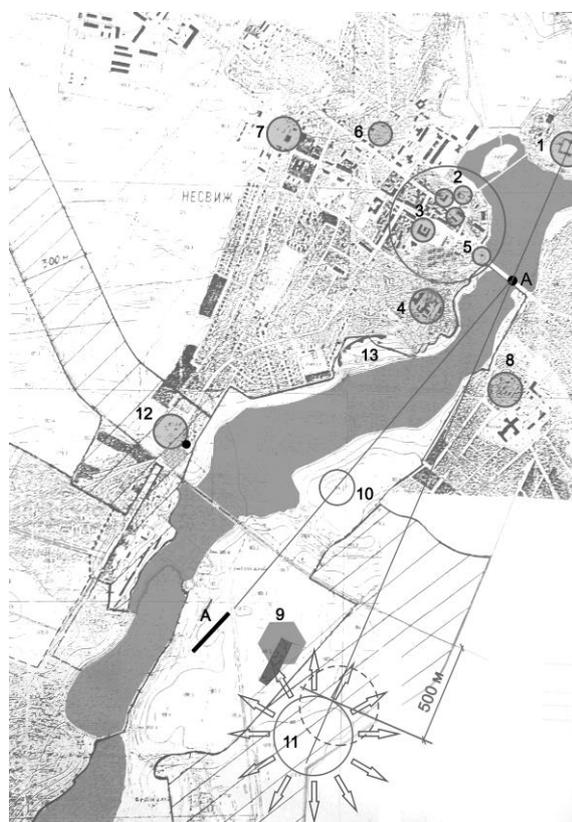


Рис. 8. Фрагмент генерального плана города и прилегающих территорий

Находясь в центре изучаемого пространства, в северном направлении на расстоянии 700 м видим главный элемент композиции – светлый каменный замок XVI века в стиле барокко. Он возвышается на холме, искусственно увеличенном подсыпкой до отметки 192 м на берегу Иванова пруда (рис. 8, 9, 10, а).

Природный ландшафт в противоположном, юго-западном направлении сформирован водной гладью Девичьего пруда (рис. 10, б), полоской объездной дороги на фоне невысокой растительности, темным пятном древесного массива (см. рис. 8, объект № 9) и незастроенным относительно невысоким холмом на переднем плане (см. рис. 8, объект № 10), представляющим собой ценную с позиции градостроительной композиции точку.

Акцентом в панораме и объединяющим ядром данного обширного пространства является плотная группа высоких деревьев на территории кладбища у пригородной деревни.

В результате анализа планировочной структуры города с обеспечением сохранения и совершенствования пространственной композиции исторического природного ландшафта предлагается ввести в глубинно-пространственную композицию изученной части ландшафта архитектурный объект, который сможет поддержать имеющийся акцентный силуэт на линии горизонта и в дальнейшем превратиться в самостоятельную доминанту в этом силуэте (см. рис. 8, объект № 11).

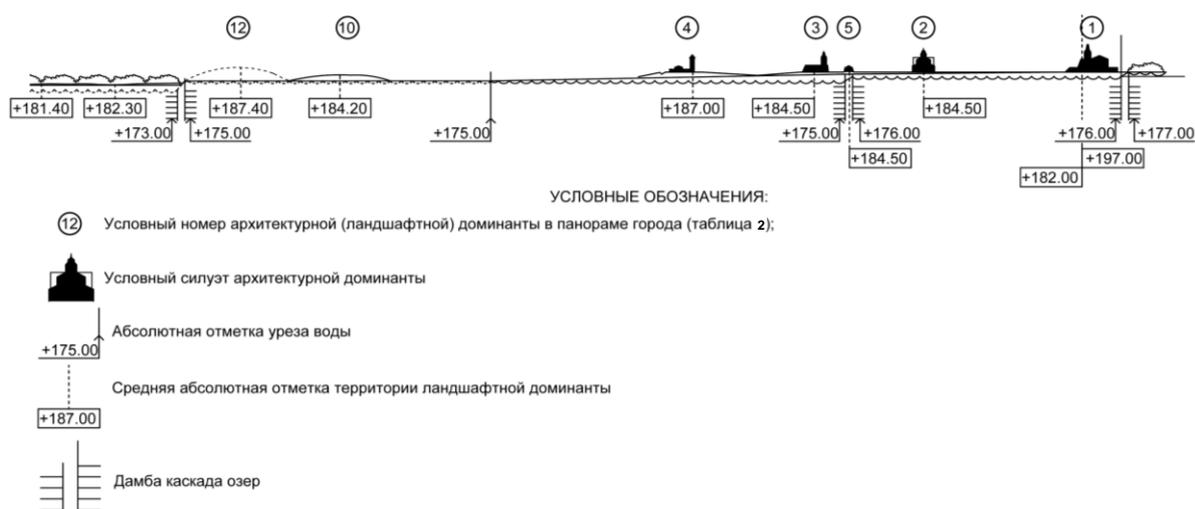


Рис. 9. Схема панорамы Несвижа и района парка «Альба» (вид с востока)

Рис. 10. Основные ландшафтные и архитектурные доминанты:  
а – вид на замок; б – вид на Девичий пруд и древесный массив (объект № 9 согласно рисунку 8)

Таким объектом может быть комплекс курортно-рекреационного назначения с санаторием, предназначенным для лечения отдыхающих с сердечно-сосудистыми или опорно-двигательными заболеваниями. Размещение санатория по соседству с парком-заповедником «Альба» позволит активно использовать высокоэстетичные природные компоненты парка для оздоровительных функций. Санаторий рационально впишется как в планировочную, так и в транспортную структуру города (рис. 9). Удобное размещение и рациональные связи с пригородными поселками позволят также решить существующую проблему с трудоустройством населения города и его окрестностей.

Особенности рельефа на предполагаемом участке позволяют создать довольно высокий архитектурный объект, с верхних этажей которого можно будет наблюдать панорамный вид города (рис. 11), пруд Альбянский, озеро Свитязь, парк «Альба», холмы Копыльской возвышенности и прекрасные сельские пейзажи.



Рис. 11. Панорамный вид Несвижа с юга от кольцевой дороги и точки 11

На пересечении кольцевой дороги с улицей К. Либкнехта на самом высоком холме (см. рис. 8, объект № 12) можно разместить высокий корпус административного управления туристско-рекреационного комплекса, включить объекты для обслуживания транзитных и активных мобильных туристов, а также организовать дополнительный въезд в город с южного направления. Здесь же можно запроектировать основные административно-хозяйственные службы загородного парка «Альба», которые будут обеспечивать конные и пешие прогулки по парку и городу.

**Заключение.** Результаты проведённого исследования позволяют сделать *вывод* о необходимости при разработке планов реконструкции с формированием пространственной среды согласно позициям функциональной, эстетической и экологической целесообразности проводить углубленное исследование пространственных взаимоотношений всех существующих архитектурных и природных составляющих этих зон на основе законов архитектурной композиции и с учетом психофизиологических законов восприятия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беккер, А.Ю. Современная городская среда и архитектурное наследие: Эстетический аспект / А.Ю. Беккер, А.С. Щенков / ЦНИИ теории и истории архитектуры. – М.: Стройиздат, 1986. – 206 с.
2. Вялікае княства Літоўскае: энцыкл.: у 2 т. / рэдкал. Г.П. Пашкоў (гал. рэд.) [і інш.]; маст. З.Э. Герасімовіч. – Мінск: БелЭн, 2006. – Т. 2: Кадэцкі корпус. – Яцкевіч. – 792 с.
3. Городская среда: Технология развития: Настольная книга / Акад. городской среды; под ред. В.Л. Глазычева – М.: «Ладья», 1995. – 239 с.
4. Малые города Беларуси: пособие проектировщику / Э.Н. Клевко [и др.] / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, Науч.-проект. Республ. унитарное предприятие «БелНИИПградостроительства». – Минск: Минсктиппроект, 2006. – 192 с.
5. Потаев, Г.А. Рекреационные ландшафты: охрана и формирование / Г.А. Потаев. – Минск: Універсітэцкае, 1996. – 160 с.
6. Градостроительство. Населенные пункты. Нормы планировки и застройки: ТКП 45-3.01-116-2008 (02250). – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2008.
7. Шимко, В.Т. Архитектурное формирование городской среды / В.Т. Шимко. – М.: Высш. шк., 1990. – 223 с.

Поступила 04.12.2013

#### DEVELOPMENT OF THE VOLUMETRIC-SPATIAL AND PLANNING STRUCTURES IN THE HISTORICAL CITIES OF BELARUS

G. ZAKHARKINA, M. KABAIEVA, A. PUZEEV

*Principles of reconstruction design of historical cities on the basis of modern tasks of forming the optimal urban environment are examined. Projects of reconstruction and restoration of historical city centres are based on the analysis of the urban environment and are used to create a harmonious relationship between architecture and a human being. A comprehensive analysis is based on historical and graphic as well as cultural studies. The impact of relief on the formation of the layout, appearance and silhouette of urban development is revealed. The authors consider peculiarity of planning structures' development of the two typologically different historical cities of Belarus – Polotsk and Nesvizh – and propose the ways to improve them in a compositional aspect.*

УДК 72.03(476)

**ВОБРАЗНА-СТЫЛІСТЫЧНЫЯ РАШЭННІ СУЧАСНЫХ ПРЫХОДСКІХ ХРАМАЎ  
БЕЛАРУСКАЙ ПРАВАСЛАЎНАЙ ЦАРКВЫ  
(ВОПЫТ 1991 – 2013 ГАДОЎ)**

**В.Г. АРАБЕЙ**

*(Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск)*

*Дзецца сціслы агляд станаўлення праваслаўнай архітэктуры Беларусі, выяўляюцца стылі і напрамкі, у якіх праваслаўнае храмабудаўніцтва дасягнула высокага мастацкага ўзроўню, самабытнасці архітэктурных рашэнняў. Раскрываюцца адмоўныя тэндэнцыі сучаснага перыяду. Вызначаюцца перспектыўныя напрамкі развіцця культавага дойлідства і іх прыярытэтная стыльвая скіраванасць, якая будзе выяўляць адметныя рысы праваслаўнай архітэктуры Беларусі. Акцэнтуюцца ўвага на першачарговай значнасці вобразнага рашэння, грунтоуючыся на якім павінна фарміравацца архітэктура праваслаўных храмаў. Фармулюецца асноўная задача вобраза храма і спектр разнастайных функцый, якія павінны быць рэалізаваны. Выяўлены базавыя характарыстыкі, уласцівыя праваслаўнай архітэктуры.*

**Уводзіны.** Адноўленае храмабудаўніцтва Беларусі канца ХХ – пачатку ХХІ стагоддзя ў значнай ступені абапіраецца на архітэктурна-мастацкія распрацоўкі мінулых стагоддзяў, разнастайныя стылі і напрамкі: візантыйскі, старажытнарускі, готыку, рэнесанс, барока, класіцызм, рэтраспектыўна-рускі, мадэрн і разнастайныя варыянты народнага дойлідства. Кожны з іх па-свойму паўплываў на фарміраванне праваслаўнай архітэктуры, і наша задача стаіць у выяўленні найбольш унікальных вобразных рашэнняў, на якіх можна было б сфакусіраваць увагу пры стварэнні сучасных храмаў.

**Асноўная частка.** Адмысловая каштоўнасць вопыту візантыйскага культавага дойлідства VI – XV стагоддзяў у працэсе фарміравання хрысціянскага храмабудаўніцтва абумоўлена стварэннем самабытнай архітэктурнай мовы сакральнага мастацтва, якая ўвабрала ў сябе найлепшыя здабыткі будаўнічага майстэрства розных частак імперыі. Непераходзячая мастацка-эстэтычная значнасць візантыйскай архітэктуры, вынайзеныя вобразныя і архітэктурна-мастацкія рашэнні да гэтага часу з’яўляюцца найлепшымі здабыткамі праваслаўнага дойлідства і служаць узорами для новых храмаў (мал. 1).



Мал. 1. Свята-Афанасьёўская царква, Мінск

Традыцыя візантыйскага мураванага дойлідства сталася асновай і пачаткам фарміравання нацыянальных і рэгіянальных школ праваслаўнага храмабудаўніцтва ўсходнеславянскіх земляў (Свята-Барыса-Глебская царква, Гродна). “Старажытнарускія дойліды адпачатку атрымалі ўяўленне аб сутнасці архітэктуры і сродках уласцівага ёй адначасовага вырашэння ўтылітарных, ідэалагічных і эстэтычных задач, якія яны ў далейшым творча развілі” [4, с. 132 – 133]. Адаптацыя да мясцовых прыродна-кліматыхных умоў, будаўнічых матэрыялаў і традыцый увасобілася ў стварэнні самабытных вобразаў храмаў і прадвызначыла характар развіцця праваслаўнай архітэктуры Беларусі, Расіі і Украіны з агульнымі і адмысловымі рысамі кожнай з краін. Сімвалічнае значэнне старажытнарускага перыяду як пачатку нацыянальнага храмабудаўніцтва, арыгінальнасць і гармонія яго архітэктурна-мастацкіх рашэнняў шматразова пераасэнсоўваліся і перапрацоўваліся ў іншыя гістарычныя перыяды. Не стала выключэннем і духоўнае ад-

раджэнне канца XX – пачатку XXI стагоддзя, падчас якога актыўна выкарыстоўваецца спадчына старажытнарускага перыяду (Свята-Праабражэнская царква, Дрыбін).

Адным з найбольш арыгінальных перыядаў развіцця праваслаўнага храмабудаўніцтва Беларусі з’яўляюцца XIII – XVI стагоддзі, у якія адбываўся своеасаблівы сімбіёз мастацкіх і канструкцыйна-тэхнічных асаблівасцей готыкі і старажытнарускай традыцыі (полацкай, гродзенскіх школ) [9, с. 129]. Самабытнасць вобразнага рашэння абарончых храмаў (Свята-Міхайлаўская царква, в. Сынковічы, Зэльвенскі р-н), высокі тэхнічны і мастацкі ўзровень красамоўна адлюстравалі сацыяльна-палітычную спецыфіку названага перыяду. На жаль, мастацкая спадчына праваслаўнай готыкі ў сучасным царкоўным будаўніцтве сустракаецца як аддаленая рэмінісцэнцыя ў адзінкавых аб’ектах (Свята-Петра-Паўлаўская царква, п. Ратамка, Мінскі р-н). Падобная сітуацыя назіраецца і з адмысловай традыцыяй храмаў абарончага тыпу (Храм у гонар абраза Божай Маці “Казанскі”, в. Тышкавічы, Іванаўскі р-н).

У праваслаўным дойлідстве Беларусі рэнесанс не атрымаў шырокага распаўсюджвання, і толькі асобныя яго рысы ў спалучэнні з гатычнай (Свята-Раства-Багародзіцкая царква, в. Мураванка, Шчучынскі р-н) і барочнай (Свята-Петра-Паўлаўскі сабор, Мінск, Мінскі р-н) традыцыямі знайшлі ўвасабленне. Гэтым можна патлумачыць ігнараванне адмысловага характару і высокай мастацкай выразнасці дадзенага стылю ў сучасным праваслаўным храмабудаўніцтве.

Барока для беларускай культуры з’явілася той вяршыняй, якой была, мабыць, готыка – для Францыі, рэнесанс – для Італіі, класіцызм – для Расіі [5, с. 5]. У нацыянальным праваслаўным храмабудаўніцтве стыль атрымаў адмысловую трактоўку (Свята-Успенская царква, Магілёў), якая адрознівае яго ад вобразаў храмаў іншых канфесій Беларусі і царкваў адзінаверцаў замежжа, спалучае ўласна праваслаўныя прыёмы з мастацкімі асаблівасцямі барока, вылучаецца высокім узроўнем эмацыяна-эстэтычнага ўздзеяння. У сучаснай практыцы традыцыі барока знайшлі ўвасабленне толькі ў выкарыстанні асобных элементаў стылю (Царква ў гонар абраза Божай Маці “Ўсецарыца”, Магілёў). Спробы практавання храмаў па ўзору праваслаўнага дойлідства Падняпроўскага рэгіёна (мал. 2), якое з’яўляецца найбольш адметным прадстаўніком праваслаўнай барочнай архітэктуры, на жаль, не атрымалі падтрымкі заказчыкаў.



Мал. 2. Свята-Успенская царква (практ), Орша

Распаўсюджанне класіцызму ў праваслаўным дойлідстве Беларусі звязана з мастацкімі густамі імператарскага двара і вяльможай Расійскай імперыі, да якой адышлі беларускія землі ў выніку падзелу Рэчы Паспалітай. Дадзены перыяд характарызуецца зваротам да традыцый антычнай язычніцкай архітэктуры і актыўным выкарыстаннем тэмы храма-ратонды на пачатку (Спаса-Праабражэнская царква, Чачэрск) і больш складаных аб’ёмна-проставых кампазіцый на далейшых этапах развіцця стылю (Свята-Раства-Багародзіцкая царква, Слаўгарад) [12, с. 397 – 402]. Сучаснае беларускае праваслаўнае храмабудаўніцтва не часта выкарыстоўвае класіцызм у якасці асноўнага стылю будынка, у большай ступені ўжываюцца асобныя элементы ордэрнай сістэмы ў разнастайных варыянтах спалучэння з іншымі эстэтычнымі традыцыямі (Свята-Серафімаўскі храм, Брэст).

Шырокія маштабы распаўсюджвання рэтраспектыўна-рускага стылю на тэрыторыі Беларусі ў XVIII – пачатку XX стагоддзя абумоўлены найперш ідэяна-палітычнымі ўстаноўкамі, скіраванымі на ўзмацненне пазіцый праваслаўнай царквы [8, с. 121] і дамінаванне ідэалогіі Расійскай імперыі. У якасці ўзору прымаецца дойлідства старажытнарускіх княстваў, на аснове якога ствараюцца разнастайныя напрамкі праваслаўнага храмабудаўніцтва: маскоўска-яраслаўскі (Свята-Уваскрасенскі сабор, Барысаў), руска-візантыйскі (Свята-Пакроўская царква, в. Збялыны, Лідскі р-н), сінадальны (Спаса-Праабражэнская царква, в. Даўбені,

Валожынскі р-н) і інш. Спадчына беларускай культавай архітэктуры розных стагоддзяў у працэсе фарміравання рэтраспектыўна-рускага стылю, як правіла, не выкарыстоўвалася. У палітры вобразных і архітэктурна-мастацкіх рашэнняў сучаснага праваслаўнага храмабудаўніцтва разнастайныя трактоўкі рэтраспектыўна-рускага стылю займаюць вядучыя пазіцыі (Свята-Іаана-Багаслоўскі храм, в. Чэрні, Брэсцкі р-н; Свята-Богаяўленская царква, Глуск; Свята-Успенская царква, в. Бяларучы, Лагойскі р-н; інш.). У пэўнай ступені гэта можна тлумачыць часовай блізкасцю названага перыяду, шырокім распаўсюджаннем храмаў дадзенай стылістыкі, стэрэатыпамі адносна “праўдзіва-праваслаўнага” вобраза храма.

Элементы мадэрна знаходзім у архітэктуры асобных мураваных (Храм у гонар Усіх Святых, в. Дольная Рута, Карэліцкі р-н) і драўляных (Свята-Раства-Багародзіцкая царква, в. Лыскава, Пружанскі р-н) храмаў пачатку ХХ стагоддзя. Да гэтага перыяду адносіцца і пабудова храма ў неакласічнай традыцыі (Свята-Пакроўскі сабор, Баранавічы). Невялікая распаўсюджанасць стыляў, верагодна, абумоўлена складаным сацыяльна-палітычным становішчам краіны і кароткімі храналагічнымі рамкамі. У сучасным праваслаўным храмабудаўніцтве быў выяўлены адзіны аб’ект, у якім актыўна праяўлена стылістычная аснова мадэрна (Свята-Георгіеўская царква, в. Камянюкі, Камянецкі р-н).

На жаль, праваслаўнае храмабудаўніцтва глыбока не закранула распрацоўкі нацыянальна-рамантычнай плыні архітэктуры [16, с. 11], якія мелі месца ў Заходняй Беларусі і ўвасобіліся ў стварэнні адмысловых вобразаў каталіцкіх касцёлаў. Верагодна, тут бы мы маглі назіраць развіццё нацыянальных адметнасцей праваслаўнай архітэктуры часоў готыкі, рэнесанса і барока.

Асаблівае месца ў працэсе фарміравання праваслаўнай культавай архітэктуры належыць народнаму дойлідству, дзе ў выніку ўзаемадзеяння мясцовых будаўнічых традыцый і разнастайных стыляў, іх сумеснага ўдасканалення ўзбагачалася культура народа [14, с. 14], ствараліся храмы з гарманічнымі і самабытнымі вобразамі. У сувязі са спецыфікай асноўнага будаўнічага матэрыялу народнага дойлідства – дрэва, неспрыяльнымі сацыяльна-палітычнымі ўмовамі да нашага часу дайшла адносна невялікая колькасць храмаў ХVIII – ХХ стагоддзяў. Падобная сітуацыя назіраецца і з выявамі драўляных храмаў, якія былі зафіксаваны ў краязнаўчай літаратуры, замалёўках мастакоў, на фотаздымках, але і ў гэтай абмежаванай інфармацыі ўтрымліваюцца характэрныя рысы нацыянальнага дойлідства, якія маглі б стаць асновай для развіцця адмысловых якасцей сучаснага беларускага храмабудаўніцтва. На жаль, гэта можна назіраць толькі ў асобных фрагментах цэркваў (мал. 3), якія ўзводзіліся паводле праектаў архітэктараў-прафесіяналаў, як і раней, рэгіянальная адметнасць часцей сустракаецца ў творчасці народных майстроў (Свята-Уважасенская царква, в. Вялікая Слабада, Карэліцкі р-н).



Мал. 3. Храм у гонар Святой праведнай Сафіі Слуцкай, Мінск

**Вобразнае раішэнне** – аснова храмабудаўніцтва, адпаведна якой вызначаюцца горадабудаўнічыя падыходы, характэрныя патрабаванні да архітэктурна-планіровачных і архітэктурна-мастацкіх рашэнняў. Вобраз кандэнсуе ў сабе ўсе аспекты культавага дойлідства, але першачарговую значнасць маюць багаслоўскі і эстэтычны.

Вобразы нябеснага, згодна з меркаваннем Дыянісія Арэапагіта, можна “ствараць і з найменш шанаваных частак матэрыі, паколькі і яна, атрымаўшы быццё ад праўдзіва Добрага, ва ўсякім сваім матэрыяльным парадку мае нейкі водгук разумовай прыгажосці, і з іх дапамогай можа быць узведзеным да нярэчыўных архетыпаў” [6, с. 63]. Па адзіным меркаванні айцоў царквы, веды, асабліва вышэйшыя, адкрываюцца чалавеку не ў паняццях, але ў вобразах і сімвалах [2, с. 163].

Фарміраванне архітэктурнага вобраза праваслаўнага храма адбываецца на падставе дамінуючай багаслоўскай ідэі. Паказчыкам прыманя таго ці іншага архітэктурнага вобраза праваслаўнай царквой вы-

ступае кананічная традыцыя, якая не з'яўляецца наборам канкрэтных правілаў, паводле якіх павінна стварацца храмавая архітэктура, але ёсць своеасаблівае інтуітыўнае адчуванне адпаведнасці культурага дойдства дагматыцы царквы.

Асноўная задача вобраза храма – узвядзенне чалавечага духа да Ісціны, якая здзяйсняецца пры садзейнічанні яго асноўных функцый: сакральнай, дагматычнай, анагагічнай, харызматычнай, паклоннай, праслаўляльнай, камератыўнай, семіятычнай, дыдактычна-інфарматыўнай, эстэтычнай і псіхалагічнай. Выяўленне адмысловага духоўнага характару будынка царквы рэалізуецца пры дапамозе сакральнай функцыі. Дагматычная функцыя садзейнічае адлюстраванню асноўных палажэнняў праваслаўнага веравучэння ў вобразе храма. Анагагічная функцыя паклікана ўзводзіць розум “праз цялеснае сузіранне да сузірання духоўнага” [2, с. 169]; харызматычная – далучэнне да выяваў святых асоб і падзей з мэтай асвячэння; паклонная – знак глыбокай павагі і пакоры, якія адрасаваны Першавобразу; праслаўляльная – ушанаванне святых і рэлігійных святаў; камератыўная – нагаданне аб славурых падзеях царкоўнай гісторыі; семіятычная – тлумачэнне знакава-сімвалічнай сістэмы храма; дыдактычна-інфарматыўная – своеасаблівае апавяданне ў выявах, адэкватнае славеснаму тэксту; эстэтычная – увасабленне ў гарманічных мастацкіх вобразах і рашэннях дасканаласці нябесных правобразаў; псіхалагічная – стварэнне адмысловай душэўнай атмасферы і эмацыйнага стану ў храме, якія спрыяюць кантакту з духоўным светам.

У вобразе храма, аб'яднаная адзінай ідэяй, ствараецца сістэма з асобных знакаў і сімвалаў, дзе знак перадае духоўнае значэнне Боскіх і нябесных ісцін і з'яў, не паказваючы іх непасрэдна [13, с. 14]. Найбольш распаўсюджаным знакам выступае крыж, які не ўтрымлівае выяву ўкрыжавання. Ён актыўна выкарыстоўваецца на ўсіх узроўнях архітэктурнай творчасці. Значная частка праваслаўных храмаў мае планіровачную схему ў выглядзе крыжа (Свята-Троіцкі сабор, Лоеў) альбо ўтрымлівае яго ў сваёй структуры. Разнастайныя па канфігурацыі і памерах крыжы ўводзяцца ў аб'ёмна-прасторавую кампазіцыю пабудовы, узбагачаюць пластычныя рашэнні фасадаў, фарміруюць аконныя і дзвярныя праёмы (Царква ў імя свяціцеля Георгія Каніскага, Магілёў). Крыж – адна з найбольш выкарыстоўваемых тэм у дэталях і арнаментах цэркваў (мал. 4).



Мал. 4. Царква ў імя святога вялікапакутніка Дзімітрыя Салунскага, в. Рагозна, Жабінкаўскі р-н

Сімвал – быццё, якое больш самога сябе. Нешта, што ўяўляе сабой тое, што не ёсць ён сам, больш яго і якое, аднак, істотна праз яго аб'яўляецца [15, с. 279]. Параўнальна са знакам, сімвал мае прамое падабенства з тым, што ён пазначае, і служыць выяўленню чагосьці няўнага. Сімвал не абмежаваны, падобна знаку, сродкамі выразнасці і кандэнсуе ў сабе шэраг ідэй, асацыяцый, дзеянняў. Разнастайныя сімвалічныя значэнні ўласцівы асобным элементам будынка царквы, ілюстрацыяй можа служыць шматварыянтнасць завяршэнняў храмаў. Так, купалы храмаў часта маюць форму, падобную да полымя свечкі, якая сімвалізуе малітоўнае гарэнне вернікаў (Царква ў імя св. пакутніка немаўляткі Гаўрыіла Бела-стоцкага, Іўе); шацёр, падобны да промняў Боскага святла, якое падае з неба і асвячае людзей у царкве (Свята-Аляксандра-Неўская царква, Віцебск); шаломападобнае завяршэнне, якое адпавядае ўсведамленню храма як ваяра і ваяўнічай місіі хрысціянскай царквы ў барацьбе з цемрай (Свята-Міхайлаўская царква, Мінск). Часам элементы храма носяць антрапаморфныя прыкметы: цыліндр (барабан), на якім размяшчаецца завяршэнне, называюць шыяй; само завяршэнне – галавой, а дэкаратыўнае аздабленне будынка падобна да ўпрыгожванняў [11]. Асобныя часткі храма сімвалізуюць прадметы Свяшчэннага Пісання: амбон – узвышанае месца пропаведзі Хрыста і камень, на якім анёл дабравестваваў аб Госпадзе, які ўваскрэс і г.д.

Вялікае сімвалічнае значэнне мае архітэктурны дэкор. Так, напрыклад, аркатура, якая агортвае храм, сімвалізуе райскі сад, перспектывны партал увахода ў храм – вузкасць сцежкі, якая вядзе ў Царства Ня-

беснае (Свята-Праабражэнская царква, Дрыбін) і інш. У гарманічным спалучэнні з архітэктурай храма знаходзіцца і сістэма роспісу, у якой адлюстроўваецца прынцып іерархіі размяшчэння сюжэтаў і персанажаў [13, с. 31 – 32].

З дапамогай спалучэння розных варыянтаў знакаў і сімвалаў ствараюцца разнастайныя архітэктурныя вобразы. Будынак царквы можа ўвасабляць сабой вобраз Царства Нябеснага, Горняга Іерусаліма, Царквы – нявесты Хрыстовай і інш. У першую чаргу гэта знаходзіць адлюстраванне ў аб’ёмна-прасторавай кампазіцыі храма, у другую – у асобных элементах і дэкаратыўным аздабленні. Яркім прыкладам увасаблення вобраза царквы – нявесты Хрыстовай – з’яўляецца шэраг храмаў старажытнарускага перыяду [11], у якіх зграбнасць аб’ёмна-прасторавай кампазіцыі, пластычнае і дэкаратыўнае аздабленне складаюць гарманічную архітэктурна-мастацкую сістэму, якая выяўляе багаслоўскую ідэю будынка.

Сучаснае храмабудаўніцтва, як правіла, карыстаецца сістэмай вобразных рашэнняў, распрацаваных у мінулым (Свята-Духаўская царква (п. Гатава, Мінскі р-н), увасабляе багаслоўскую ідэю царквы – нявесты Хрыстовай), але часам адбываецца спроба пабудовы архітэктуры храма на падставе іншых тэалагічных ідэй, напрыклад, лесвіцы, якую ўбачыў Якаў у сне і якая апісана ў Свяшчэнным Пісанні: “... вось лесвіца стаіць на зямлі, а верх яе кранае неба; і вось анёлы Божыя ўзыходзяць і сыходзяць па ёй. І вось Гасподзь стаіць на ёй...” [1, с. 40]. Менавіта так можна трактаваць аб’ёмна-прасторавую кампазіцыю праекта царквы ў выглядзе прыступак (Царква ў імя святых Роўнаапостальных Канстанціна і Алены, в. Жодзішкі, Смаргонскі р-н). Часам у архітэктуру храма ўводзяцца новыя сімвалы, як арка-вітраж, якая атаясамліваецца з вясёлкай, дадзенай людзям у Старым Запавеце Богам пасля патопу: “Я кладу вясёлку Маю ў воблаку, каб яна была азнакаю заповіту паміж Мною і паміж зямлёю” [1, с. 14]; дэкаратыўныя элементы, напрыклад, арнамент, створаны на аснове сінтэзу нацыянальных і хрысціянскіх матываў (мал. 5).

У невялікай колькасці храмаў XX – XXI стагоддзяў адбываецца пошук новых вобразаў, але гэта выяўляе тэндэнцыю стварэння ўнікальных архітэктурных рашэнняў, якія могуць стаць асновай у фарміраванні мовы сучаснай праваслаўнай архітэктуры.



Мал. 5. Царква ў гонар абраза Божай Маці “Мінскі”, Мінск

Першачарговая эстэтычная задача ў фарміраванні вобраза хрысціянскага храма – адлюстраванне ў яго архітэктуры нябеснай дасканаласці і гармоніі. “Таму і сама прыгажосць у разуменні Праваслаўнай Царквы не ёсць прыгажосць, уласцівая тварэнню, а атрыбут Царства Боскага, дзе Бог будзе ўсё ва ўсім...” [13, с. 175 – 176]. Вопыт хрысціянскага храмабудаўніцтва ў краінах з дамінуючай пазіцыяй праваслаўнай царквы, да якіх адносіцца і Беларусь, у найбольш спрыяльныя гістарычныя перыяды падаваў прыклады максімальнай канцэнтрацыі архітэктурна-мастацкіх і будаўнічых дасягненняў у культавым дойлідстве, якое развівалася ў агульным рэчышчы з архітэктурай розных тыпаў.

Пошукі вобраза праваслаўнага храма канца XX – пачатку XXI стагоддзя ў асноўнай масе вылучаюцца зарыентаванасцю іх на гістарычныя прататыпы, што не супадае з агульнымі тэндэнцыямі сучаснай архітэктуры, у якой дамінуюць прынцыпы мадэрнізму. З аднаго боку, гэта можна тлумачыць жаданнем аднаўлення страчанага пераемнасці культавай архітэктуры, характэрнага для краін, якія пацярпелі ад атэістычнай барацьбы, з другога – несупадзеннем архітэктурна-мастацкіх задач царкоўнага дойлідства і сучаснага будаўніцтва. “Калі старая архітэктура ўяўляе сабою цэласны арганізм, які пераймае якасці жывой прыроды – тварэння Боскага, то эстэтыка так званай сучаснай архітэктуры дэманструе штучнае, абстрактнае аналітычнае мысленне, секулярызаваны псеўданавуковы рацыяналізм...” [3]. На першае месца ў сучасным мастацтве часта выходзяць такія якасці, як эфектнасць, арыгінальнасць, адмысловасць твора,

а не прыгажосць, якая была характэрна для архітэктуры мінулага. Гэтую тэндэнцыю можна бачыць на прыкладзе асобных каталіцкіх і пратэстанцкіх храмаў сярэдзіны XX – пачатку XXI стагоддзя (Юбілейная царква, Італія, Рым; кафедральны сабор Найсвяцейшай Панны Марыі, Бразілія, Бразілія; Кадэцкая капэла ваенна-паветранай акадэміі, ЗША, Каларада). Параўнальна з разгледжанай вышэй мадэрнісцкай скіраванасцю каталіцкага і пратэстанцкага храмабудаўніцтва праваслаўныя цэрквы захоўваюць больш шчыльную сувязь са старадаўняй архітэктурай розных перыядаў (сабор св. Савы, Сербія, Белград; Свята-Троіцкі сабор, Грузія, Тбілісі).

У сучасным хрысціянскім храмабудаўніцтве вядзецца актыўны пошук эстэтычных рашэнняў, здольных спалучыць у сабе адмысловыя рысы канкрэтнага часу існавання праваслаўнай архітэктуры і сакральнага характару культавага будынка. На жаль, пастаўленая задача з’яўляецца вельмі складанай і паказвае станоўчыя вынікі ў невялікай колькасці аб’ектаў. Вобразныя рашэнні большасці храмаў, якія спрабуюць пераймаць старадаўнюю архітэктуру, страчваюць “праўдзівасць жыцця”, увабляючы “прыкрае характава” [10, с. 34]. Пры актыўным праўленні “сучаснасці” будынка губляецца сакральны характар, “архітэктурная духоўнасць” вобраза храма.

Унікальнасць з’яўляецца неад’емнай характарыстыкай усіх тварэнняў, праз якую выяўляецца шматграннасць, непаўторнасць і індывідуальнасць тварнага свету, і архітэктар у сваёй дзейнасці павінен выступаць сутворцам Бога [7]. Глобалізацыйныя працэсы ў культуры і мастацтве, дамінаванне інтэрнацыянальных напрамкаў у архітэктуры XX – XXI стагоддзяў, у выніку якіх страчваецца самабытнасць вобразных рашэнняў сучаснага дойлідства, не адпавядаюць прынцыпам хрысціянскай творчасці. На гэтай падставе можна вылучыць адну з першачарговых задач сучаснага этапу праваслаўнага храмабудаўніцтва – захаванне і максімальнае развіццё яго ўнікальных якасцей. У дачыненні да хрысціянскай архітэктуры вылучаецца тры ўзроўні ўнікальнасці: канфесійная, нацыянальная і рэгіянальная. Канфесійная ўнікальнасць вобраза грунтуецца на адмысловым духоўным вопыце розных веравызнанняў і вызначаецца знітанасцю з лепшымі дасягненнямі ў храмабудаўніцтве сваёй канфесіі. Так, нягледзячы на вялікую часавую адлегласць, сучасная праваслаўная архітэктурная часта звяртаецца да візантыйскай традыцыі культавага дойлідства VI – XV стагоддзяў (Храм у гонар уводзін у храм Прасвятой Багародзіцы, Талачын) – аднаго з самых яркіх перыядаў усходнехрысціянскага храмабудаўніцтва, падчас якога былі створаны найбольш выразныя вобразы і схемы цэркваў. Важным перыядам у фарміраванні канфесійнай адметнасці для ўсходнеславянскіх краін з’яўляецца XII стагоддзе, калі, грунтуючыся на візантыйскім культывым дойлідстве, быў вынайздзены свой вобраз праваслаўнага храма (славяна-візантыйскі тып аднагаловага крыжовакупальнага храма з трыма ўсходнімі апсідамі [4, с. 154]). У наступныя перыяды развіцця храмабудаўніцтва ён неаднаразова выступаў як узор спрадвечна праваслаўнай архітэктуры, але вызначанага ўсходнеўрапейскага арэала.

Нацыянальная ўнікальнасць праваслаўнага храмабудаўніцтва Беларусі абумоўлена шматвяковымі хрысціянскімі традыцыямі. Гэтыя чыннікі ў максімальнай ступені спрыялі стварэнню і развіццю адмысловых вобразных рашэнняў, найбольш яркімі з якіх з’яўляюцца храмы перыяду ВКЛ (XIII – XVI стст.) і Рэчы Паспалітай (XVI – XVIII стст.), у архітэктурна-мастацкіх рашэннях якіх злучаюцца ўсходнеўрапейская і заходнеўрапейская архітэктурна-будаўнічыя традыцыі. Сярод найбольш уплывовых фактараў, паводле якіх фарміраваліся нацыянальныя і рэгіянальныя асаблівасці праваслаўнага храмабудаўніцтва, можна вылучыць прыродна-кліматычны, сацыяльна-культурны, палітычны, эканамічны.

Адмысловую ролю ў захаванні нацыянальных і рэгіянальных традыцый адыгрывае народная архітэктурная, у якой, грунтуючыся на вялікім вопыце будаўніцтва ў канкрэтных прыродна-кліматычных умовах, сфарміраваўся шэраг эстэтычных і тэхналагічных падыходаў. Дзякуючы бесперапыннай пераемнасці развіцця (да першай чвэрці XX ст.), адкрытасці да разнастайных стылістычных плыняў, а таксама іх творчаму пераасэнсаванню і перапрацоўцы быў створаны шырокі спектр самабытных вобразных рашэнняў. Народная культывая архітэктурная, пазбаўленая пэўных сацыяльна-культурных установак, характэрных для прафесійнай дзейнасці, у максімальнай ступені рэпрэзентуе характар і ўяўленні аб гармоніі беларускага этнасу.

**Заклучэнне.** Даследаванне стылістычных рашэнняў сучаснага прыходскага храмабудаўніцтва выявіла наступныя праблемы:

- ігнараванне традыцый готыкі і барока, стыляў, у якіх беларускае праваслаўнае дойлідства дасягнула высокага ўзроўню архітэктурна-мастацкіх рашэнняў і нацыянальнай самабытнасці;
- нешматлікае і фрагментарнае выкарыстоўванне спадчыны народнай архітэктуры;
- прыярытэтная арыентацыя на рэтраспектыўна-рускі стыль, які развівае архітэктурныя традыцыі, не характэрныя для беларускага культавага дойлідства.

Вывучэнне вопыту сучаснай праваслаўнай архітэктуры выявіла шэраг праблем, уласцівых вобразнаму рашэнню прыходскіх храмаў:

- адсутнасць цэласнага вобраза, які грунтуецца на багаслоўскай ідэі (праваслаўнага храма ў адпаведнасці з кананічнай традыцыяй і прысвячэннем царквы), складаецца з сістэмы ўзаемаабумоўленых сімвалаў і знакаў;

- вобразы большасці сучасных праваслаўных храмаў пераймаюць рашэнні старадаўняга дойлідства, у выніку чаго страчваецца “праўдзівасць жыцця” аб’екта. Пры неасэнсаваным паўторы традыцыйных вобразаў архітэктар перастае быць сутворцам Бога, што негатыўна ўплывае на ўзровень духоўна-эстэтычнага ўздзеяння вобразнага рашэння царквы.

#### ЛІТАРАТУРА

1. Біблія: Кн. Святога пісання Старога і Новага Завету: Кананічныя: у беларус. пер. / пер. В. Сёмуха. – Duncanville (USA): World Wide Printing, 2002. – 1534 с.
2. Бычков, В.В. Малая история византийской эстетики / В.В. Бычков. – Киев: Путь к истине, 1991. – 407 с.
3. Виноградов, Л. Почему православная архитектура не соблазнилась модернизмом / Л. Виноградов. – М.: Филиппов // Нескучный сад. – 2010. – № 7. – С. 16 – 18.
4. Габрусь, Т.В. Мураваная сакральная архітэктурна беларускіх земляў XI – XIII стст.: старажытнаархітэктурны перыяд / Т.В. Габрусь // Архітэктурна Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславян. і еўрап. кантэксте: у 4 т. Т. 1. IX – XIV стст. / А.І. Лакотка [і інш.]; навук. рэд. А.І. Лакотка. – Мінск, 2005. – Гл. 2. – С. 106 – 211.
5. Габрусь, Т.В. Мураваная харалы: сакральная архітэктурна беларускага барока / Т.В. Габрусь. – Мінск: Ураджай, 2001. – 287 с.
6. Дионисий Ареопагит. Сочинения. Толкования Максима Исповедника / Дионисий Ареопагит, Максим Исповедник. – СПб.: Алетейя, 2002. – 863 с.
7. Камышанов, К. Кирпич в здании Вечности / К. Камышанов // Православие и мир. Ежедневное интернет-СМИ [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.pravmir.ru/nash-kirpich-v-zdani-vechnosti/>. – Дата доступа: 17.10.2012.
8. Кулагін, А.М. Сакральна-манументальнае дойлідства / А.М. Кулагін // Архітэктурна Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславян. і еўрап. кантэксте: у 4 т. Т. 3. Кн. 2. Другая палова XIX – пачатак XX ст. / А.І. Лакотка [і інш.]; навук. рэд. А.І. Лакотка. – Мінск, 2007. – Гл. 2. – С. 120 – 339.
9. Кушнярэвіч, А.М. Культывае дойлідства Беларусі XIII – XVI стст.: Гіст. і архіт.-археал. даслед. / А.М. Кушнярэвіч. – Мінск: Навука і тэхніка, 1993. – 152 с.
10. Лаврецкий, Г. Назад в будущее / Г. Лаврецкий // Архитектура и строительство. – 2004. – № 5. – С. 32 – 34.
11. Лаврецкий, Г.А. Образ человека в церковном зодчестве Беларуси XII века / Г.А. Лаврецкий // Архитектурные тетради. Современные проблемы архитектуры и стратегия архитектурного образования: сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т; архитектурный фак.; под ред. И.А. Иодо. – Минск, 2004. – С. 50 – 55.
12. Морозов, В.Ф. Гражданская и монументальная архитектура Беларуси. Классицизм / В.Ф. Морозов // Архітэктурна Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславян. і еўрап. Кантэксте: у 4 т. Т. 3. Кн. 1. Другая палова XVII – першая палова XIX ст. / А.І. Лакотка [і інш.]; навук. рэд. А.І. Лакотка. – Мінск, 2007. – Гл. 2. – С. 170 – 451.
13. Настольная книга священнослужителя / По благословению Святейшего Патриарха Московского и всея Руси Пимена. – М.: Изд. Моск. Патриархии, 1983. – Т. 4. – 824 с.
14. Сергачев, С.А. Белорусское народное зодчество / С.А. Сергачев. – Минск: Ураджай, 1992. – 255 с.
15. Флоренский, П. Христианство и культура / П. Флоренский. – М.: Изд-во АСТ, 2001. – 672 с.
16. Харэўскі, С. Культывае дойлідства Заходняй Беларусі 1915 – 1940 гг. / С. Харэўскі. – Вільня: ЕГУ, 2008. – 120 с.

Паступіў 17.09.2013

#### FIGURATIVE AND STYLISTIC SOLUTIONS OF MODERN PARISH CHURCHES OF THE BELARUSIAN ORTHODOX CHURCH (EXPERIENCE OF 1991 – 2013)

V. ARABEI

*The article gives an overview of the formation of Orthodox architecture of Belarus, identifies styles and directions in which the construction of Orthodox churches had reached a high artistic level and originality of architectural solutions. Negative trends of the modern period are revealed. Perspective directions of development of religious architecture and their priority style trends, which will identify the distinctive features of the Belarusian Orthodox architecture, are defined. The author emphasizes the primary importance of imaginative solutions, based on which architecture of Orthodox churches should be formed. The main task of the image of the temple and range of diverse functions that must be implemented is formulated. Basic characteristics inherent in Orthodox architecture are defined.*

УДК 726.71(476) (091)

**СТИЛИСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БОГОЯВЛЕННОЙ ЦЕРКВИ В ВИТЕБСКЕ  
КОНЦА XVIII – НАЧАЛА XIX ВЕКА****И.Н. ОЖЕШКОВСКАЯ***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассматривается объемно-планировочное и архитектурно-пластическое решение Богоявленской церкви в Витебске. Доказано, что ее архитектура является примером крестово-купольного храма базиликального типа. На Беларуси появляется еще одно звено в цепочке развития униатских храмов данного типа. Основой исследования послужил анализ архивных материалов, впервые раскрытых автором. Акцент сделан на существовании особой архитектурной школы в Витебске и его регионе на протяжении второй половины XVIII века. Высказана гипотеза о возможности участия Иосифа Фонтана III в проектировании Богоявленского храма или, по крайней мере, о влиянии его творчества на архитектуру униатских храмов Витебска во второй половине XVIII века.*

**Введение.** Любое исследование, связанное с изучением архитектурного наследия Беларуси, не обходит своим вниманием зодчество Витебска. Архитектурную типологию храмов, их стилистические особенности анализировали: Е.Д. Квитницкая, Т.И. Чернявская, Т.В. Габрус, А.Н. Кулагин, Б.А. Лазука, И.Н. Слюнькова, И. Ротко, А.А. Ярошевич, В. Боберский и другие ученые. Если рассматривать наследие Витебска с точки зрения изучения строительства униатских храмов, то и в этом случае город представляет собой особый интерес.

Униатская конфессия существовала на землях Великого Княжества Литовского и Речи Посполитой с 1596 по 1839 год и оказалась самой устойчивой формой объединения христианства. Уния стала отражением всех проблем и противостояний в культуре белорусского общества XVI – первой половины XIX века и принадлежит к тем историческим явлениям, влияние которых ощущается и сегодня. Принадлежность Витебска к Полоцкой униатской епархии, крупнейшему административному, идеологическому и духовному центру, определила и размах строительства униатских храмов, и тенденции стиля, и значимость сооружений. Процесс интеграции католической и православной церкви на изначально православных восточных землях Витебщины отразился в синтезе западноевропейской строительной культуры и традиций православного храмостроения на архитектуре униатских церквей. В контексте взаимодействия двух культур рассматриваются сегодня в современной историографии все вопросы, связанные с изучением архитектурного наследия Беларуси [1]. Изучение строительного наследия униатов происходит в рамках изучения православного или католического зодчества. Специфика униатского храмостроения впервые была рассмотрена на примере монастырского зодчества базилиан в монографиях И.Н. Слюньковой [2; 3].

Возможность выявить тенденции формообразования униатских храмов на основе синтеза восточных и западных христианских традиций и определить их соотношение в униатских храмах в различных исторических условиях можно на анализе архитектуры храмов Витебска. Церкви города могут служить моделью становления и развития типологических особенностей униатских храмов по всей территории Беларуси. Необходимо отметить, что XVIII век для Витебска явился периодом массового строительства каменных храмов, большая часть из которых принадлежала униатам. В городе существовало три базилианских монастыря и не более десятка известных на сегодняшний момент униатских приходских, монастырских церквей и соборов. Работа в архивах открыла один из несохранившихся до наших дней памятников архитектуры Витебска, о котором существует мало сведений, – чертежи Богоявленского собора.

**Основная часть.** Богоявленская, Симеоновская (св. Симеона Столпника) церковь – несохранившийся храм в Задвинье, на берегу Западной Двины. Впервые деревянная церковь св. Симеона упоминается в документе 1539 года [4], изначально была заложена как православная. Позже о существовании храма говорится в инвентаре имущества архиепископии Полоцкой, составленном в 1618 году для униатского полоцкого архиепископа Иосафата Кунцевича [5]. Архитектура деревянного храма св. Симеона Столпника известна по чертежу Витебска 1664 года [6]. Церковь была ориентирована по оси запад – восток. Прямоугольный в плане сруб основного объема был перекрыт двускатной кровлей, в центре которого располагалась небольшая купольная башенка с главкой, увенчанной крестом. Вдоль оси основного объема с восточной стороны к храму примыкал небольшой объем алтарной части, меньший по высоте. Архитектура церкви первой половины XVI века не отличалась сложной трактовкой формы. От обыкновенного жилого дома ее отличали лишь наличие башнеобразного купольного завершения и размеры.

Каменный храм под титулом Богоявленский (название церкви начиная с середины XVII века) был построен на месте деревянной в 1790 – 1805 годах. Очевидно, что именно на этом этапе строительства храм возводился уже как униатский. Еще в первой половине XVII века практически все бывшие православные

церкви были переведены в разряд униатских, строительство же новых каменных православных церквей в сложившихся общественно-политических условиях конца XIX века было невозможно.

В современной историографии из-за отсутствия чертежей Богоявленская церковь не рассматривалась, и в типологическом ряду среди сакральных объектов Беларуси её место определено не было. Самое раннее изображение этой церкви – акварель Ю. Пешки – относится к началу XIX века. Это силуэт храма в классицистическом стиле в общей застройке города. Благодаря архивным источникам появилась возможность изучить чертежи Богоявленской церкви и отнести её к крестово-купольному типу решения униатского храма [7, с. 1]. До сих пор считалось, что таких храмов, возведенных в XVIII веке, на территории Беларуси семь [2, с. 452]. Совсем недавно был выявлен восьмой храм – Успенская церковь базилианского монастыря в местечке Ушачи Витебской области [8, с. 50 – 54]. Таким образом, крестово-купольных униатских соборных храмов XVIII века насчитывается девять, причем шесть из них были построены в самом городе Витебске и его области.

Согласно плану Богоявленская церковь представляла собой трехнефный вытянутый прямоугольник, ширина которого относилась к длине как 1:2, образуя вытянутый латинский крест. Форма плана завершалась одной полукруглой апсидой, которая с двух сторон фланкировалась симметричными сакристями. Алтарём церковь была ориентирована на юг [5]. Трансепт храма выступает всего лишь на ширину толщины стен, что не позволяет должным образом прочесть Т-образную форму плана. В квадрате средокрестия, образующимся при пересечении трансепта и более широкого центрального нефа, установлен купол на круглом световом барабане. Ширина трансепта и ширина центрального нефа совпадают. Два опорных столба, удерживающих купол, значительно более массивные, чем остальные четыре. Столбы имели сложную форму с базами и капителями из стилизованных листьев аканта. Такие же капители венчали собой полуколонны и пилястры фасадов церкви. Притвор был отделен от нартекса выступающей в сторону алтаря стеной с тремя входными проемами, которая служила опорой для хора. Из притвора в боковые башни-колокольни вели винтовые лестницы, установленные симметрично в толщине стен.

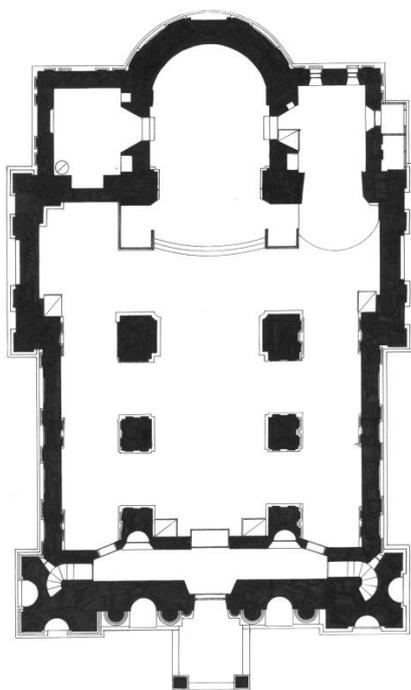


Рис. 1. План Богоявленской церкви в г. Витебске. Чертеж 1912 г.

Они освещались прорубленными узкими окнами, сужающимися наружу. Дневное освещение основного объема храма осуществлялось благодаря оконным проемам, заключенным между группами колонн и расположенными по оси в два ряда. Источником освещения апсиды служило одно большое вытянутое окно, расположенное в центре.

Аналогичные оконные проемы были расположены на концах трансепта и над входным порталом. Входной портик в классицистическом стиле, перекрытый двухскатной кровлей, был вынесен за основной объем храма, образовывал в плане квадрат (рис. 1).

Униатский храм, возведенный после первого раздела Речи Посполитой 1772 года и при проводимой Екатериной II политике веротерпимости, был устроен согласно указам, препятствующим смешению обрядов униатской церкви с католическими. Безусловно, главным смысловым и композиционным акцентом в интерьере Богоявленской церкви являлся иконостас. Перед иконостасом, отделяя алтарную часть от нартекса, выступала солея полукруглой формы. Вокруг нее были расположены отгороженные места для клироса. Справа от иконостаса в одной из сакристей располагался местночтимый престол, по всей видимости, посвященный Симеону Столпнику. В противоположной сакристе размещалась ризница. Внутри стены храма были раскрашены «под серый мрамор», пилястры и карнизы – «под малахит». Своды, купол, алтарь и притвор были расписаны фресковой живописью [9]. Церковь была теплой. Отопительные печи, размещенные при входе из притвора в храм под хорами и в углах трансепта, были установлены как в основном объеме, так и в сакристии.

Традиционно наиболее пластичным в объемно-планировочном решении являлось решение главного северного фасада (рис. 2). Композиционно фасад разбивался на две части, разделенные между собой широким горизонтальным профилем. В оформлении фасадов использовалось чередование декоративных элементов – полукруглых и прямоугольных ниш с полукруглыми и прямоугольными полуколоннами и пилястрами. Наиболее выразительно прослеживалась пластика северного фасада на плане, где очертание притвора, включавшего две угловые башни, выглядело как ажурное сочетание выступающих и заглубленных в плоскость стены элементов: ниш, угловых пилястр и полуколонн, объединенных между собой общим цоколем. Боковые фасады были также раскрепованы выступающими прямоугольными пилястра-

ми, которым с внутренней стороны соответствовали аналогичные пилястры, украшавшие собой интерьер церкви. Фасады выступающих концов трансепта были также завершены треугольными фронтонами с круглыми оконными проемами. Пилястры на этих фасадах становились более крупными и вытягивались по

всей высоте храма. Еще один тип пилястр, самый маленький по высоте, украшал собой фасад сакристии (рис. 3, 4).

Треугольный фронтон как неотъемлемая часть главного фасада поддерживался ритмом небольших одинаковых по размеру аналогичных фронтонов, которые зрительно связывали между собой завершение фасада и входной портик, вместе с оконным проемом, композиционно подчеркивая центральную вертикаль храма. Угловые одноярусные прямоугольные в плане башни-колокольни, фланкирующие широкий фронтон между ними, по своей высоте значительно уступали устремленному ввысь куполу. Форма купола была необычна – скорее не полуциркульного, а эллипсовидного очертания. Завершения башен имели уже совершенно иное криволинейное очертание.

Стилистика Богоявленской церкви соответствует классицизму, но при этом влияние барокко очевидно. Учитывая историю перестроек Витебских униатских храмов, характерных для конца XVIII – начала XIX века, можно предположить, что, возможно, Богоявленский храм был возведен значительно раньше, в первой половине XVIII века, а в 1790 – 1805 годы подвергся перестройке в стиле классицизма. Стилистический анализ выявил несомненную связь между объемно-планировочным и архитектурно-пластическим решением Богоявленской церкви (1790 – 1805 гг.), Успенским собором мужского базилианского монастыря (1743 – 1785 гг.) и Свято-Духовской церкви женского базилианского монастыря (1792 – 1793 гг.)

в Витебске. Автором самого раннего проекта – Успенского собора – является Иосиф Фонтана III. Влияние его профессиональной деятельности, несомненно, отразилось в дальнейшем на архитектуре храмов униатской конфессии. Возможно, Иосиф Фонтана III был также автором не только Успенского собора, но и Богоявленской и Свято-Духовской униатских церквей. Конечно, эта гипотеза требует серьезного подтверждения.

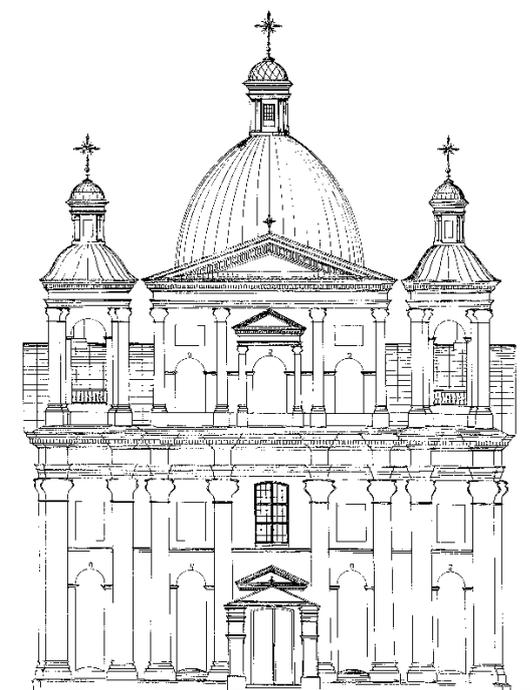


Рис. 2. Главный фасад Богоявленской церкви в г. Витебске. Чертеж 1912 г.

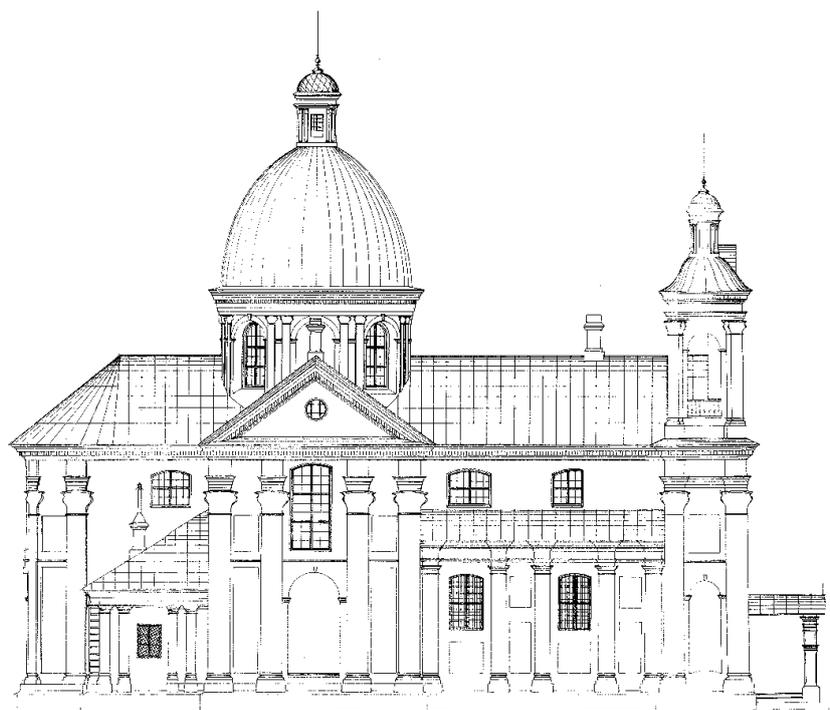


Рис. 3. Боковой фасад Богоявленской церкви в г. Витебске. Чертеж 1912 г.

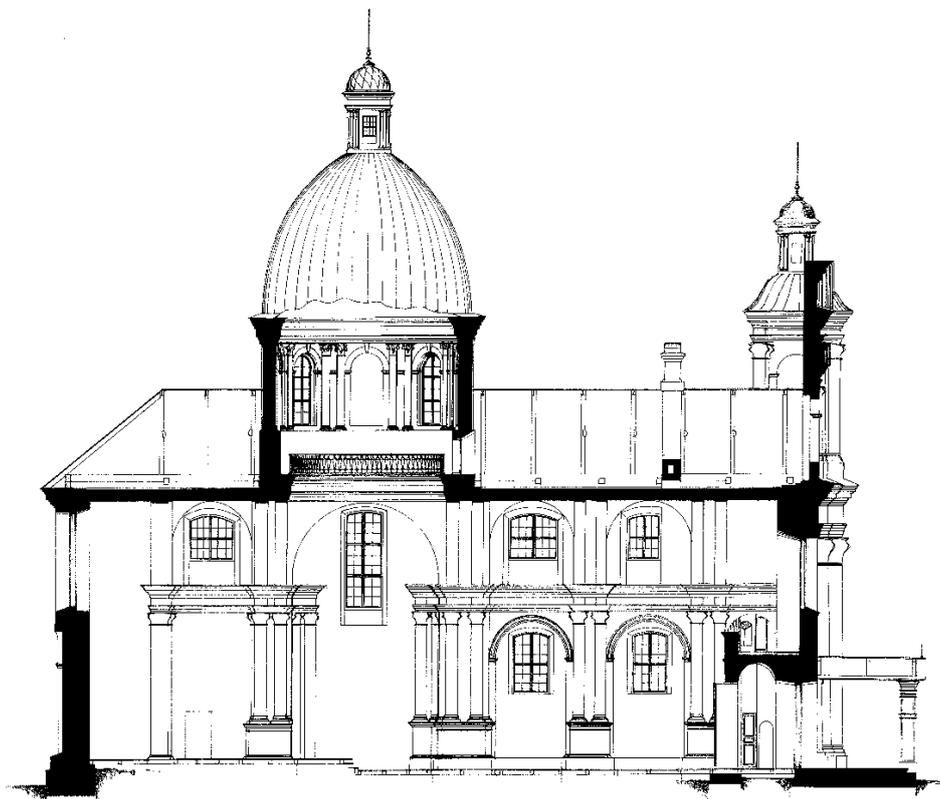


Рис. 4. Продольный разрез Богоявленской церкви в г. Витебске. Чертеж 1912 г.

Среди общих принципов объемно-планировочного решения крестово-купольных униатских храмов Витебского региона можно выделить характерную форму плана в виде вытянутого прямоугольника с поперечным трансептом, который выступает за общий контур сооружения лишь в незначительной степени, что, безусловно, не выявляет в должной степени его Т-образную форму. Наличие одной полукруглой апсиды, которая «утоплена» в общий объем благодаря пристроенным к ней с двух сторон симметричным сакристиям, является еще одной общей типологической чертой планировки храмов. Световой барабан, с куполом, опирающийся на квадрат средокрестия, образованный пересечением трансепта с центральным более широким нефом, совместно с двумя возвышающимися по сторонам башнями-колокольнями делает узнаваемым силуэт Витебских храмов.

Таким образом, напрашивается вывод о существовании в Витебске и его регионе в XVIII веке особой архитектурной школы, выработавшей отличный от других принцип построения соборных базиликальных и городских униатских церквей в стиле классицизма, сохранившем влияние барокко.

В 1839 году с ликвидацией униатской конфессии Богоявленская церковь была передана православным. Во время Великой Отечественной войны храм серьезно пострадал. На сегодняшний день от храма ничего не осталось. Возвращаясь к проблеме сохранения культурного наследия Беларуси, важно понимать значение документальных свидетельств, открывающих нам потерянные духовные ценности.

**Заключение.** Архитектура Богоявленской церкви города Витебска является примером крестово-купольного храма базиликального типа. Таким образом, появляется еще одно звено в цепочке развития униатских храмов данного типа на Беларуси. Становится очевидным факт существования витебской архитектурной школы на протяжении второй половины XVIII века. К концу XVIII века традиции униатского храмостроения определились в сторону постепенного сближения с архитектурой православной российской церкви. В конечном итоге это привело к слиянию символического, пластического, объемно-пространственного образов православной и униатской церкви в единое целое.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Архітэктурна Беларусі. Нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксте: у 6 т. / рэдкал. А. Лакотка (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск: Беларус. навука, 2005 – 2008. – 6 т.

2. Слюнькова, И.Н. Монастыри восточной и западной традиций. Наследие архитектуры Беларуси / И.Н. Слюнькова. – М.: Прогресс-Традиция, 2002. – 598 с.
3. Слюнькова, И.Н. Храмы и монастыри Беларуси XIX века в составе Российской империи. Пересоздание наследия / И.Н. Слюнькова. – М.: Прогресс-Традиция, 2010. – 616 с.
4. Памятная книжка Витебской губернии на 1865 год. – СПб., 1865. – 375 с.
5. Витебская энциклопедия: Богоявленская церковь [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: [evitebsk.com/wiki/Богоявленская церковь](http://evitebsk.com/wiki/Богоявленская_церковь). – Дата доступа: 23.11.2013.
6. Чарняўская, Т.І. Архітэктура Віцебска. 3 гісторыі планіроўкі і забудовы горада / Т.І. Чарняўская. – Мінск: Навука і тэхніка, 1980. – 110 с.
7. Российский государственный исторический архив Санкт-Петербурга (РГИА). – Фонд 835. – Оп. 1. – Д. 762. Проект Богоявленской церкви в Витебске. Фасад, план, разрез. 1912 г. – 1 л.
8. Ожешковская, И.Н. Архитектурный облик Успенской церкви базилианского монастыря в местечке Ушачи во второй половине XIX в.: новые исследования / И.Н. Ожешковская // Архитектура: сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т; под ред. А.С. Сардарова. – Минск: БНТУ, 2013. – Вып. 6. – С. 50 – 55.
9. РГИА. Фонд 799. – Оп. 26. – Д. 872. Дело о рассмотрении рапорта об отпуске средств на ремонт Богоявленской церкви в г. Витебске. 1912 г. – 7 л.

Поступила 06.12.2013

## THE STYLISTIC FEATURES OF BOGOYAVLENSKAYA CHURCH IN VITEBSK OF THE END XVIII – THE BEGINNING OF THE XIX CENTURIES

### I. OZHESHKOVSKAYA

*In article the space-planning and architectural and plastic solution of Bogoyavlenskaya Church in Vitebsk is considered. It is proved that its architecture is an example of the cross-dome temple of basilica-type. In Belarus there is one more link in a development chain of the Greek Catholic temples of this type. The analysis of archival materials which were found for the first time by the author, formed a basis of the research. The article emphasizes is the existence of original architectural school in Vitebsk and its region throughout the 2nd half of the XVIII century. The author stated a hypothesis of possibility of participation of Giuseppe Fontana III in design of the Bogoyavlensky Church or, at least, of the influence of his creative work on architecture of the Greek Catholic temples of Vitebsk in the 2nd half of the XVIII century.*

УДК 726.71

## КАМЕННЫЕ АЛТАРИ XVII ВЕКА НА ТЕРРИТОРИИ СОВРЕМЕННОЙ БЕЛАРУСИ

**И.Р. РАДЗЕВИЧ***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассматриваются каменные алтарные наставы<sup>1</sup> XVII века периода барокко на территории современной Беларуси. Исследуются вопросы, связанные с изучением алтарей XVII века. Представлен анализ и характеристика алтарей на основании собранного материала исследователей Беларуси, Литвы и Польши, архивных материалов и натуральных обследований. Описываются объекты, сохранившиеся до сегодняшнего дня либо утраченные, но облик которых известен на основании фотоматериалов. Отмечено влияние итальянских мастеров на формирование каменных алтарей, находящихся на рассматриваемой территории. Опираясь на натурные обследования, архивный материал и опубликованные учеными-искусствоведами исследования, представляется возможным свести воедино знания о каменных наставах XVII века.*

**Введение.** За последние 30 – 40 лет значительно расширились знания по культовой архитектуре Беларуси. Изучение сакральных объектов несет знания о духовной культуре белорусского народа, а также имеет особую историческую и научную ценность. Тема каменных алтарных настав XVII века получила широкое распространение у белорусских исследователей. Ученые из Польши также неоднократно обращали на них свое внимание. Первым заметил необычный алтарь в Несвиже Stanisław Jorenz. Дальше эту тему поддержали Mariusz Karpowicz [1] и Tadeusz Bernatowicz [2]. Благодаря их стараниям стали известны сведения, касающиеся авторства, времени и места происхождения объекта.

Тамара Габрусь указала на все объекты каменных ретабло, сохранившиеся на территории современной Беларуси [3], а Ольга Баженова рассмотрела общие тенденции белорусской культуры XVII века [4]. Долгое время согласно белорусским исследованиям, а также многочисленным энциклопедическим справочникам гипсовые алтари в костеле каноников регулярных в Михалишках считались работой итальянских мастеров. Первые сомнения в этом вопросе высказал Piotr Jamski [5]. Эти предположения подтвердила Maria Kałamajska-Saeed, проведя натурные обследования с полным архитектурно-художественным анализом алтарей костелов в Михалишках [6] и Ивье [7]. И все же несмотря на обилие напечатанного по данной теме материала, вопрос до сих пор не рассматривался в едином контексте каменных алтарей XVII века, находящихся на территории современной Беларуси.

Таким образом, опираясь на архивные источники и натурные обследования, на многочисленный материал, опубликованный учеными-искусствоведами, представляется целесообразным собрать все эти сведения воедино.

**Основная часть.** На территории Беларуси сохранилось всего 2 алтаря, выполненных из мрамора. К сожалению, не только деревянные, но и каменные алтарные наставы претерпевали существенные изменения внешнего облика на протяжении времени своего существования. Первая каменная алтарная наставка появилась на территории Беларуси в Несвижском костеле иезуитов уже в конце XVI века (рис. 1). Её появлению мы обязаны Радзивиллу «Сиротке». Этот алтарь находится в южном крыле трансепта и имеет достаточно необычную композицию. По своей стилистике его можно отнести к эпохе маньеризма. Это небольшая мраморная наставка с двумя колоннами, выпадающими из баз и капителей, которые поддерживают два больших ангела, а по центру размещена прямоугольная ниша. Верхняя часть алтаря в форме гипсового барельефа была изготовлена в середине XVIII века во время изменения всего интерьера и устройства новых каменных алтарей. Что касается самого мотива визуального разрушения конструкции, то он не является уникальным. Аналогичный прием можно найти в боковом алтаре костела иезуитов Сан Феделе в Милане (рис. 2). Однако несмотря на общность тематического решения, композиционно эти объекты имеют существенные отличия. По исследованиям Тадеуша Бернатовича, алтарь был куплен Радзивиллом Сироткой в Венеции, проезжая по пути на Святую землю в 1580 – 1582 годах. Вероятнее всего, был заказан как главный алтарь для первого каменного храма, разобранный в 1586 году [2, с. 31].

Исходя из анализа композиции, наставка утратила первоначальное завершение еще во время войны середины XVII века. Это предположение подтверждают и реставрированные руки стоящих ангелов. Поздними являются и ангелочки, сидящие у базы колонн. Анализ мрамора и скульптур алтарной наставы

---

<sup>1</sup> Алтарная наставка (лат. retablo) – декорация заалтарного пространства, которая может быть нарисована на стене, выполненная в форме барельефа, либо в виде отдельно стоящей конструкции.

а также стоящих рядом фамильных надгробных таблиц позволил Тадеушу Бернатовичу установить, что основа исследуемого алтаря принадлежит итальянскому архитектору каменщику Cesare Franco, а автором скульптуры, вероятнее всего, был Girolam Campagni.

В первой трети XVII века в костелах, находящихся на территории современной Беларуси, появляется ряд алтарей из мрамора и алебаstra. В бернардинском костеле в Ивье на пожертвования Миколая Кишки в 1621 году был поставлен алтарь св. Анны из алебаstra [7, с. 61]. Для его изготовления был приглашен скульптор из Львова Андрей Бемер. В этом же костеле в 1643 году поставил каменный алтарь виленский мастер Jakub Tencalle, один из мастеров каплицы св. Казимира при кафедральном костеле. Судя по описанию интерьер костела был украшен высокопрофессиональными работами с нетривиальными решениями. Однако все это было разрушено во время московского наезда в 1656 году [7, с. 61].

Около 1630 года на пожертвования канцлера ВКЛ Льва Сапеги были поставлены мраморные алтарные наставы в костеле бернардинок в Вильно и в парафиальном костеле в Ружанах. Но несмотря на то, что эти объекты были поставлены одним и тем же фундатором, в их композициях не находим ничего общего. Алтарная наставка в Вильно представляет трехъярусную композицию, на три оси, с использованием разноцветного мрамора и скульптур. Алтарь в Ружанах представлен одноярусной композицией с двумя парами колонн по бокам (рис. 3). Уникальной его особенностью является то, что только две боковые колонны из черного мрамора, а две внутренние и фронтон выполнены из кирпича и покрашены в черный цвет. Предположение о том, что такое решение появилось вследствие разрушений, произошедших во время войны 1654 – 1667 годов, вызывает определенные сомнения, так как на присутствие мрамора в центре наставки обращается внимание еще в описаниях алтаря 1633 года [8, с. 86; 9, с. 1]. Вероятно, на такое решение подтолкнуло наличие купленного материала. Учитывая, что мрамор закупался за границей и дорого стоил, донатор, вероятнее всего, купил его по случаю, совместно с другими заказами. В 1779 году Александр Сапега провел реконструкцию внешнего облика костела, а вместе с тем и интерьера. По всей видимости, некоторые части были позолочены и в завершении алтаря установлено всевидящее око в золотых лучах.



Рис. 1. Боковой алтарь св. Креста в Несвижском костеле иезуитов



Рис. 2. Боковой алтарь костела иезуитов Сан Феделе в Милане



Рис. 3. Главный алтарь парафиального костела в Ружанах

Приблизительно к этому же периоду относится мраморный главный алтарь костела францисканцев в Гольшанах. Первый каменный костел под титулом св. Яна Крестителя был построен на пожертвования Павла Сапеги около 1616 года. Это было здание в форме креста с большим куполом по центру [10, с. 184]. После перестройки костела изменилась ориентация главного алтаря с востока на запад, а разобранный мраморный алтарь так и не был больше установлен в интерьере. Об этом свидетельствует историческое воспоминание в 1849 году ксендза Тонкуля (ks. Tonkul) о том, что настоятель францисканского монастыря приказал нарисовать на стене иллюзионистическую алтарную наставку, а бывший глав-

ный алтарь из мрамора велел продать Хрептовичу в Вишнево<sup>2</sup>. Дальнейшая судьба его осталась неизвестной, однако в костеле в Вишнево он так и не появился [11]. Возможно, его отдельные части были проданы в Варшаву как строительный материал для надгробия Еремея Хрептовича, который был связан семейными узами с Вишневом [12]. Но даже если это предположение верно и такое надгробие действительно существовало в костеле отцов капуцинов в Варшаве, то оно было разрушено полностью во время Второй мировой войны.

После разрушительной войны 1654 – 1667 годов Речи Посполитой против Государства Российского и Швеции исполнение алтарных настав из благородного камня так и не возобновилось. В последней трети XVII века на территории ВКЛ появляются каменные алтари, выполненные в технике «стукко». Местом локализации возводимых объектов стал город Вильно, куда для декорации интерьеров костелов были приглашены итальянские мастера *Giovani Pietro Pierti* и *Giovani Maria Galli*. Первая декорация из гипса появилась в костеле августинцев св. Петра и Павла на Антоколе (рис. 4). Работы проводились с 1677 по 1686 год [13, с. 95]. Интерьер был исполнен скульптурными композициями, которые украшали алтарные наставы, стены и своды. Последующими объектами, в которых была применена лепнина из стукка, стали алтарь и купол каплицы св. Казимира кафедрального костела в Вильно (1688 – 1692 гг.) и костел тринитариев на Антаколе. Автором декоративного оформления в обоих случаях выступил *Giovani Pietro Pierti* [13, с. 68, 101].

На территории современной Беларуси аналогичной стукковой декорацией отличается костел августинцев в Михалишках (рис. 5).



Рис. 4. Боковой алтарь костела св. Петра и Павла в Вильно



Рис. 5. Главный алтарь костела каноников регулярных в Михалишках

Несмотря на визуальную схожесть решений, в скульптурах и декоративном орнаменте имеются значительные отличия от виленских костелов. Долгое время считалось, что авторами декоративного оформления, выполненного в 1684 – 1686 годах, были итальянские мастера *Giovani Pietro Pierti*, *Giovani Maria Galli* и местный мастер Микола Жилевич [3]. Однако польские ученые поставили под сомнения эти утверждения. Исследования *Marii Kaiamajskiej-Seed* подтвердили версию о возможности более поздней постройки костела и интерьера. Начало строительство здания приходится на 80-е годы XVII века. Оформление интерьера можно датировать около 1700 года, так как по описанию на 1695 год внутри костела находились лишь временные иллюзионистические алтари [6, с. 131 – 147]. Проанализировав динамику движения и мимику скульптур, *Piotr Jamski* заметил принципиальные различия между способами

<sup>2</sup> Wspomnienie historyczne – ks. Tonkul: Gwardyan tego kościoła franciszkanin siomawszy oitarz wielki marmurowy ktery siużył na wschod obracii go na zachod jak jest dzień. Lecz zamiast ziożenia tego oitarza marmurowego kazai na scianie wymalowaj oitarz optycznego malowidia, a marmurowy sprzedai Chreptowiczowi do Wiszniowa.

изготовления декоративного оформления в этих костелах. В сравнении с костелом св. Петра и Павла скульптуры в костеле в Михалишках менее экспрессивны, имеют другие пропорции тела и более скованную мимику, а орнаментальное оформление носит более упрощенный характер. Все это указывает, скорее, на местных мастеров, а флорентийский мастер Pietro Pierti возможно лишь осуществлял надзор за исполнением работ [5]. И тем не менее непосредственное влияние виленских интерьеров на костел в Михалишках очевиден. Принадлежность к одному и тому же монашескому ордену августинцев и географическая близость объектов лишь поддерживает эту связь.

Однако, несмотря на общую визуальную схожесть декоративного оформления интерьера, можно заметить и существенные отличия в композиционных решениях алтарей. Все 7 гипсовых алтарей костела св. Михаила Архангела отличаются как расположением внутри костела, так и своей внешней формой. Четыре боковых алтаря вдоль стен вообще имеют уникальные решения стола-менсы и одноярусной наставы. По сути, они являются лишь декоративным оформлением пространства и не несут никакой литургической нагрузки. При исследовании декоративных элементов необходимо учитывать и тот факт, что алтари в Михалишках подвергались многократным ремонтным работам, которые сильно ухудшили их первоначальную скульптурную форму. По меньшей мере 2 раза они очищались и реставрировались от неправильной покраски. В результате последнего ремонта, проведенного в 1999 году, было выбрано неправильно не только колористическое решение, но и окраска водоэмульсионной краской, которая привела к нарушению структуры гипса.

**Заключение.** В процессе изучения каменных ретабло XVII века становится очевидным, что все они так или иначе подвергались влиянию итальянской архитектуры. Некоторые из них были выполнены непосредственно итальянскими мастерами, как объекты в Несвиже и Вильно, другие же наследовали форму и технику изготовления.

По результатам исследований каменных алтарей XVII века, их строительство условно можно разделить на два основных периода:

- *первый – до войны 1654 – 67 годов* характеризуется применением алтарных настав из природного камня (мрамор и алебастр). В связи с тем, что на территории ВКЛ не было месторождений мрамора, все детали алтаря закупались за границей, очевидно, вместе с проектом. Можно также предположить, что и мастера по установке были неместными. Приобретение таких алтарей было дорогостоящим, позволить себе это могли лишь самые могущественные магнаты, такие как Сапегы, Радзивиллы и Кишки. В связи с тем, что проекты покупали в заграничных мастерских, то именно там наследовали и характер самой архитектуры;

- *второй период* создания каменных алтарей длился с 1677 года до начала XVIII века. В это время начинается строительство алтарей из гипса. Технологию изготовления алтарей с применением технологии стукко привезли на земли ВКЛ мастера из Италии. Материал для таких алтарных настав был доступным и сравнительно недорогим, однако требовал хорошей подготовки мастера. Период украшения интерьеров костелов с использованием стукко длился около 30 лет. По всей видимости, трудоемкая работа и отсутствие соответствующей подготовки учеников не позволила развиваться этой технике дальше. После «Северной войны» и эпидемии холеры не было больше построено ни одного алтаря в камне. Следующий этап возведения каменных алтарных настав наступил лишь в середине XVIII века с приходом «Виленского барокко».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Karpowicz, M. Niezwykly oltarz w Nieswizu Pellegrino Pellegrini I Radziwiii «Sierotka» / M. Karpowicz // Biuletyn Historii Sztuki R.LIV. – Warszawa. – 1992. – № 2. – S. 62 – 64.
2. Bernatowicz, T. Rzeźby Campagni I Franco w Nieńwieiu a wczesny barok / T. Bernatowicz // Biuletyn Historii Sztuki R.LIV. – Warszawa. – 1992. – № 4. – S. 31 – 48.
3. Габрусь, Т.В. Мураваныя харалы: Сакрал. архітэктурa бел. барока / Т.В. Габрусь. – Мінск: Ураджай, 2001. – 286 с.
4. Баженова, О.Д. Первое европейское признание белорусской культуры эпохи барокко: Белорусы в Москве XVII в. / сост. О.Д. Баженова, Т.В. Белова. – Минск: Белорус. энцикл. им. П. Бровки, 2013. – 472 с.
5. Jamski, P. Dekoracja rzeźbiarska kościoła trynitarzy na Antokolu / P. Jamski // Sztuka kresyw wschodnich: materiały sesji naukowej, Kraków, październik 1996. T. 3 / pod red. Jana K. Ostrowskiego; Instytut Historii Sztuki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Koło Naukowe Studentów Historii Sztuki UJ. – Kraków: “Text”, 1998. – 325 s.

6. Kaiamajska-Saeed, M. Końcioi parafialny P.W. Њw. Michaia Archanioia I klasztor kanonikyw od pokuty w Michaliszkach: Końcioiy i klasztory rzymskokatolickie dawnego wojewydzstwa wileckiego / M. Kaiamajska - Saeed. T. 1 / red. nauk. Maria Kaiamajska-Saeed; Miedzynarodowe Centrum Kultury w Krakowie. – Krakow: MCK, 2005. – 374, [2] s., [363] s.
7. Kaiamajska-Saeed, M. Końcioi parafialny p.w. Piotra I Pawia oraz klasztor Bernardynyw w Iwiu.: Końcioiy i klasztory rzymskokatolickie dawnego wojewydzstwa wileckiego / M. Kaiamajska-Saeed. T. 4 / red. nauk. Maria Kaiamajska-Saeed; Miedzynarodowe Centrum Kultury w Krakowie. – Krakow: MCK, 2011 [285] s.
8. Акты визитаций костелов 1633 – 41 г. // Библ. Виленского ун-та (BUV). – Ф. 57-Б.53-40.
9. Хроника костела парафiального в Ружанах 1849 г. // Библ. Виленского ун-та (BUV). – Ф. 4 36189 (А-2856).
10. Визиты костелов францисканских 1666 г. // Библ. Виленского ун-та (BUV). – Ф. 4 36467 (А-3862).
11. Радзевич, И. Новые сведения об историческом статусе костела Благовещения Девы Марии в д. Вишнево / И. Радзевич // Сохранение архитектурно-исторического наследия – основа устойчивого развития городов: науч.-практ. конф., Минск, Замковый комплекс «Мир» Гродненской области Респ. Беларусь, 3 – 5 нояб. 2011 г. – Минск, 2011. – С. 78 – 79.
12. Wardzycski, M. Nagrobek Pawia Sapiegi I jego ion w końsciele oo. Franciszkonyw w Holszanach Litwa Polska.: Litwa i Polska: dziedzictwo sztuki sakralnej / pod red. Wojciecha Boberskiego i Maigorzaty Omilanowskiej; [wspiypr. red. Dariusz Konstantynyw et al.]; Instytut Sztuki Polskiej Akademii Nauk. – Warszawa: DiG, 2004.
13. Wilecska architektura sakralna doby baroku: dewastacja i restauracja / fot. Kkstutis Stoљkus; [ti. Jakub Sito, Maigorzata Omilanowska]. – Marburg: Herder-Institut; Warszawa: Instytut Sztuki PAN, 2005. – [206], [1] s.

Поступила 04.12.2013

## STONE ALTARS OF 17<sup>TH</sup> CENTURY IN THE TERRITORY OF MODERN BELARUS

### I. RADZEVICH

*Article is devoted to studying catholic stone altars of 17<sup>th</sup> century of the Baroque period in the territory of modern Belarus. The analysis and the characteristics of altars on the basis of data obtained by researchers of Belarus, Lithuania and Poland, archival materials and on-site investigations are given. In article the objects which have remained to the present time or lost but which shape is known on the basis of photographic materials are described. Influence of the Italian masters on formation of the stone altars which are in Belarussian territory is specified. Relying on on-site investigations, archival materials and the research of art critics, it is possible to bring together knowledge about stone altars of XVII.*

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.042.12

### ПРЕДПОСЫЛКИ, МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УСИЛЕННЫХ В ЗОНЕ СРЕЗА ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Предлагается новая, научно обоснованная методика расчета прочности и трещиностойкости усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов, учитывающая напряженно-деформированное состояние элементов при усилении, различные физико-механические характеристики материалов усиливаемого и усиливающего элементов и имеющая в сравнении с существующими эмпирическими методиками расчета более выраженный физический смысл. На основании предлагаемой методики разработана программа расчета на ЭВМ, позволяющая вычислять параметры напряженно-деформированного состояния усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов и производить расчеты по первой и второй группам предельных состояний при действии в зоне среза полной комбинации внутренних усилий.*

Анализ усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов имеет ряд особенностей, связанных с наличием начального напряженно-деформированного состояния усиливаемого элемента от действия внутренних усилий при усилении, различием физико-механических характеристик основной и дополнительной поперечной арматуры, основного и дополнительного бетона, с предварительным напряжением дополнительной поперечной арматуры и совместным действием поперечных и продольных усилий, а также изгибающих моментов.

Предлагаемая методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, основана на общей деформационной модели [1] и положениях модифицированной теории полей сжатия [2 – 6], учитывает вышеназванные особенности напряженно-деформированного состояния усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов.

**Предпосылки расчета и уравнения напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов, усиленных в зоне среза.** Предлагаемая методика расчета усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов основывается на следующих, кроме допущений, принятых в модифицированной теории полей сжатия, *предпосылках*:

- условие совместной работы усиливаемого и усиливающего элементов по контакту в продольном и поперечном направлениях при восприятии внешней нагрузки, прикладываемой к усиленному элементу после усиления;
- неизменность сдвиговых модулей бетона усиливаемого и усиливающего элементов при суммировании касательных деформаций и касательных напряжений до и после усиления [7];
- гипотеза плоских сечений для распределения относительных деформаций по высоте сечения усиливаемого элемента до усиления, элементов усиления, а также для приращений относительных деформаций основного сечения элемента в постановке В.И. Мурашова – Я.М. Немировского [8 – 9];
- угол наклона к продольной оси главных напряжений от полной нагрузки принимается равным углу наклона главных напряжений от приращения нагрузки после усиления на усиленный в зоне среза изгибаемый железобетонный элемент.

При работе под нагрузкой усиленного в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента наблюдаются две характерные стадии: первая стадия – работа под нагрузкой усиливаемого элемента до усиления; вторая стадия – работа под нагрузкой усиленного в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента после усиления.

Рассмотрим поперечное сечение изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза под нагрузкой.

Согласно деформационной модели для плоской задачи поперечное сечение железобетонного элемента рассматривается как совокупность элементарных площадок-слоев и продольных арматурных стержней основного и дополнительного элементов, в пределах которых нормальные напряжения считаются равномерно распределенными, равными средним значениям.

Согласно модифицированной теории полей сжатия для изгибаемых железобетонных элементов распределение касательных напряжений по высоте элементарных площадок-слоев принимается равномерным, а поперечная арматура – равномерно распределенной вдоль продольной оси элемента со степенью поперечного армирования для поперечной арматуры:

- основного элемента до усиления

$$\rho_{sy,0} = \frac{A_{sy}}{bs}, \quad (1)$$

где  $A_{sy}$ ,  $s$  – соответственно площадь, шаг поперечной арматуры усиливаемого элемента;  $b$  – ширина усиливаемого элемента;

- основного элемента после усиления с учетом наращивания сечения

$$\rho_{sy,0,ad} = \frac{A_{sy}}{(b+b_{ad})s}, \quad (2)$$

где  $b_{ad}$  – ширина дополнительного бетона усиленного элемента;

- дополнительной после усиления с учетом наращивания сечения

$$\rho_{sy,ad} = \frac{A_{sy,ad}}{(b+b_{ad})s_{ad}}, \quad (3)$$

где  $A_{sy,ad}$ ,  $s_{ad}$  – соответственно площадь, шаг дополнительной поперечной арматуры усиленного элемента;

- дополнительной после усиления без увеличения поперечного сечения элемента

$$\rho_{sy,ad} = \frac{A_{sy,ad}}{bs_{ad}}. \quad (4)$$

На первой стадии работы (рис. 1) параметры напряженно-деформированного состояния усиливаемого элемента в момент усиления определяются из решения следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} = N; \\ \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i (y_{c,i} - y_0) + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_0) = M; \\ \sum_{i=1}^n \tau_{xy,i} b_i h_i = V; \\ \varepsilon_{x,i} = \frac{1}{r} (y_{c,i} - y_0) + \frac{N}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i}}; \\ \sigma_{c1,i} = f(\varepsilon_{c1,i}); \quad \sigma_{c2,i} = f(\varepsilon_{c2,i}); \quad \sigma_{sx,i} = f(\varepsilon_{sx,i}); \quad \sigma_{sy,i} = f(\varepsilon_{sy,i}); \\ \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{c2,i} \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \sin^2 \theta_i; \\ \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{c2,i} \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cos^2 \theta_i; \\ \sigma_{cy,i} = \sigma_{c2,i} \sin^2 \theta_i + \sigma_{c1,i} \cos^2 \theta_i + \rho_{sy,0} \sigma_{sy,i}; \\ \tau_{xy,i} = (-\sigma_{c2,i} + \sigma_{c1,i}) \sin \theta_i \cos \theta_i, \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $\sigma_{cx,i}$  – проекция на продольную ось элемента нормальных напряжений в бетоне в  $i$ -й элементарной площадке усиливаемого элемента;  $\sigma_{sx,i}$  – нормальные напряжения в продольной арматуре в  $i$ -м арматурном стержне усиливаемого элемента;  $b_i$ ,  $h_i$  – соответственно ширина и толщина  $i$ -й элементарной площадки бетона усиливаемого элемента;  $A_{s,i}$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го стержня продольной арматуры усиливаемого элемента;  $y_{c,i}$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести  $i$ -й элементарной площадки бетона;  $y_{s,i}$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести  $i$ -го стержня продольной арматуры;  $y_0$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения усиливаемого элемента;  $\tau_{xy,i}$  – кас-

тельные напряжения в  $i$ -й элементарной площадке сечения усиленного элемента;  $\varepsilon_{x,i}$  – проекция относительных деформаций в  $i$ -й элементарной площадке бетона или стержне продольной арматуры на продольную ось элемента в момент усиления;  $1/r$  – кривизна сечения усиленного элемента, определяемая по формуле

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i (y_{c,i} - y_{c0})^2 + \sum_{i=m+1}^n E'_{cx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_{c0})^2}; \quad (6)$$

$E'_{c,i}$ ,  $E'_{cx,i}$  – соответственно секущий модуль деформаций бетона  $i$ -й элементарной площадки  $i$ -го стержня продольной арматуры усиленного элемента;  $\theta_i$  – угол наклона главных напряжений по отношению к продольной оси в  $i$ -й элементарной площадке бетона усиленного элемента;  $\varepsilon_{x,i}$  – проекция относительных деформаций на продольную ось элемента при усилении в  $i$ -й элементарной площадке бетона или  $i$ -м стержне продольной арматуры;  $\varepsilon_{y,i}$  – проекция относительных деформаций на поперечную ось элемента при усилении в  $i$ -й элементарной площадке бетона с учетом поперечной арматуры;  $\varepsilon_{c1,i}$ ,  $\varepsilon_{c2,i}$  – соответственно относительные деформации по направлению главных растягивающих и главных сжимающих напряжений в  $i$ -й элементарной площадке бетона с учетом поперечной арматуры;  $\sigma_{c1,i}$ ,  $\sigma_{c2,i}$  – соответственно главные растягивающие и главные сжимающие напряжения в  $i$ -й элементарной площадке бетона с учетом поперечной арматуры при усилении;  $\sigma_{sx,i}$ ,  $\sigma_{sy,i}$  – соответственно нормальные напряжения в  $i$ -м стержне продольной арматуры, нормальные напряжения в поперечной арматуре в  $i$ -й элементарной площадке бетона с учетом поперечной арматуры.

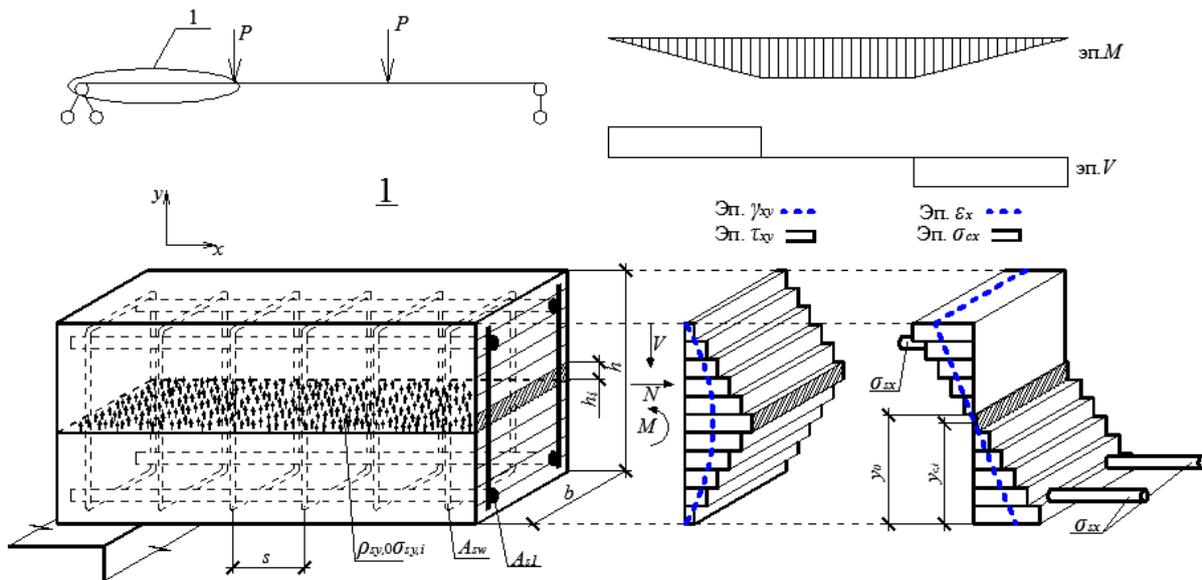


Рис. 1. Распределение касательных и нормальных деформаций и напряжений в усиленном в зоне среза изгибаемом железобетонном элементе на первой стадии работы

Первые три уравнения в системе (5) являются условиями равновесия для рассматриваемого поперечного сечения зоны среза усиленного элемента; четвертое уравнение описывает распределение проекций относительных деформаций на продольную ось по высоте сечения элемента в соответствии с принятой гипотезой плоских сечений; с пятого по восьмое – соответственно принятые аппроксимации диаграмм деформирования бетона в условиях двухосного напряженного состояния при растяжении и сжатии продольной и поперечной арматуры; девятое и десятое – уравнения совместности относительных деформаций для плоской  $i$ -й элементарной площадки; два последних – уравнения равновесия для  $i$ -й элементарной площадки в поперечном направлении в соответствии с модифицированной теорией полей сжатия.

При этом расчет параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента в зоне среза на первой стадии его работы выполняется от действия внутренних усилий ( $M$ ,  $N$ ,  $V$ ) от внешней нагрузки в момент усиления.

Решение системы уравнений (5) позволяет получить распределение относительных деформаций растяжения-сжатия и касательных деформаций, а также нормальных и касательных напряжений по высоте поперечного сечения элемента от действия внутренних усилий на первой стадии.

На второй стадии (рис. 2) параметры напряженно-деформированного состояния усиленного в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента от нагрузки, приложенной к элементу после усиления, предлагается определять из решения следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i + \sum_{j=1}^k \sigma_{cx,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} + \sum_{j=k+1}^l \sigma_{sx,ad,j} A_{s,ad,j} = N + \Delta N; \\
 & \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i (y_{c,i} - y_{0,ad}) + \sum_{j=1}^k \sigma_{cx,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} (y_{c,ad,j} - y_{0,ad}) + \\
 & + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_{0,ad}) + \sum_{j=k+1}^l \sigma_{sx,ad,j} A_{s,ad,j} (y_{s,ad,j} - y_{0,ad}) = M + \Delta M; \\
 & \sum_{i=1}^n (\tau_{xy,i[1]} + \tau_{xy,ad,i}) b_i h_i + \sum_{j=1}^l \tau_{xy,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} = V + \Delta V; \\
 & \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{x,i[1]} + \varepsilon_{x,ad,i}; \quad \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{y,i[1]} + \varepsilon_{y,ad,i}; \\
 & \varepsilon_{x,ad,i} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{c,i} - y_{0,ad}) + \frac{\Delta N}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i} + \sum_{j=1}^k E'_{c,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} + \sum_{j=k+1}^l E'_{sx,ad,j} A_{s,ad,j}}; \\
 & \varepsilon_{x,ad,j} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{c,ad,j} - y_{0,ad}) + \frac{\Delta N}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i} + \sum_{j=1}^k E'_{c,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} + \sum_{j=k+1}^l E'_{sx,ad,j} A_{s,ad,j}}; \\
 & \sigma_{c1,i} = f(\varepsilon_{c1,i}); \quad \sigma_{c2,i} = f(\varepsilon_{c2,i}); \quad \sigma_{sx,i} = f(\varepsilon_{sx,i}); \quad \sigma_{sy,i} = f(\varepsilon_{sy,i}); \\
 & \sigma_{c1,ad,j} = f(\varepsilon_{c1,ad,j}); \quad \sigma_{c2,ad,j} = f(\varepsilon_{c2,ad,j}); \quad \sigma_{sx,ad,j} = f(\varepsilon_{sx,ad,j}); \quad \sigma_{sy,ad,j} = f(\varepsilon_{sy,ad,j}); \\
 & \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{c2,i} \cdot \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cdot \sin^2 \theta_i; \quad \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{c2,i} \cdot \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cdot \cos^2 \theta_i; \\
 & \varepsilon_{x,ad,i} = \varepsilon_{c2,ad,i} \cdot \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,ad,i} \cdot \sin^2 \theta_i; \quad \varepsilon_{x,ad,j} = \varepsilon_{c2,ad,j} \cdot \cos^2 \theta_j + \varepsilon_{c1,ad,j} \cdot \sin^2 \theta_j; \\
 & \varepsilon_{y,ad,i} = \varepsilon_{c2,ad,i} \cdot \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,ad,i} \cdot \cos^2 \theta_i; \quad \varepsilon_{y,ad,j} = \varepsilon_{c2,ad,j} \cdot \sin^2 \theta_j + \varepsilon_{c1,ad,j} \cdot \cos^2 \theta_j; \\
 & \sigma_{cy,ad,i} = \sigma_{c2,ad,i} \sin^2 \theta_i + \sigma_{c1,ad,i} \cos^2 \theta_i + \rho_{sy,0,ad} \sigma_{sy,ad,i} + \rho_{sy,ad} \sigma_{sy,ad,j}; \\
 & \sigma_{cy,ad,j} = \sigma_{c2,ad,j} \sin^2 \theta_j + \sigma_{c1,ad,j} \cos^2 \theta_j + \rho_{sy,0,ad} \sigma_{sy,ad,i} + \rho_{sy,ad} \sigma_{sy,ad,j}; \\
 & \tau_{xy,ad,i} = (-\sigma_{c2,ad,i} + \sigma_{c1,ad,i}) \cdot \sin \theta_i \cos \theta_i; \quad \tau_{xy,ad,j} = (-\sigma_{c2,ad,j} + \sigma_{c1,ad,j}) \cdot \sin \theta_j \cos \theta_j,
 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где  $\sigma_{cx,ad,j}$ ,  $\sigma_{sx,ad,j}$  – соответственно проекция на продольную ось усиленного элемента нормальных напряжений в дополнительном бетоне в  $j$ -й элементарной площадке, нормальные напряжения в дополнительной продольной арматуре в  $j$ -м арматурном стержне усиленного элемента;  $b_{ad,j}$ ,  $h_{ad,j}$  – соответственно ширина и высота  $j$ -й элементарной площадки дополнительного бетона усиленного элемента;  $A_{s,ad,j}$  – площадь поперечного сечения  $j$ -го стержня дополнительной продольной арматуры усиленного элемента;  $y_{c,ad,j}$ ,  $y_{s,ad,j}$  – соответственно расстояние от выбранной оси до центра тяжести  $j$ -й элементарной площадки дополнительного бетона,  $j$ -го стержня дополнительной продольной арматуры усиленного элемента;  $N$ ,  $M$ ,  $V$  – соответственно продольная сила, изгибающий момент и поперечная сила, действующие на сечение изгибаемого железобетонного элемента в момент усиления;  $\Delta N$ ,  $\Delta M$ ,  $\Delta V$  – приращения внутренних усилий в изгибаемом железобетонном элементе после его усиления в зоне среза;  $1/r_{ad}$  – кривизна сечения элемента, усиленного в зоне среза, от приращения комбинации внутренних усилий  $\Delta N$ ,  $\Delta M$ ,  $\Delta V$ , определяемая по формуле

$$\frac{1}{r_{ad}} = \frac{\Delta M}{\left( \sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i (y_{c,i} - y_{0,ad})^2 + \sum_{i=m+1}^n E'_{cx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_{0,ad})^2 + \right.} \quad (8)$$

$$\left. + \sum_{j=1}^k E'_{c,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} (y_{c,ad,j} - y_{0,ad})^2 + \sum_{j=k+1}^l E'_{cx,ad,j} A_{s,ad,j} (y_{s,ad,j} - y_{0,ad})^2 \right)$$

$\tau_{xy,ad,i}$ ,  $\tau_{xy,ad,j}$  – соответственно касательные напряжения в бетоне  $i$ -й элементарной площадки основного бетона, в  $j$ -й элементарной площадке дополнительного бетона от приращения внутренних усилий в сечении элемента после усиления;  $\tau_{xy,i[1]}$ ,  $\epsilon_{x,i[1]}$ ,  $\epsilon_{y,i[1]}$  – соответственно касательные напряжения, проекция относительных деформаций на продольную ось элемента при усилении в  $i$ -й элементарной площадке бетона или в  $i$ -м стержне продольной арматуры, проекция относительных деформаций на поперечную ось элемента при усилении в  $i$ -й элементарной площадке основного бетона с учетом поперечной арматуры, полученные на первой стадии расчетов;  $\epsilon_{x,ad,i}$ ,  $\epsilon_{x,ad,j}$  – соответственно проекция относительных деформаций на продольную ось элемента в  $i$ -й элементарной площадке основного бетона или в  $i$ -м стержне основной продольной арматуры, проекция относительных деформаций на продольную ось элемента в  $j$ -й элементарной площадке дополнительного бетона или в  $j$ -м стержне дополнительной продольной арматуры от приращения внутренних усилий в элементе после усиления;  $\epsilon_{c1,ad,i}$ ,  $\epsilon_{c1,ad,j}$  – соответственно относительные деформации по направлению главных растягивающих напряжений в  $i$ -й элементарной площадке основного бетона с учетом поперечной арматуры, в  $j$ -й элементарной площадке дополнительного бетона с учетом поперечной арматуры от приращения внутренних усилий в элементе после усиления;  $\epsilon_{c2,ad,i}$ ,  $\epsilon_{c2,ad,j}$  – соответственно относительные деформации по направлению главных сжимающих напряжений в  $i$ -й элементарной площадке основного бетона с учетом поперечной арматуры, в  $j$ -й элементарной площадке дополнительного бетона с учетом поперечной арматуры от приращения внутренних усилий в элементе после усиления;  $E'_{sx,ad,j}$ ,  $E'_{sy,ad,j}$ ,  $A'_{s,ad,j}$  – соответственно секущие модули деформаций дополнительной продольной и поперечной арматуры, площадь поперечного сечения  $j$ -го стержня дополнительной продольной арматуры;  $\theta_j$  – угол наклона главных напряжений по отношению к продольной оси в  $j$ -й элементарной площадке дополнительного бетона с учетом поперечной арматуры после усиления.

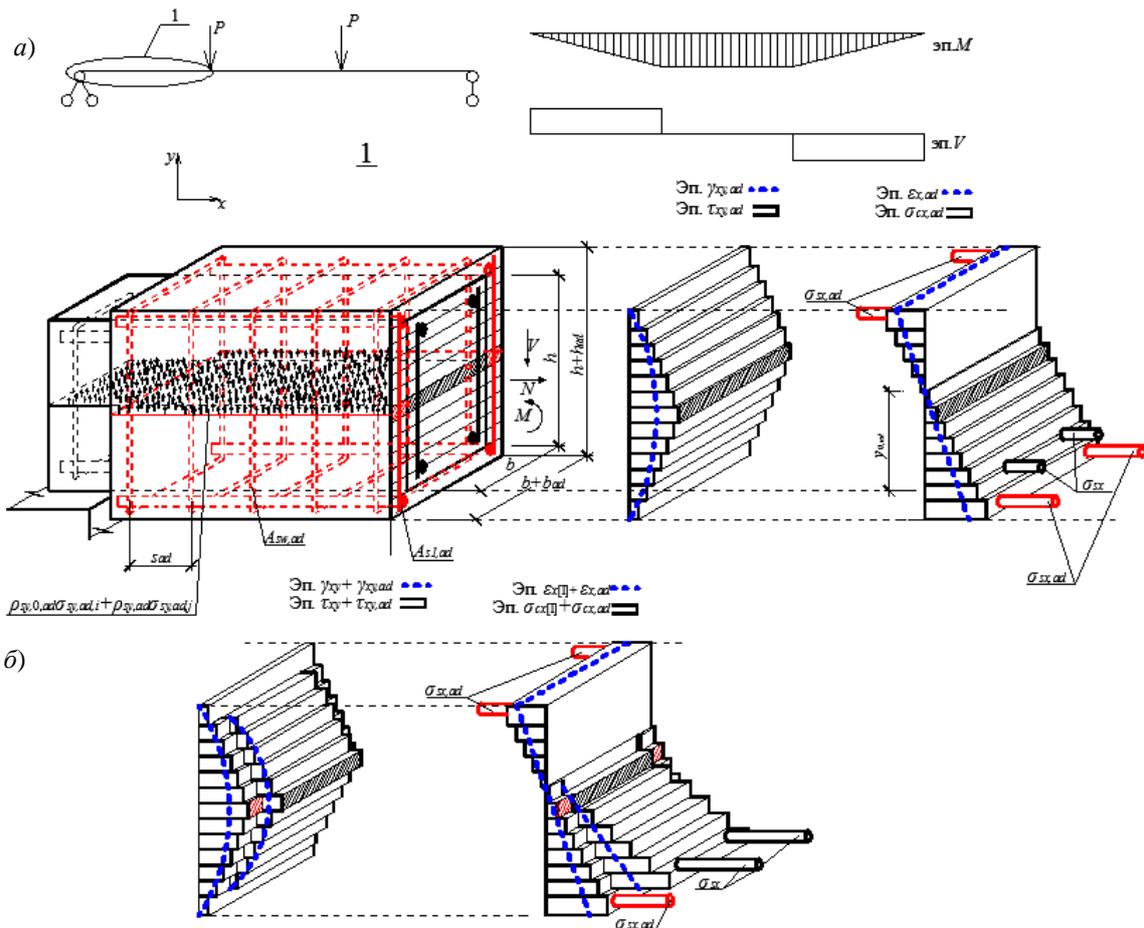


Рис. 2. Распределение касательных и нормальных деформаций и напряжений в усиленном в зоне среза изгибаемом железобетонном элементе на второй стадии работы: а – от приращения нагрузки после усиления; б – от полной нагрузки после усиления

Последовательно увеличивая значения внутренних усилий в их сочетании, действующих в расчетном сечении, устанавливают их значение, соответствующее образованию трещин в бетоне в зоне среза.

Нагрузка, при которой относительные деформации  $\varepsilon_{c1}$  по направлению главных растягивающих напряжений в бетоне достигают значения, соответствующего прочности бетона при растяжении по принятой диаграмме деформирования хотя бы в одной элементарной площадке основного или дополнительного бетона, соответствует началу образования трещин. Ширина раскрытия наклонных трещин  $w$  и расстояние между ними  $S_{m\theta}$  определяются на основании полученных из решений систем уравнений значений относительных деформаций поперечной арматуры и угла наклона к продольной оси главных напряжений по формулам:

$$w_i = \varepsilon_{c1,i} S_{m\theta,i}; \quad (9)$$

$$S_{m\theta,i} = \frac{1}{\frac{\sin \theta_i}{S_{mx}} + \frac{\cos \theta_i}{S_{my}}}, \quad (10)$$

где  $S_{mx}$ ,  $S_{my}$  – шаг наклонных трещин в продольном и поперечном направлении соответственно, мм.

Прочность усиленного в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента также определяется методом последовательных нагружений. Максимальное значение нагрузки, при котором выполняются все условия систем уравнений (5), (7), соответствует прочности изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза. Для установления наиболее опасного сечения в зоне среза рассматриваются несколько сечений по длине зоны среза элемента с различным сочетанием действующих внутренних усилий  $M$ ,  $N$ ,  $V$ .

На основании предлагаемой методики разработана программа автоматизированного расчета параметров напряженно-деформированного состояния поперечного сечения в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов [11]. Диалоговое окно программы с результатами расчета параметров напряженно-деформированного состояния поперечного сечения при заданной комбинации внутренних усилий представлено на рисунке 3.

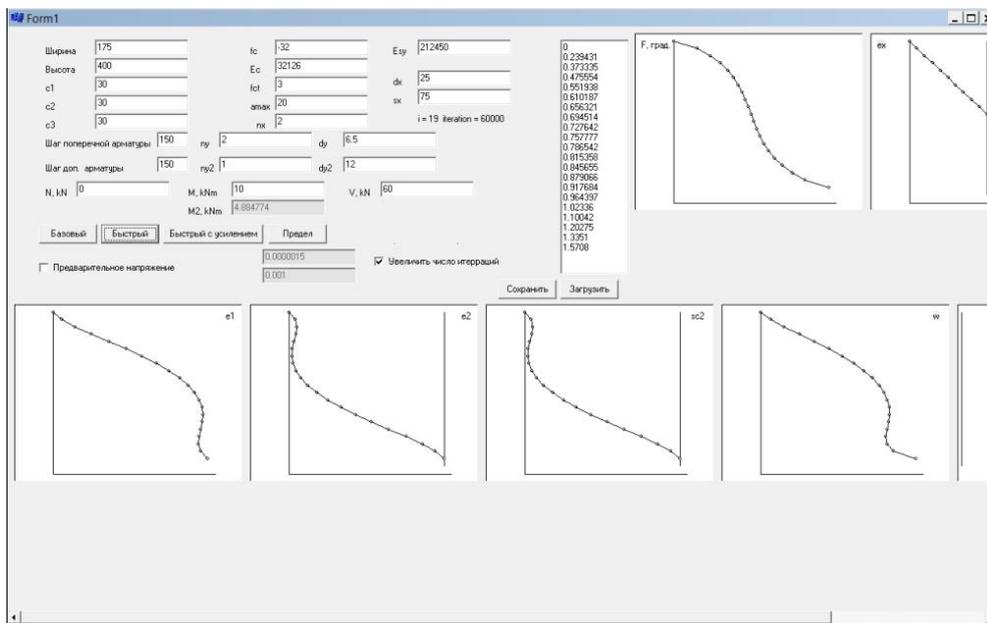


Рис. 3. Диалоговое окно программы расчета усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов

**Заклучение.** Предложена новая научно обоснованная методика расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, в том числе установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры. Предлагаемая методика позволяет решать практически любые задачи в области усиления зоны среза изгибаемых железобетонных элементов, недоступные ныне применяемым методам. Методика позволяет учесть начальное напряженно-деформированное состояние усиливаемых элементов при усилении, предварительное напряжение дополнительной поперечной арматуры, различные физико-механические и геометрические характеристики усиливаемой и усиливающей частей усиленного в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазовский, Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений: моногр. / Д.Н. Лазовский. – Новополоцк: ПГУ, 1998. – 240 с.
2. Nakamura, H. Evaluation of Shear Strength of RC Beam Section Based on Extended Modified Compression Field Theory / H. Nakamura, T. Higai // Concrete library of Japan Soc. of Civil Engineers, no. 25, June 1995. – P. 93 – 105.
3. Vecchio, F.J. The Modified compression field theory for reinforced Concrete Elements Subjected to shear / F.J. Vecchio, M.P. Collins // ACU. V. 83, no. 2, March – April 1986. – P. 219 – 231.
4. Vecchio, F.J. The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses / F.J. Vecchio, M.P. Collins // Pub 82.03, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Toronto, March 1982. – 332 p.
5. Vecchio, F.J. Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to shear using Modified Compression Field Theory / F.J. Vecchio, M.P. Collins // ACI Struct. Journ., V. 85, № 3, May – June, 1988. – P. 258 – 268.
6. Vecchio, F.J. Analysis based on the Modified Compression Field Theory / F.J. Vecchio // IABSE Colloq. On Structural Concrete, Stuttgart, 1991, IABSE Report, V. 62. – P. 321 – 326.
7. Пецольд, Т.М. Методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза / Т.М. Пецольд, Е.Д. Лазовский, Д.О. Глухов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2012. – № 16. – С. 40 – 45.
8. Мурашов, В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона / В.И. Мурашов. – М.: Машстройиздат, 1950. – 268 с.
9. Немировский, Я.М. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружении / Я.М. Немировский // Бетон и железобетон. – 1955. – № 5. – С. 172 – 176.
10. Усиление железобетонных конструкций: пособие П1-98 к СНиП 2.03.01-84\* / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 1998. – 189 с.
11. Применение мягких вычислений для сглаживающей аппроксимации сложных сингулярных зависимостей // Д.О. Глухов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2012. – № 12. – С. 2 – 5.

Поступила 15.11.2013

**BACKGROUND, METHODOLOGY AND SOFTWARE  
FOR THE CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE  
OF FLEXIBLE SLICER ZONE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS**

***Y. LAZOUSKI, D. GLUKHAU***

*A new, evidence-based methods of calculation of strength and crack resistance of reinforced shear zone of steel reinforced concrete members based on stress-strain of standing items with different physical and mechanical characteristics of the materials reinforced and reinforcing elements, which in comparison with the existing empirical methods RAS couple more pronounced physical meaning are proposed. A computer program, based on the proposed method that allows you to calculate the parameters of stressed-strained state of reinforced shear zone of steel reinforced concrete elements and calculate the first and second groups of limit state action in the area of the cut of the full combination of domestic efforts, elaborated.*

УДК 624.012.3

**ВЛИЯНИЕ КРУЧЕНИЯ В МНОГОПУСТОТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТАХ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ****Е.В. АВЛАСКО***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассматривается проблема кручения в многопустотных железобетонных плитах безопалубочного формования, которые благодаря своей большой несущей способности, большому пролету и значительно лучшему в сравнении с другими качеству получили широкое распространение и сегодня все чаще применяются при строительстве различных зданий и сооружений. Кручение в многопустотных железобетонных плитах безопалубочного формования возникает большей частью как вторичный эффект силового воздействия. Представлены результаты экспериментальных исследований таких конструкций при совместном действии изгиба с кручением. Определены особенности трещинообразования данных плит. Сделан вывод о влиянии величины крутящего момента на характер развития трещин в многопустотных железобетонных плитах безопалубочного формования при таком сложном напряженно-деформированном состоянии, как изгиб с кручением.*

**Введение.** Кручение в железобетоне представляет собой весьма сложное явление, которое в чистом виде почти не встречается, но в сочетании с изгибом бывает весьма частым. В сравнении с изгибом сопротивление железобетонных элементов кручению существенно меньше, поэтому влияние даже относительно небольших по абсолютному значению крутящих моментов необходимо учитывать.

В настоящее время в строительной отрасли широко используются многопустотные железобетонные плиты безопалубочного формования. Благодаря своей большой несущей способности, большому пролету и значительно лучшему качеству они все чаще применяются при строительстве различных зданий и сооружений. В международной практике расчет многопустотных плит безопалубочного формования выполняется с использованием нормативных документов, в частности, с использованием СТБ EN 1168-2012 [1] и ACI 318R-95 (Примечания к американским нормам ACI BUILDING CODE 318-95).

Следует отметить, что исследованию плит пустотного настила были посвящены работы различных авторов. Вместе с тем комбинация изгиба и кручения для таких конструкций исследована в недостаточной мере. Практически к рассмотрению этой проблемы можно отнести крайне ограниченное количество работ, включая исследования Н. Gabrielsson, J.C. Walraven, W.P.M. Mercx, A.P. van der Marel, выполненные на плитах, опертых по трем сторонам. Финским исследователем Matti Pajari [2] была выполнена научно-исследовательская работа с целью разъяснения взаимодействия среза и кручения в предварительно напряженных полых плитах. Были проведены испытания под нагрузкой плит одинаковой ширины и длины, но различной высоты. Наиболее обширным исследованием последних лет следует считать работы Helen Broo [3; 4], где феномен совместного действия среза и кручения изучался на нелинейных конечно-элементных моделях с применением комплекса «ANSYS». Предложенные методы моделирования могут использоваться отдельно или в комбинации с обычными методами для улучшения оценки работы железобетонных конструкций произвольного поперечного сечения, работающих в условиях среза с кручением.

Таким образом, работа многопустотных железобетонных плит безопалубочного формования при изгибе с кручением является малоисследованным направлением. Вопрос о характере разрушения, несущей способности, трещиностойкости и деформативности этих конструкций в условиях такого напряженно-деформированного состояния остается открытым [5, с. 187 – 188]. Это требует проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований, на основании которых можно совершенствовать методы расчета таких конструкций с учетом потребностей строительной индустрии, тем более развитие компьютерной техники уже сегодня дает возможность разработать методику расчета железобетонных элементов, подвергнутых изгибу с кручением, на основе деформационной модели. Это в свою очередь позволит выполнять расчеты с более глубоким физическим смыслом явлений, который не учитывают эмпирические методы расчета. Расширение области применения деформационных методов расчета бетонных и железобетонных конструкций при сложном напряженно-деформированном состоянии, в том числе при изгибе с кручением, является одним из наиболее важных направлений развития теории бетона и железобетона.

Цель представляемых в данной работе экспериментальных исследований – получение сведений о трещинообразовании, деформировании и разрушении многопустотных железобетонных плит безопалубочного формования, работающих на изгиб с кручением.

В процессе экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- проведение испытаний многопустотных железобетонных плит безопалубочного формования по двум схемам, соответствующим работе плит при кручении и изгибе с кручением;
- определение основных параметров (характер развития трещин в многопустотных железобетонных плитах безопалубочного формования; изменение угла наклона трещин по мере варьирования соотношения крутящего и изгибающего моментов; относительные деформации сжатого бетона с использованием механических индикаторов часового типа, установленных на базе 200 мм; прогибы в опытных плитах с помощью прогибомеров с ценой деления 0,01 мм).

#### Исходные материалы и характеристики

Объем эксперимента включал в себя испытания семи железобетонных многопустотных плит безопалубочного формования, выполненных на оборудовании «Вибропресс» (Россия). Все опытные образцы были изготовлены в заводских условиях ПРУП «Новополоцкжелезобетон» (г. Новополоцк).

Размеры конструкций по длине определялись мощностью и габаритами имеющегося оборудования для испытания.

Опытные образцы изготовлены в соответствии с требованиями СТБ 1383-2003 [6] по типовой серии Б1.041.1-5.09.

Плиты перекрытия многопустотные безопалубочного формования (экструзионные) выполнены из тяжелого бетона, длиной 6 м, под расчетную нагрузку 8,0 кПа; армированы высокопрочной проволокой S1400 17Ø5 мм, которая используется для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций, применяемых в ответственных сооружениях, и изготавливается из высокоуглеродистой стали с расчетным сопротивлением  $f_{yd} (f_{0,2d}) = 1165 \text{ Н/мм}^2$ .

Общая информация об опытных образцах сведена в таблицу.

#### Характеристики исследуемых плит

Марка изделия	2ПТМ 60-12.22-8 S1400
Объем 1 шт., м <sup>3</sup>	1,507
Вес 1 шт., кг	2225
Класс бетона по прочности	C25/30
Отпускная нормируемая прочность, %	80
Фактическая отпускная прочность, МПа	30,9
Морозостойкость	F50
Огнестойкость	EI 60
Класс пожарной опасности	КО

Поперечное сечение

Опытные образцы – плиты, предназначенные для применения в жилых, общественных и производственных зданиях с несущими стенами из кирпича или крупных блоков, а также в полносборных каркасных зданиях, эксплуатируемых в условиях неагрессивной, слабоагрессивной и среднеагрессивной степени воздействия газовой среды.

#### Конструкция испытательной установки

Для получения необходимых опытных данных в соответствии с поставленными задачами была спроектирована испытательная установка. Конструкции нагружали при помощи гидравлического домкрата, запитанного от насосной станции, и траверс, распределяющих нагрузку на необходимое количество составляющих. Система траверс монтировалась таким образом, чтобы обеспечить передачу

нагрузки в определенные точки и тем самым получить в опытных плитах различные напряженно-деформированные состояния (кручение, изгиб с кручением). Непосредственно на домкрат устанавливалась короткая траверса, которая посредством тяжей связывалась с силовым полом. Особое внимание уделялось опорным узлам (применялась система перекрестных ролов, с помощью которых были возможны деформации в двух направлениях).

#### **Методика проведения экспериментальных исследований**

При проведении экспериментальных исследований определялись основные параметры, связанные с прочностью, деформативностью, образованием и раскрытием трещин в многопустотных железобетонных плитах безопалубочного формования при изгибе с кручением.

Конструкции были разделены на две серии:

- первая – серия плит, испытанных на кручение (П1 – П3);
- вторая – серия плит, испытанных на изгиб с кручением с разными соотношениями крутящего и изгибающего моментов (П4 – П7).

Соотношения изгибающего и крутящего моментов были выбраны таким образом, чтобы во всех плитах второй серии после испытаний получить пространственную трещину под различным углом наклона.

В экспериментальных исследованиях на каждом этапе нагружения проводились измерения деформаций, ширины раскрытия трещин, прогибов в середине и в третях пролета.

Прогибы в опытных плитах измерялись с помощью прогибомеров с ценой деления 0,01 мм. Прогибомеры устанавливались на специальной рамке, таким образом учитывалась подвижность основания испытательной установки.

Деформации бетона по высоте сечения плиты измерялись индикаторами часового типа, установленными на базе 200 мм. За нулевые отсчеты приборов принимались отсчеты с учетом собственного веса плиты.

Перед ожидаемым моментом трещинообразования растянутая зона каждой плиты тщательно осматривалась, появление трещин фиксировалось визуально. По мере дальнейшего нагружения велись наблюдения за появлением новых трещин и развитием уже имеющихся с помощью отсчетного микроскопа МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм; во время выдержки под нагрузкой отмечали развитие трещин по высоте; производили их зарисовку.

Нагрузку прикладывали ступенями не более 5 – 10 % от разрушающей. На каждом этапе нагружения фиксировались показания приборов, а также образование и развитие трещин.

**Результаты исследований.** Проведенные испытания опытных плит по двум схемам, соответствующим их работе при кручении и при совместном действии изгиба с кручением, позволили получить новые данные о нагрузках трещинообразования и разрушения.

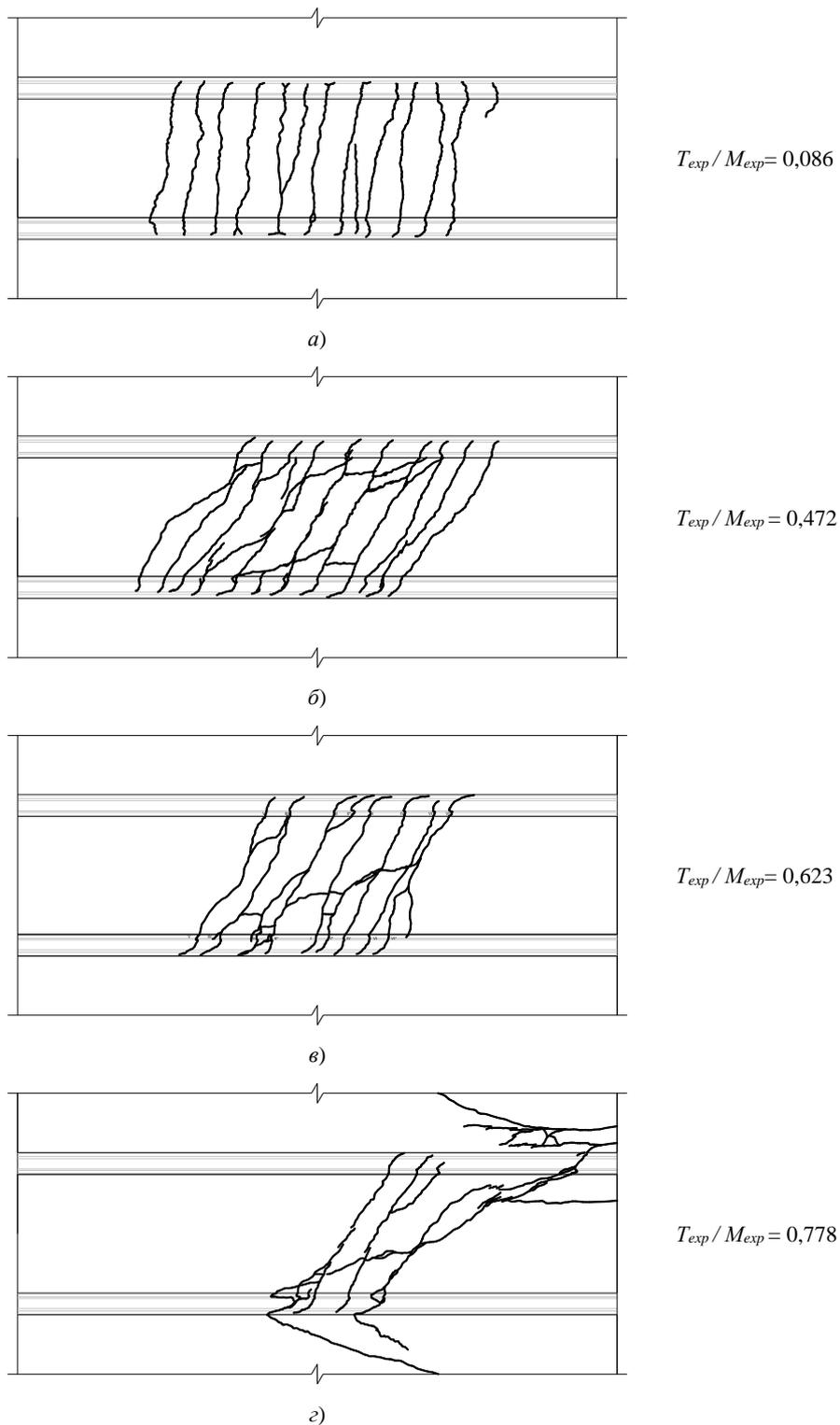
Экспериментально определен характер трещинообразования и развития трещин в многопустотных железобетонных плитах безопалубочного формования; определено изменение угла наклона трещин по мере варьирования соотношения крутящего и изгибающего моментов.

Опытные плиты 1-й серии, испытанные на кручение, разрушились по спиральной трещине, наклоненной во всех образцах под углом  $45^\circ$  к оси балки, в момент, когда максимальные косые растягивающие напряжения превысили прочность материала на растяжение. При действии крутящего момента в начальной стадии железобетонная плита работала упруго. В ней возникали касательные, а следовательно и главные, сжимающие и растягивающие, напряжения, ориентированные под углом  $45^\circ$  по отношению к продольной оси элемента. После того как удлинение бетона по направлению действия главных растягивающих напряжений достигло предельных значений, в бетоне образовалась спиральная трещина на верхней грани плиты, её раскрытие было мгновенным.

Разрушение опытных плит 2-й серии, испытанных на совместное действие кручения с изгибом, происходило спокойнее, оно не наступало сразу после появления первой трещины. Если значение крутящего момента было невелико, как в плите П4, то трещины развивались по нижней грани плиты почти как при «чистом изгибе». С увеличением крутящего момента (плиты П5 – П7) угол наклона трещин к продольной оси уменьшался. В плитах П4 – П6 спиральные трещины развивались только в зоне, растянутой от совместного действия изгибающего и крутящего моментов (по нижней полке и боковым граням). После образования спиральных трещин усилие в направлении главных растягивающих напряжений воспринимала арматура, а усилие, действующее по направлению главных сжимающих напряжений, – бетон. В плите П7 разрушение произошло по пространственному сечению с последующим раздроблением бетона сжатой зоны.

Таким образом, была установлена зависимость угла наклона трещин к продольной оси от соотношения крутящего и изгибающего моментов (т.е. увеличение проекции трещин с увлечением соотношения крутящего к изгибающему моменту). Также во второй серии с увеличением крутящего момента была отмечена закономерность смещения области развития трещин в противоположную от кручения сторону.

Развертка граней многпустотных железобетонных плит безопалубочного формирования второй серии после разрушения представлена на рисунке.



Развертка граней опытных плит второй серии после разрушения:  
плиты П4 (а) плиты П5 (б), плиты П6 (в), плиты П7 (г)

**Заключение.** При проведении экспериментальных исследований были получены опытные данные о прочности и жесткости многпустотных железобетонных плит безопалубочного формирования при кручении и изгибе с кручением.

Выявлены *особенности трещинообразования* таких конструкций:

- величина крутящего момента существенно влияет на характер появления трещин в многопустотных железобетонных плитах безопалубочного формования;
- угол наклона трещин к продольной оси с увеличением крутящего момента уменьшается;
- с увеличением крутящего момента область развития трещин смещается в противоположную от кручения сторону;
- разрушение при кручении происходит по спиральной трещине, наклоненной под углом  $45^\circ$  и развивающейся по верхней грани плиты мгновенно;
- образование спиральной трещины при кручении происходит в более нагруженной грани, которой может быть как внешняя (периметрическая), так и внутренняя;
- изгиб увеличивает сжимающие напряжения на верхней грани, вызывая тем самым увеличение крутящего момента, при котором появляется первая трещина; кручение же, как изгиб, вызывает появление растягивающих напряжений на нижней грани и, таким образом, снижает величину изгибающего момента, при котором образуется первая трещина.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Изделия железобетонные сборные. Плиты многопустотные: СТБ EN 1168-2012. – Введ. 20.04.2012. – Минск: Гос. комитет по стандартизации Респ. Беларусь, 2013. – 60 с.
2. Pajari, Matti. Shear-torsion interaction tests on single hollow core slabs / Matti Pajari. – Finland: VTT Information Service, 2004. – 76 p. + app. 122 p.
3. Broo, H. Finite element analyses of hollow core units subjected to shear and torsion / H. Broo, K. Lundgren. – Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2002. – 48 p. + app. 10 p.
4. Broo, H. Shear and torsion in concrete structures / H. Broo. – Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2008. – 58 p.
5. Авласко, Е.В. Экспериментальные исследования многопустотных железобетонных плит безопалубочного формования при совместном действии изгиба с кручением / Е.В. Авласко, Д.Н. Лазовский // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. тр. Т. 1. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – С. 187 – 191.
6. Плиты покрытий и перекрытий железобетонные для зданий и сооружений. Технические условия: СТБ 1383-2003. – Введ. 28.02.2003. – Минск: М-во арх. и стр-ва Респ. Беларусь, 2003. – 24 с.

Поступила 28.11.2013

#### INFLUENCE OF TORSION ON REINFORCED CONCRETE HOLLOW-CORE SLABS

*E. AVLASKO*

*We consider the problem of torsion of reinforced concrete hollow-core slabs. These constructions are widely used due to their large bearing capacity, large spans and quality. Today they are increasingly used in the construction of various buildings and structures. Torsion in reinforced concrete hollow-core slabs occurs mostly as a secondary effect of force action. The paper presents the results of experimental tests of such constructions subjected to bending and torsion. Features of cracking in these slabs are identified. Conclusions about the impact of the amount of torque on the character development of cracks in reinforced concrete hollow-core slabs in such a complex stress-strain state as bending and torsion are drawn.*

УДК 624.078.4

**ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ  
БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ С ПЛАТФОРМЕННЫМИ СТЫКАМИ****А.Д. ЛАЗОВСКИЙ***(Полоцкий государственный университет)*

*Приведены результаты экспериментальных исследований прочности междуэтажных перекрытий из многопустотных предварительно-напряженных плит с платформенными стыками, продольным армированием из высокопрочной проволоки Ø5 мм, изготовленных методом непрерывного безопалубочного формования, что накладывает особенности на их армирование в виде отсутствия поперечной арматуры вблизи стыков и опасности их разрушения от среза на опорах. Экспериментально установлена схема разрушения платформенных стыков в зависимости от величины усилия прижатия стенами от вышерасположенных этажей. Экспериментально подтверждено, что работа под нагрузкой междуэтажных перекрытий из многопустотных предварительно напряженных плит с платформенными стыками характеризуется наличием в местах их опирания и защемления в стенах отрицательного изгибающего момента. Результаты данного исследования свидетельствуют о влиянии вертикального прижатия стенами от вышерасположенных этажей на значение отрицательного изгибающего момента, при этом с ростом вертикального прижатия уменьшается податливость узла сопряжения плит перекрытия со стенами.*

**Введение.** В настоящее время в Республике Беларусь налажено производство предварительно напряженных многопустотных плит безопалубочного формования. Данные плиты имеют продольную рабочую арматуру из высокопрочной проволоки или канатов из стали класса S1400. Технология производства таких плит, в отличие от агрегатно-поточной, полностью исключает установку в них поперечной арматуры, горизонтальных сеток в полках, закладных деталей и строповочных петель, что накладывает определенные требования по применению предварительно напряженных многопустотных плит безопалубочного формования при проектировании и строительстве дисков перекрытия.

Особенность проектирования дисков перекрытия при использовании платформенных стыков плит перекрытия со стенами здания заключается в возникновении опорных изгибающих моментов [1, п. 6.4; 2]. В многопустотных плитах, изготавливаемых по агрегатно-поточной или конвейерной технологии, возникновение опорных изгибающих моментов после образования трещин воспринимается продольными стержнями верхней приопорной сетки и вертикальными приопорными каркасами. В плитах безопалубочного формования опорный изгибающий момент воспринимается в основном бетонным сечением, поскольку минимальный размер опирания составляет 80 – 120 мм [2], а расчетная длина зоны передачи напряжений для арматурных канатов и высокопрочной проволоки равна соответственно 500 и 330 мм. Характер трещинообразования аналогичных многопустотных плит безопалубочного формования фирмы «MAXROTH» [1] в зоне опирания свидетельствует об опасности разрушения от среза у опоры в месте образования нормальной трещины в плитах.

При этом в [2] возникающие опорные моменты рекомендуется не учитывать при опирании плит на кладку из мелкоштучных материалов всех типов, в том числе при опирании на монолитные пояса, vyplненные в этих видах кладки. В то же время типовая серия [3, п. 2.5] при опирании плит на кирпичные и блочные стены требует учитывать возникающие опорные изгибающие моменты.

Величины отрицательного опорного изгибающего момента при использовании платформенных стыков плит перекрытия безопалубочного формования со стенами здания в разных источниках различаются. Опорный момент для многопустотных плит безопалубочного формования фирмы «MAXROTH», армированных высокопрочной проволокой класса ВР-II Ø5 мм, в [1] определяется с использованием коэффициента степени защемления ( $K$ ) к значению опорного момента, определяемому из условия жесткой заделки плиты в стену. При этом коэффициент ( $K = 0,51 \dots 0,79$ ) принимается в зависимости от глубины заделки и напряжения прижатия стен. В типовой серии для многопустотных плит безопалубочного формования фирмы «Weiler», армированных семипроволочными канатами диаметром 6, 9, 12 и 15 мм [3], опорный изгибающий момент принимается равным  $M_{on} = q l^2 / 17$ , где  $q$  – полезная равномерно распределенная расчетная нагрузка. А в типовой серии для многопустотных плит безопалубочного формования фирмы «Вибропресс» [4], армированных высокопрочной проволокой класса S1400 Ø5 мм, опорный изгибающий момент не должен превышать 11,9 – 14,9 кН·м в зависимости от класса бетона, в противном случае требуется усиление опорной зоны плит надопорной арматурой. В рекомендациях [2]

расчетное значение опорного изгибающего момента принимается равным  $M_{on} = M_1 + M_2$ , где  $M_1$  – изгибающий момент от вертикальной опорной реакции,  $M_2$  – изгибающий момент от реакции сил трения.

#### Экспериментальные исследования

Целью экспериментальных исследований является изучение напряженно-деформированного состояния платформенного стыка плит безопалубочного формования со стенами здания.

Задачи исследования:

- установление картины трещинообразования и возможных схем разрушения в зоне платформенного стыка многопустотных плит безопалубочного формования;
- получение экспериментальных данных о величине опорных изгибающих моментов в плитах в эксплуатационной стадии и в предельном состоянии по прочности;
- установление влияния вертикального напряжения прижатия от вышерасположенных этажей на величину опорного изгибающего момента.

Исследования включали в себя испытания двух двухпролетных фрагментов перекрытий с платформенными стыками, в состав которых входили два фрагмента многопустотных плит безопалубочного формования по технологии «Вибропресс» размерами  $500 \times 220 \times 5980$  мм из бетона класса С25/30, армированных высокопрочной проволокой класса S1400  $\varnothing 5$  мм и изготовленных на ОАО «Новополоцкжелезобетон», опирающихся на фрагменты стеновых панелей толщиной 200 мм. Вертикальное прижатие от вышерасположенных этажей передавалось через фрагменты стеновых панелей толщиной 200 мм. Выравнивающий цементно-песчаный раствор в платформенном стыке соответствовал марке М100. Конструкция и геометрические размеры опытных образцов платформенных стыков, а также геометрические размеры и армирование многопустотных плит представлены на рисунке 1.

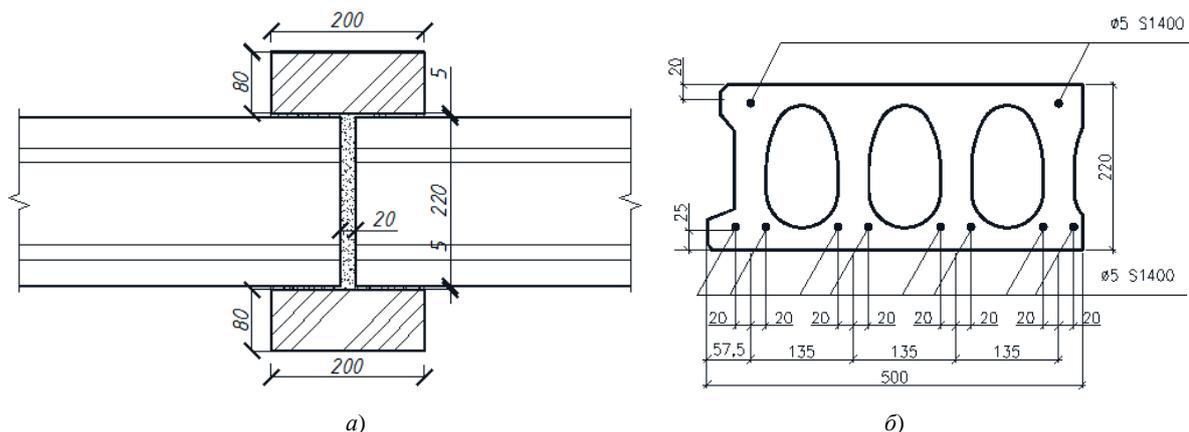


Рис. 1. Геометрические размеры опытных образцов платформенных стыков (а) и схема армирования многопустотных плит (б)

Варьируемым фактором являлась величина вертикального прижатия стыка. При испытании платформенного стыка ПС-1 было принято прижатие величиной 3 т, которое моделировало плиты перекрытия (покрытия) верхних этажей многоэтажного здания; при испытании стыка ПС-2 – 20 т, что соответствует работе стыков плит перекрытия нижних этажей. Прижатие создавалось гидравлическим домкратом с автоматической насосной станцией и распределялось по длине платформенного стыка через фрагменты бетонных стеновых панелей.

Вертикальная нагрузка в пролетах плит создавалась синхронно при помощи двух гидравлических домкратов от одной насосной станции. Пролетная нагрузка распределялась по длине пролета на четыре сосредоточенные силы при помощи двух ярусов стальных распределительных траверсов, что моделирует равномерно распределенную нагрузку. Для раскрытия статической неопределимости свободные концы многопустотных плит были оперты на образцовые динамометры ДОСМ 3-5, измеряющие опорные реакции на каждом этапе нагружения. Для измерения ширины раскрытия трещин использовался микроскоп МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм. Прогобы плит и осадка опор измерялись при помощи прогибомеров БПАО с ценой деления 0,01 мм. Для измерения продольных деформаций многопустотных плит вблизи платформенного стыка использовались индикаторы часового типа ИЧ-10М с ценой делений 0,01 мм. Нулевые отсчеты приборов принимались с учетом собственного веса многопустотных плит.

Нагружение начиналось с приложения усилия прижатия платформенного стыка, затем происходил монтаж траверс и поэтапное приложение нагрузки в пролетах плит с выдержкой на каждом этапе. Величина этапа нагружения составляла 10 % нагрузки, соответствующей расчетной прочности многопустотных плит на изгиб. При этом перед образованием трещин, а также перед разрушением величина этапа нагружения уменьшалась вдвое.

В процессе нагружения производились измерения отклонения от первоначального вертикального положения вертикальной планки, прикрепленной со стороны боковых граней обеих плит в зоне платформенного стыка. По результатам измерений вычислялся угол поворота опорного сечения.

Схема испытательной установки и размещения приборов представлена на рисунке 2. Общий вид испытательной установки представлен на рисунке 3.

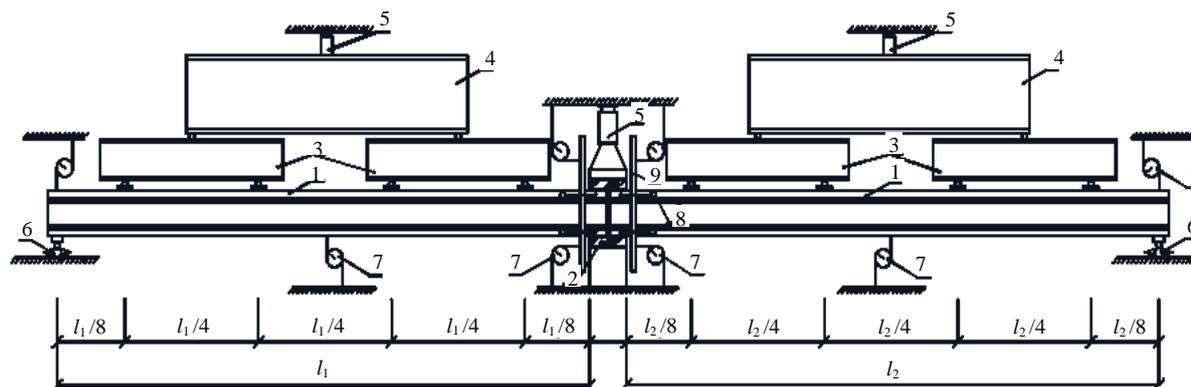


Рис. 2. Схема испытательной установки:

- 1 – панель перекрытия; 2 – фрагмент стены; 3 – траверсы 1-го яруса; 4 – траверсы 2-го яруса;  
5 – гидравлические домкраты; 6 – образцовые динамометры; 7 – прогибометры;  
8 – индикаторы часового типа; 9 – металлические планки

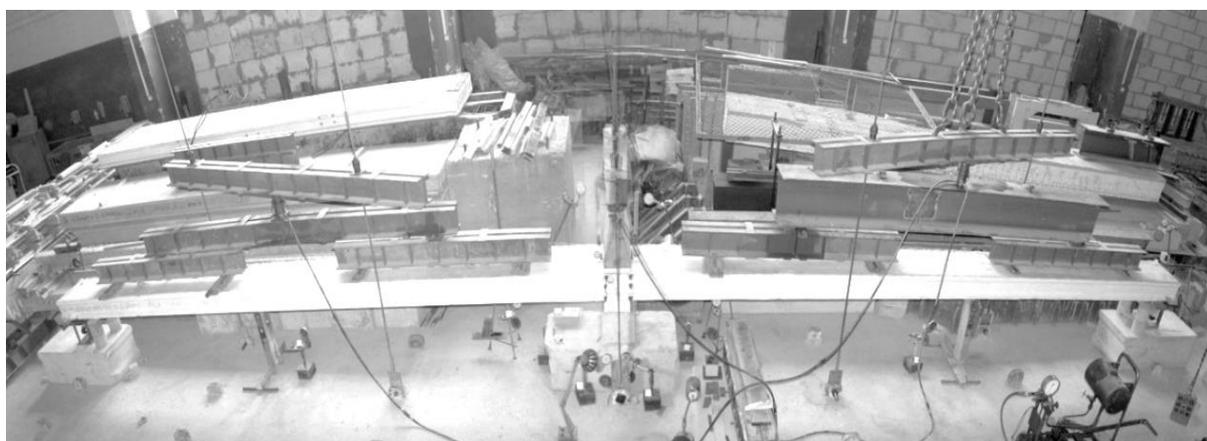


Рис. 3. Общий вид испытательной установки

Проведенные испытания показали различное поведение платформенных стыков с минимальной и максимальной величиной прижатия. При испытании фрагмента перекрытия ПС-1 усилие прижатия платформенного стыка было недостаточным для заземления обеих многопустотных плит. Поэтому при увеличении нагрузки в пролете и повороте торцов плит у опор происходило вертикальное смещение вверх верхнего фрагмента стеновой панели. При этом автоматической насосной станцией поддерживалось усилие прижатия на прежнем уровне. Разрушение платформенного стыка происходило путем скола верхнего угла одной из плит перекрытия и угла нижнего фрагмента стеновой панели с уменьшением опирания плиты. Скалывание торцевого угла плиты перекрытия и фрагмента стеновой панели произошло от действия пары сил в местах сопряжения плиты с фрагментами верхней и нижней стеновых панелей. Ввиду более высокой прочности бетона верхнего фрагмента стеновой панели ее раскалывание по оси действия вертикальных сил от торцевых углов плит не происходило, как это наблюдалось в случае кирпичных

стен [1]. При дальнейшем нагружении после скалывания углов плит и фрагмента стеновых панелей измерение опорных реакций на свободных опорах и сопоставление их с пролетной нагрузкой показывает большее значение опорных реакций от плит в зоне платформенного стыка по сравнению со свободными опорами. Это свидетельствует о наличии отрицательного изгибающего момента в плитах в зоне платформенного стыка.

При испытании фрагмента перекрытия ПС-2 поведение платформенного стыка было иным: создаваемое большее прижатие в зоне платформенного стыка исключало поворот торцов плит в местах их заделки. Это способствовало более равномерному распределению усилия прижатия от верхнего фрагмента стеновой панели и вертикальной опорной реакции от плиты по ее площадке опирания на нижний фрагмент стеновой панели.

В начале нагружения ввиду защемления концов плит в платформенном стыке при действии вертикальной пролетной нагрузки возникал опорный изгибающий момент, вызывающий растяжение верхней грани плит. Поперечные трещины первоначально появлялись в опорной зоне верхних граней многопустотных плит. Из-за недостаточной анкеровки верхней арматуры плит образовались единственные поперечные трещины у опоры каждой плиты как у изгибаемой бетонной конструкции. Затем, по мере увеличения нагрузки, образовывались нормальные трещины на нижней грани в пролетах плит. После возникновения нормальных трещин в зоне платформенного стыка при дальнейшем нагружении вплоть до разрушения в многопустотных плитах измеренные реакции на свободных опорах, так же как и у фрагмента перекрытия ПС-1, были меньше, чем при свободно опертой схеме работы плит, из-за наличия отрицательного изгибающего момента. На этапе, предшествующем разрушению плиты, ширина раскрытия поперечной трещины на опоре составила 10 – 15 мм, а ширина раскрытия трещин в пролете – 1 – 2 мм.

Графики зависимостей «опытный отрицательный изгибающий момент – угол поворота опорных поперечных сечений плит» для фрагментов платформенных стыков ПС-1 и ПС-2 представлены на рисунке 4.

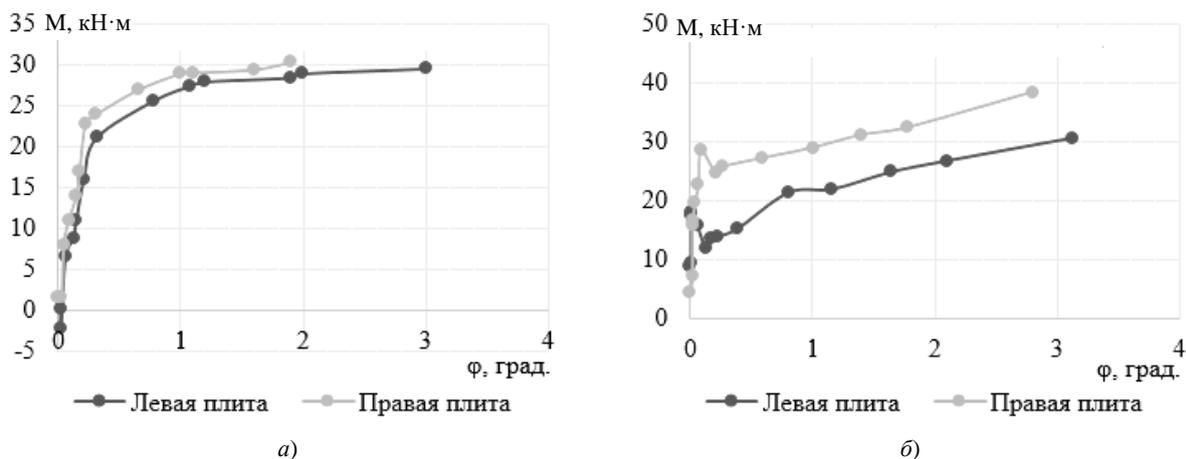


Рис. 4. Графики зависимостей «опытный отрицательный изгибающий момент – угол поворота опорных поперечных сечений плит»:

*a* – для стыка ПС-1; *б* – для стыка ПС-2

Согласно графикам (см. рис. 4) следует различать две стадии работы платформенного стыка:

- первая стадия – до скалывания углов плит и нижних стеновых панелей (ПС-1), а также образования нормальных к продольной оси трещин у опоры (ПС-2), для которой характерно отсутствие углов поворота опорных поперечных сечений или их незначительная величина от упругого деформирования опорного сечения плит;

- вторая стадия – после скалывания углов плит и стеновых панелей, образования трещин в зоне стыка, в которой наблюдается увеличение угла поворота при незначительном увеличении опорного отрицательного момента.

Разрушение обоих фрагментов платформенных стыков произошло по нормальному сечению в середине пролета одной из многопустотных плит на одном этапе нагружения, а затем – в середине пролета другой плиты на следующем этапе нагружения.

Разрушение плит сопровождалось разрывом отдельных стержней растянутой арматуры. Общий вид разрушения фрагментов платформенных стыков показано на рисунке 5.

Опытные средние значения опорных отрицательных изгибающих моментов в зоне платформенного стыка при разрушении фрагментов ПС-1 и ПС-2, а также вычисленные по источникам [1 – 3] приведены в таблице.

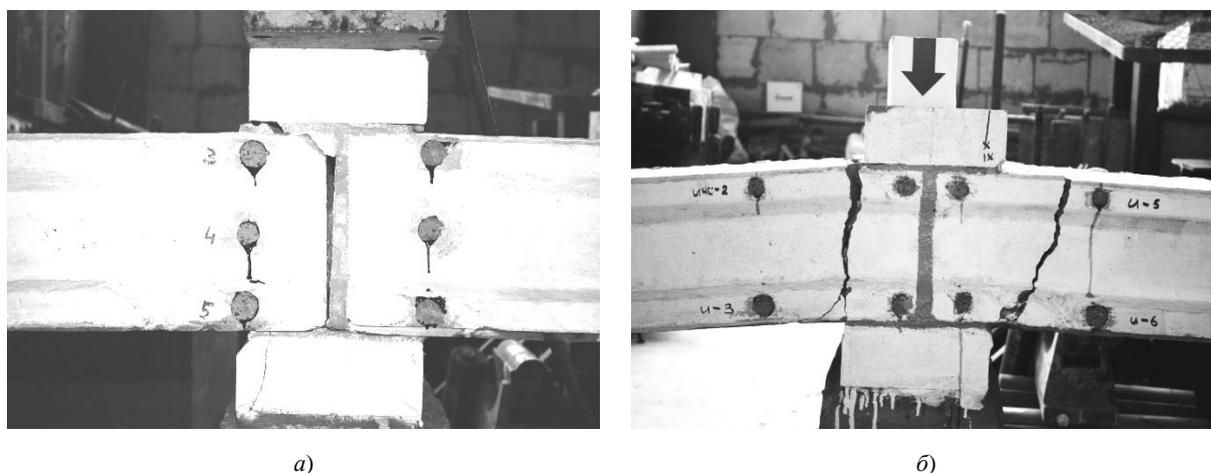


Рис. 5. Вид платформенного стыка ПС-1 (а) и платформенного стыка ПС-2 (б) после проведения испытаний

Опорные изгибающие моменты в предельном состоянии по прочности

Шифр фрагмента	Опорный момент (среднее опытное значение), кН·м	Опорный момент по [1]	Опорный момент по [2]	Опорный момент по [3]	Предельный опорный момент по [4]
ПС-1	-30	-32,52	-6,08	-11,9	-21,1
ПС-2	-34,56	-33,9	-40,53	-11,9	-21,1
Жесткая заделка			-45,8		
Шарнир			0		

**Заключение.** Сопоставление опытных значений опорного момента фрагментов платформенных стыков с расчетными значениями показывает удовлетворительную сходимость с предложениями [1], которые учитывают влияние опорного прижатия на величину опорного отрицательного момента в зоне платформенного стыка. Более осторожно оценивают значение опорного момента в [3; 4], при малом опорном прижатии – в [2]. Методика [2] при большом опорном прижатии переоценивает возникающий в области опорного стыка отрицательный изгибающий момент.

Рассмотренные методики учитывают величину опорного отрицательного момента только в предельном состоянии по прочности.

Отсутствуют методики, учитывающие фактическую работу многоспустотных плит перекрытий в зоне платформенного стыка и позволяющие определять внутренние усилия, а соответственно, и напряженно-деформированное состояние в плитах перекрытия на любом этапе их нагружения, в том числе при эксплуатационной нагрузке. Наличие отрицательного изгибающего момента в плитах перекрытия в зоне платформенного стыка снижает действующий в пролете изгибающий момент, повышая трещиностойкость и уменьшая деформативность перекрытия, а в предельной по прочности стадии нагружения увеличивает значение разрушающей нагрузки.

Анализ результатов экспериментального исследования показал, что реальная работа плит перекрытий в зоне платформенного стыка не является абсолютно жесткой или шарнирной.

#### Основные выводы

1. Экспериментально подтверждено, что работа под нагрузкой междуэтажных перекрытий из многоспустотных предварительно напряженных плит с платформенными стыками характеризуется наличием в местах их опирания и защемления в стенах отрицательного изгибающего момента.

2. Подтверждено влияние вертикального прижатия стенами от вышерасположенных этажей на форму разрушения плит перекрытий в зоне платформенного стыка и значение отрицательного изгибающего момента, а также уменьшение податливости узла сопряжения плит перекрытия со стеной.

3. Выявленные схемы разрушения многопустотных плит перекрытий в зоне платформенного стыка в виде нормальных к продольной оси трещин у опор подтверждают опасность их разрушения на опоре от среза, выявленную в [1].

4. Полученные результаты экспериментальных исследований могут служить предпосылкой для совершенствования методики расчета сборных железобетонных перекрытий из многопустотных плит с учетом нелинейной работы стыков конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прочность узлов сопряжения преднапряженных многопустотных панелей перекрытий со стенами / В.Г. Крамарь [и др.]. – М., 1982. – 19 с.
2. Расчет и проектирование дисков перекрытий с применением плит безопалубочного формования: Р 1.03.055.09 / Ин-т НИПТИС им. Атаева С.С. – Минск, 2009. – 25 с.
3. Плиты железобетонные многопустотные предварительно напряженные безопалубочного формования на оборудовании «Weiler» (Италия) для перекрытий и покрытий жилых, общественных и производственных зданий: Серия Б1.041.1-4.10. Вып. 3 / Ин-т НИПТИС им. Атаева С.С. – Минск
4. Плиты железобетонные многопустотные предварительно напряженные безопалубочного формования на оборудовании «Вибропресс» (Россия) для перекрытий и покрытий жилых, общественных и производственных зданий: Серия Б1.041.1-5.10 / Ин-т НИПТИС им. Атаева С.С.

Поступила 03.12.2013

#### WORK FEATURES OF HOLLOW SLABS OF FORMLESS MOLDING WITH PLATFORM SEAMS

*A. LAZOUSKI*

*The paper gives the experimental results of strength intermediate floors made of the prestressed hollow core slabs with platform seams and with longitudinal reinforcement of high-strength wire with the diameter of 5 mm, produced by continuous formless molding method, which imposes peculiarities of their reinforcement in the form of transverse reinforcement near the seams and the risk of their destruction by cut of pillars. The scheme of destruction of the platform seams, depending on the amount of force pressing by the walls of the upper floors is experimentally established. It was experimentally confirmed that the work load of the intermediate floors of prestressed hollow core slabs with platform seams are characterized by the presence in the points of their bearing and jamming in the walls of the negative bending moment. The results of this study suggest the influence of the vertical pressing of the upper floors on the value of the negative bending moment, while the increasing of vertical pressing reduces compliance of node interface of floor slabs with the wall.*

УДК 624.042.12

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ  
ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,  
УСИЛЕННЫХ В ЗОНЕ СРЕЗА УСТАНОВКОЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ**

**Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований прочности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры. Выполнено сопоставление результатов эксперимента с данными, полученными в результате расчета по предлагаемой разработанной автором методике, основанной на положениях общей деформационной модели и положениях модифицированной теории полей сжатия.*

Для получения новых опытных данных о характере работы усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов и проверки предлагаемой методики расчета [1; 2] были проведены экспериментально-теоретические исследования, включающие испытание опытных балок, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, в том числе под нагрузкой.

**Методика испытания.** Исследования проводились на опытных образцах в виде балок прямоугольного поперечного сечения 175 мм ( $b$ )  $\times$  400 мм ( $h$ ) длиной 3 м, усиленных под нагрузкой, и в ненагруженном состоянии. В качестве варьируемых факторов при проведении эксперимента были выбраны пролет среза (варьировался от  $1,5d$  до  $2,5d$ ) и степень нагружения опытных балок при усилении (от начального уровня, определяемого их собственным весом и весом испытательного оборудования, до значения нагрузки, составляющей 71 % от разрушающей).

В ходе экспериментальных исследований всего было испытано три серии балок, по 3 балки в каждой серии. Первые балки в каждой из серий испытывались при различных пролетах без усиления в качестве эталонных. Вторые и третьи балки – с усилением их при начальном напряженном состоянии и под нагрузкой.

Испытание опытных балок I серии проводилось с пролетом среза  $1,5d$ , II серии –  $2d$ , III серии –  $2,5d$ . В качестве метода усиления опытных балок был выбран метод установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры.

Фактические размеры поперечного сечения опытных балок, характеристики поперечного армирования до и после усиления, а также пролеты среза и степень нагружения опытных балок при усилении приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики опытных балок

Серия	Шифр балки	Размеры поперечного сечения до усиления, мм	Поперечное армирование до усиления, шаг	Дополнительная поперечная арматура, шаг	Предварительное напряжение дополнительной поперечной арматуры, МПа	Нагрузка при усилении	Пролет среза
I	Б-I-1	175 $\times$ 401	2 $\varnothing$ 6,5 S240, $s = 150$	–	–	–	1,5d
	Б-I-2	176 $\times$ 400		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	97,2 МПа	$V = 0$	
	Б-I-3	176 $\times$ 400		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	114,3 МПа	$V = 0,71V_R$	
II	Б-II-1	176 $\times$ 399		–	–	–	2d
	Б-II-2	176 $\times$ 400		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	98,1 МПа	$V = 0$	
	Б-II-3	175 $\times$ 399		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	98,5 МПа	$V = 0,57V_R$	
III	Б-III-1	176 $\times$ 402		–	–	–	2,5d
	Б-III-2	176 $\times$ 400		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	96,5 МПа	$V = 0$	
	Б-III-3	174 $\times$ 401		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	108,4 МПа	$V = 0,49V_R$	

Для продольного армирования балок I – III серий использовалась стержневая арматура периодического профиля диаметром 28 мм класса S500; для поперечного армирования – замкнутые хомуты из арматурной стали класса S240 диаметром 6,5 мм.

Армирование опытных балок осуществлялось вязаными пространственными каркасами. Выбор вязаных арматурных каркасов обусловлен снижением возможного влияния таких факторов, как ослабление сечения поперечной арматуры при сварке ее с продольной и возможное проскальзывание поперечной арматуры на прочность зоны среза опытных балок.

Вязаные пространственные арматурные каркасы для армирования опытных балок I – III серий изготавливались вручную в испытательной лаборатории УО «ПГУ». Для изготовления применялась вязальная проволока диаметром 0,8 мм. После изготовления пространственные арматурные каркасы опытных балок доставлялись на ОАО «Новополоцкжелезобетон», где проводилось их бетонирование на полигоне в инвентарной опалубке. Перед укладкой бетонной смеси поверхность инвентарной опалубки смазывалась машинным маслом. Подача бетонной смеси осуществлялась бадьей, уплотнение производилось глубинным вибратором и штыкованием. Набор прочности бетона происходил при нормальном давлении, 100 %-ной влажности и повышенной температуре (пропаривание).

Для изготовления бетона при бетонировании балок всех серий применялся портландцемент марки 500 Кричевского цементного завода. В качестве крупного заполнителя использовался мелкий гранитный щебень фракции 20 – 30 мм. В качестве мелкого заполнителя – кварцевый песок с объемным весом 1530 кг/м<sup>3</sup> и модулем крупности 1,62. Бетонная смесь для бетонирования опытных образцов приготавливалась с осадкой конуса 5 – 8 см и водоцементным отношением В/Ц = 0,5. В качестве добавок в бетон использовался суперпластификатор С-3 в количестве 0,6 % от массы цемента.

С целью последующего определения физико-механических свойств материалов одновременно с бетонированием опытных образцов из того же бетона, что и образцы, были изготовлены призмы с размерами 100×100×400 мм и кубы 100×100×100 мм, а также отобраны для испытания образцы арматуры тех партий, что использовались для изготовления арматурных каркасов.

Испытания балок проводились в испытательной лаборатории УО «ПГУ» с использованием поверенного оборудования. Нагрузка на образец прикладывалась при помощи пресса ПР-1000, через распределительную траверсу, разделяющую нагрузку от верхней подушки пресса на 2 сосредоточенные силы. Для контроля величины прикладываемой внешней нагрузки использовался силоизмеритель пресса.

Перед испытаниями на боковой поверхности опытных балок наносилось точное положение продольной арматуры и хомутов основной и дополнительной поперечной арматуры. Это позволило определить фактическое количество хомутов, пересекающих наклонные трещины, а также установить, какие именно сечения хомутов попали в наклонную трещину для определения в них напряжений.

Загружение балок производилось ступенями по 3 – 7 % от предполагаемой разрушающей нагрузки. Перед образованием наклонных трещин и перед разрушением образцов величина ступени нагружения уменьшалась. Во время выдержки на каждой ступени нагружения записывались показания приборов, отмечались трещины и замерялась ширина их раскрытия, проводился визуальный осмотр балки.

Схема и общий вид испытательной установки показаны на рисунке 1.

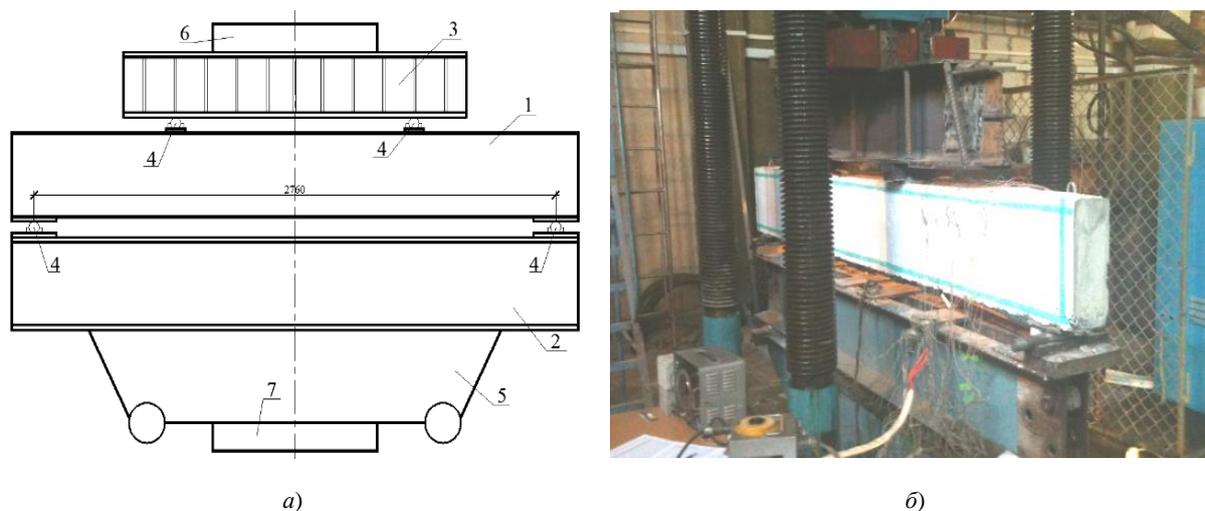


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) испытательной установки:

1 – испытываемая балка; 2, 3 – соответственно нижняя и верхняя распределяющие траверсы;  
4 – шарнирно-подвижная опора; 5 – тележка пресса; 6, 7 – соответственно верхняя и нижняя подушки пресса

В процессе испытания для получения данных о напряженно-деформированном состоянии зоны среза испытываемых балок I – III серий производились измерения относительных деформаций основной и дополнительной поперечной арматуры, а также деформации бетона в зоне среза.

Для измерения деформаций поперечной арматуры были использованы линейные тензорезисторы с базой 5 и 10 мм. На основную поперечную арматуру тензорезисторы наклеивались в пазах, полученных после извлечения пенопластовых деталей, привязанных к хомутам, из тела бетона опытных балок.

Ширина раскрытия наклонных трещин измерялась на уровне пересечения их с хомутами поперечной арматуры при помощи отсчетного микроскопа МПБ-2 на каждом этапе.

Помимо перечисленного, на каждом этапе фиксировался прогиб балки, замеренный прогибмером часового типа БПАО с ценой деления 0,01 мм, установленным с учетом подвижности основания испытательной установки в центре пролета образца на специальной рамке.

При работе с тензорезисторами использовался автоматический измеритель деформаций АИД-4. За нулевые отсчеты приборов принимались отсчеты с учетом собственного веса балки. Для измерения деформаций бетона зоны среза применялись прямоугольные тензометрические розетки, составленные из линейных тензорезисторов с базой 50 мм.

Схема расположения тензометрических розеток на боковой поверхности опытных балок приведена на рисунке 2.

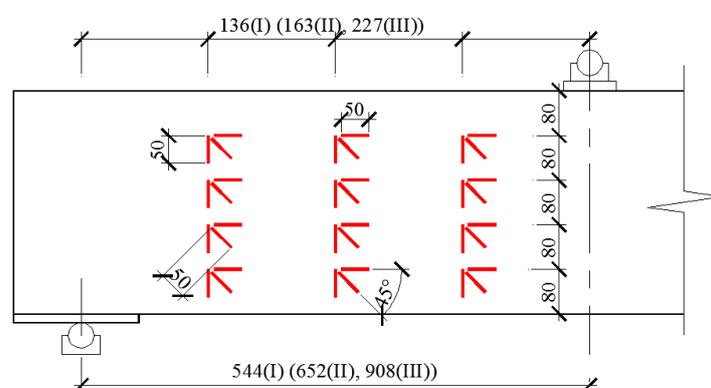


Рис. 2. Схема расположения тензометрических розеток на боковой поверхности опытных образцов-балок серий I – III

Усиление опытных балок проводилось в начальном напряженном состоянии или под нагрузкой, составляющей 49 – 71 % от разрушающей. Усиление опытных балок I – III серий выполнялось установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры в следующей последовательности:

1) со стороны нижней грани усиливаемых балок напротив хомутов поперечной арматуры просверливались сквозные отверстия диаметром 14 мм посередине ширины элемента снизу вверх, количество отверстий определялось количеством хомутов поперечной арматуры, попадающих в зону среза опытных балок при конкретном пролете среза;

2) в просверленные отверстия устанавливались стержни дополнительной поперечной арматуры длиной 500 мм, диаметром 12 мм класса S240 с предварительно нарезанной по концам резьбой M12 и заранее наклеенными линейными тензорезисторами с базой 10 мм;

3) стержни дополнительной поперечной арматуры закреплялись на усиливаемых балках путем установки распределительных пластин-шайб и закручивания гаек;

4) стержни дополнительной поперечной арматуры перед дальнейшим загрузением балок предварительно напрягались путем закручивания гаек по концам. Величина предварительного напряжения задавалась одинаковой для всех стержней и контролировалась при помощи полученной при испытании дополнительной поперечной арматуры на растяжение зависимости по показаниям деформаций линейных тензорезисторов;

5) на стержни дополнительной предварительно напряженной арматуры накручивались контргайки.

Необходимо отметить, что установка дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры при усилении опытных балок проводилась в выполненные отверстия с диаметром, превышающим диаметр дополнительной поперечной арматуры, а пространство в отверстиях между арматурой и бетоном усиливаемых элементов ничем не заполнялось. Таким образом, дополнительная предварительно напряженная арматура работала без сцепления с бетоном по длине.

Для более равномерной передачи усилий обжатия балки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматурой распределительные пластины укладывались на слой гипсового раствора толщиной 2 – 3 мм.

Схема усиления образцов представлена на рисунке 3.

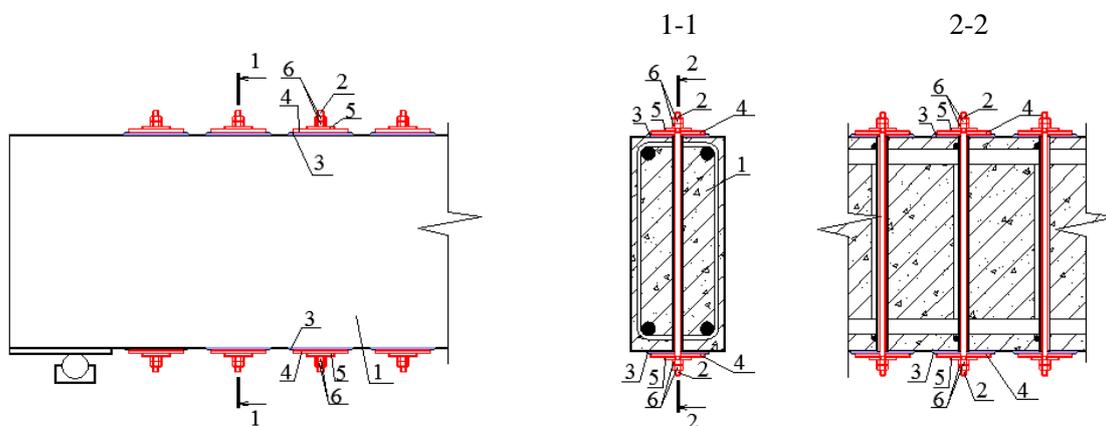


Рис. 3. Схема усиления опытных балок:

- 1 – усиливаемый образец; 2 – дополнительная поперечная арматура  $\varnothing 12$  мм;  
3 – слой гипсового раствора толщиной 2 – 3 мм; 4 – стальная распределительная пластина  $100 \times 100 \times 5$  мм;  
5 – стальная пластина-шайба  $50 \times 50 \times 5$  мм; 6 – гайка и контргайка M12

**Физико-механические характеристики бетона и арматуры.** Определение физико-механических характеристик бетона опытных образцов-балок производилось непосредственно после их испытания на образцах-призмах с размерами  $100 \times 100 \times 400$  мм, выполненных из бетона тех же замесов, что и опытные образцы-балки, в соответствии с [3; 4].

В ходе испытания образцов-призм при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленных на базе 200 мм, измерялись деформации на каждой грани. Величина прикладываемой нагрузки определялась по силоизмерителю прессы.

Прочностные характеристики бетона опытных балок представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики бетона опытных балок

Шифр балки	Призменная прочность $f'_c$ , Па	Модуль упругости $E_c$ , МПа
Б-I-1	25,3	31210
Б-I-2	24,3	30900
Б-I-3	23,9	30825
Б-II-1	23,9	31230
Б-II-2	24,4	31120
Б-II-3	24,3	31135
Б-III-1	24,5	30280
Б-III-2	26,1	30710
Б-III-3	24,9	30565

Для определения физико-механических характеристик арматуры опытных образцов-балок испытывались отрезки арматуры тех же партий, что и использовались при изготовлении каркасов, в соответствии с [5]. Площадь поперечного сечения профилированной и гладкой арматуры определялась взвешиванием.

Для определения деформаций использовались индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм и тензорезисторы. Физико-механические характеристики арматуры приведены в таблице 3.

Таблица 3

## Физико-механические характеристики арматуры

Диаметр, класс арматуры	Средняя площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Предел текучести $f_y$ , МПа	Временное сопротивление $f_t$ , МПа	Модуль упругости $E_s$ , МПа
Ø28, S500	621,2	618,4	633,3	$2,02 \cdot 10^5$
Ø6,5, S240	33,1	348,3	543,1	$2,11 \cdot 10^5$
Ø12, S240	113,1	345,1	490,2	$2,12 \cdot 10^5$

**Трещинообразование и формы разрушения.** На начальных этапах нагружения опытные неусиленные (эталонные) балки Б-I-1, Б-II-1, Б-III-1 вели себя примерно одинаково. Вначале образовывались нормальные трещины в сечениях с постоянной величиной изгибающего момента (в зоне чистого изгиба). С увеличением нагрузки трещины развивались, рядом появлялись другие, менее развитые трещины. Затем в зоне среза появлялись наклонные трещины в виде развивающихся от одной из нормальных трещин (I тип) или образовавшиеся самостоятельно в средней зоне по высоте балки (II тип). При этом I тип наклонных трещин появлялся в опытных балках с пролетами среза, равными  $2,5d$  и  $2d$ ; II тип – с пролетом среза  $1,5d$ . Наклонные трещины появлялись в бетоне зоны среза как между поперечной арматурой, так и по оси арматуры. Расстояния между наклонными трещинами в зоне среза у всех эталонных балок были близки по величине и составили 110 – 160 мм. Угол наклона критической наклонной трещины в зоне среза был близок к углу наклона линии, соединяющей грань опорной площадки с гранью пластины, через которую передавалась действующая нагрузка. При дальнейшем нагружении критическая наклонная трещина развивалась, достигая сжатой зоны балки, и в итоге происходило ее разрушение от среза. До появления наклонных трещин в опытных балках с большим пролетом среза образовалось больше нормальных трещин с большей шириной раскрытия.

Характер работы опытных балок Б-I-2, Б-II-2, Б-III-2, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной арматуры в исходном напряженно-деформированном состоянии (под воздействием собственного веса), отличался от работы эталонных балок. Наклонные трещины появлялись при значительно больших усилиях от действующей нагрузки, а ширина их раскрытия при одном и том же усилии, действующем в зоне среза, уменьшалась. При этом положительное влияние дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры на уменьшение ширины раскрытия наклонных трещин возрастало с увеличением пролета среза. Для балок с пролетами среза  $2,5d$  и  $2d$  изменилось образование наклонных трещин с I на II тип. Кроме того, наклонные трещины появлялись в бетоне зоны среза в средней части по высоте балок между стержнями основной и дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры.

В балках Б-II-2 и Б-III-2 с пролетами среза  $2d$  и  $2,5d$  увеличился по сравнению с эталонными угол наклона к продольной оси трещин в зоне среза, а в балке Б-I-2 с пролетом среза  $1,5d$  угол наклона был близок к углу наклона трещины в соответствующей эталонной балке Б-I-1. Расстояния между наклонными трещинами в зоне среза у балок Б-I-2, Б-II-2, Б-III-2 уменьшились по сравнению с соответствующими эталонными и составили 80 – 120 мм, а количество наклонных трещин в зоне среза увеличилось. Это объясняется наличием в зоне среза дополнительной предварительно напряженной арматуры усиления, установленной сосредоточенно в одном поперечном сечении с основной поперечной арматурой. Разрушение усиленных балок происходило по одной из наклонных трещин, которая в процессе нагружения выделялась в критическую, с последующим срезом сжатой зоны.

Характер трещинообразования опытных балок Б-I-3, Б-II-3, Б-III-3, усиленных под нагрузкой, составляющей соответственно 71, 57, 49 % от прочности соответствующих эталонных балок, на начальных этапах до усиления аналогичен характеру неусиленных балок Б-I-1, Б-II-1, Б-III-1. После установки и предварительного напряжения дополнительной поперечной арматуры ширина раскрытия наклонных трещин не изменилась. При дальнейшем увеличении нагрузки развитие критических наклонных трещин по их длине и ширине не происходило на протяжении ряда этапов. В это время появлялись соседние наклонные, а также развивались нормальные трещины, увеличивалось их количество и уменьшалось расстояние между ними. На этапах, предшествующих разрушению, возобновлялось развитие наклонных трещин (увеличивались ширина их раскрытия и длина). Расстояние между наклонными трещинами в зоне среза у опытных балок Б-I-3, Б-II-3, Б-III-3 составляло 90 – 150 мм. Разрушение происходило от среза по наклонной трещине, угол наклона которой по отношению к продольной оси оставался неизменным с момента появления трещины до усиления балок, что подтверждает принятую гипотезу о том, что *при усилении элемента после образования наклонных трещин расстояние между ними после усиления равно расстоянию между наклонными трещинами элемента до усиления*. Зависимости ширины раскрытия критической наклонной трещины от поперечного усилия в опытных балках показаны на рисунках 4 – 6.

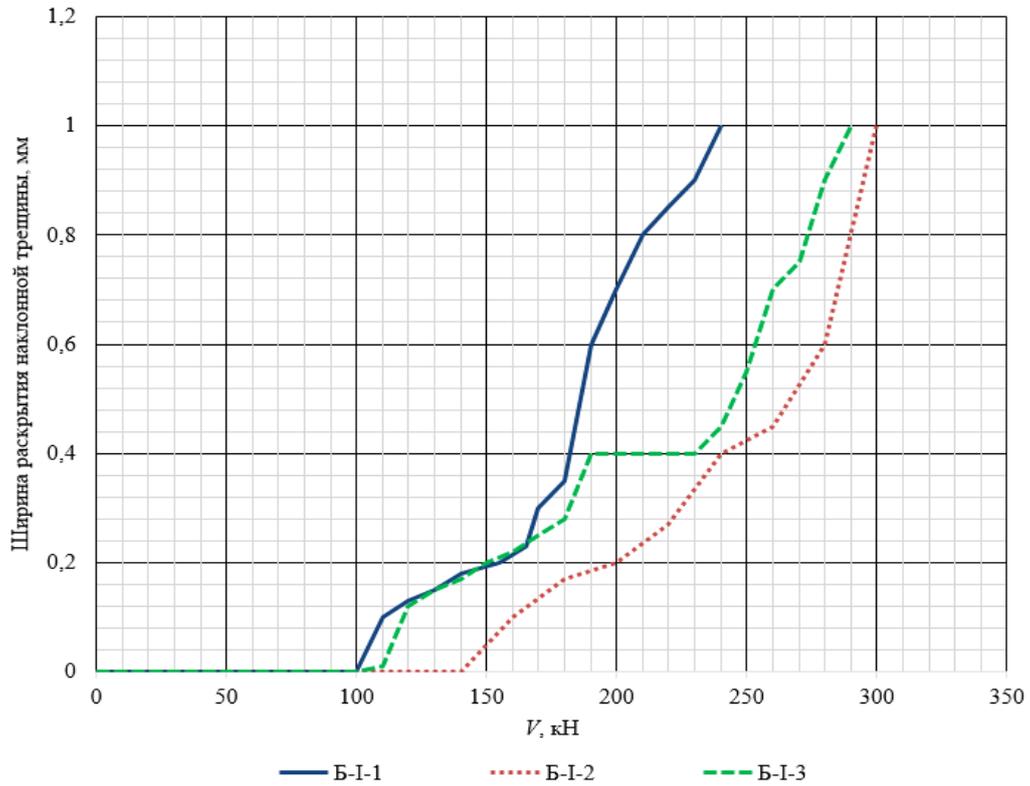


Рис. 4. Зависимость ширины раскрытия критической наклонной трещины от поперечной силы для опытных балок I серии

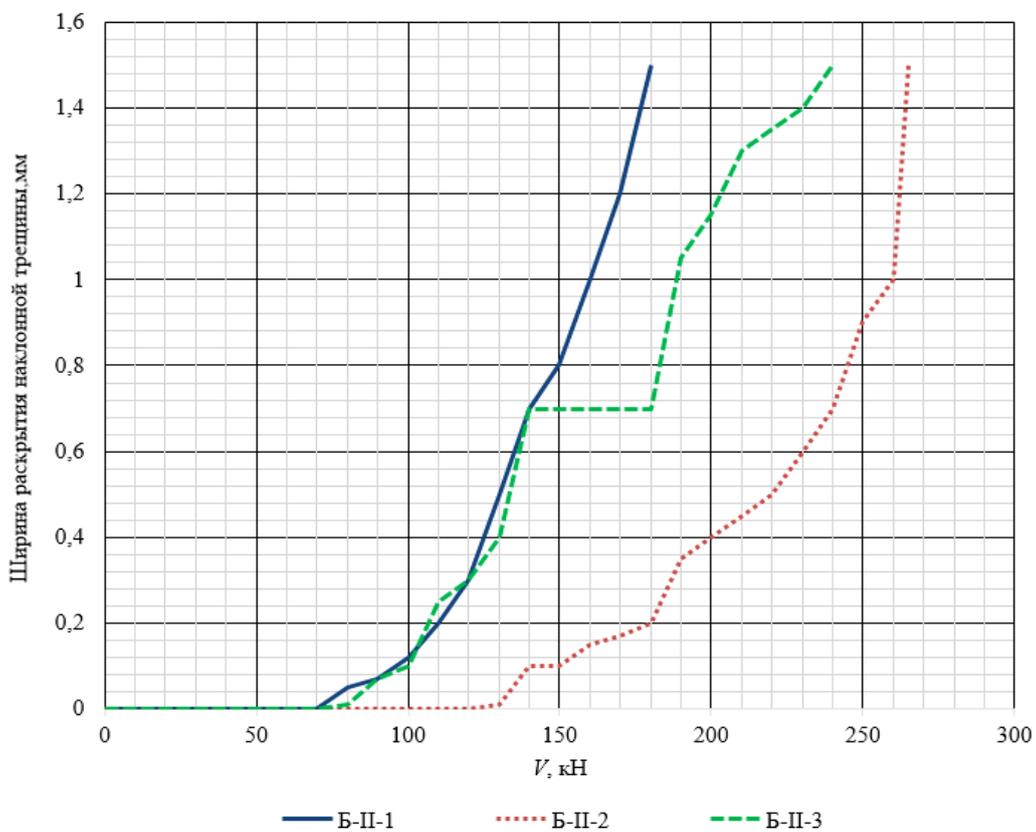


Рис. 5. Зависимость ширины раскрытия критической наклонной трещины от поперечной силы для опытных балок II серии

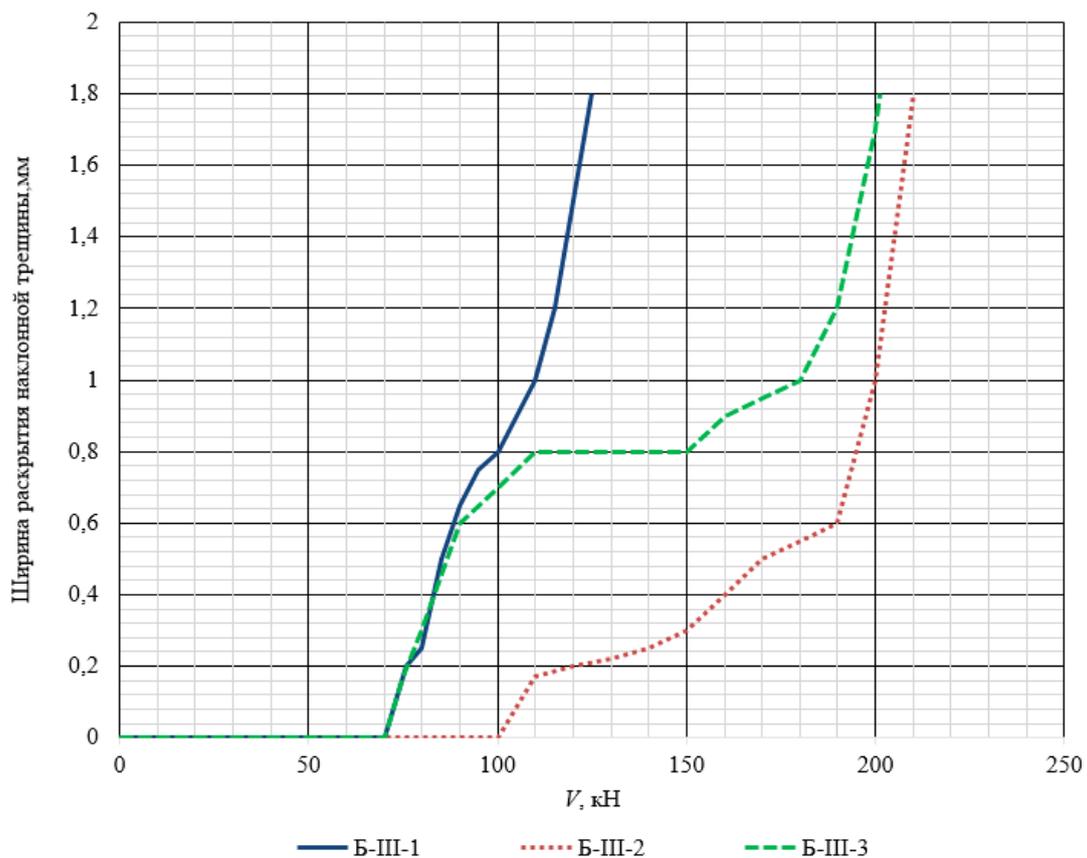


Рис. 6. Зависимость ширины раскрытия критической наклонной трещины от поперечной силы для опытных балок III серии

Общий вид опытных балок после испытаний представлен на рисунках 7 – 9.

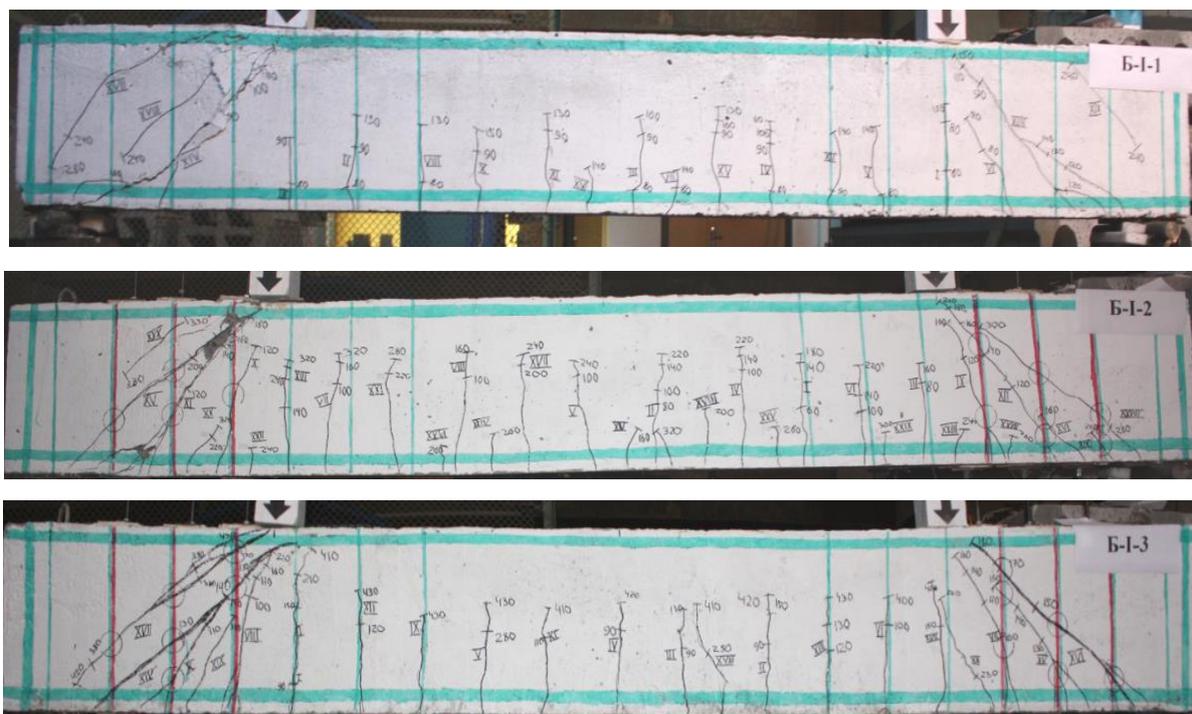


Рис. 7. Общий вид опытных балок I серии после испытаний

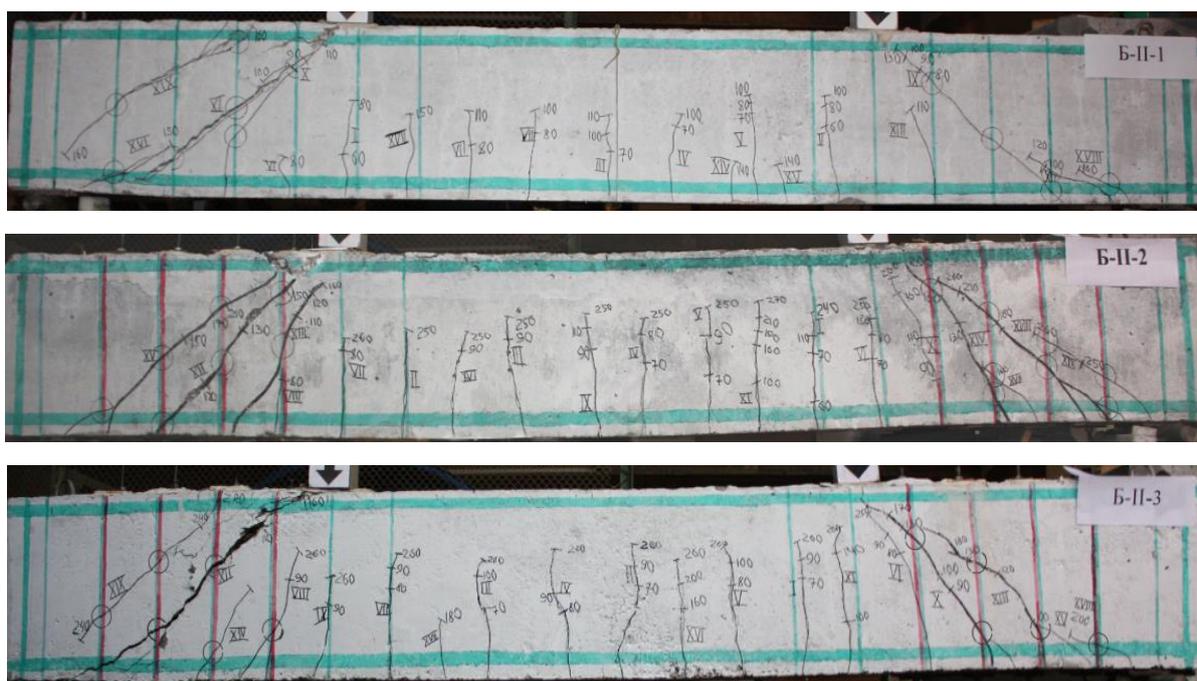


Рис. 8. Общий вид опытных балок II серии после испытаний

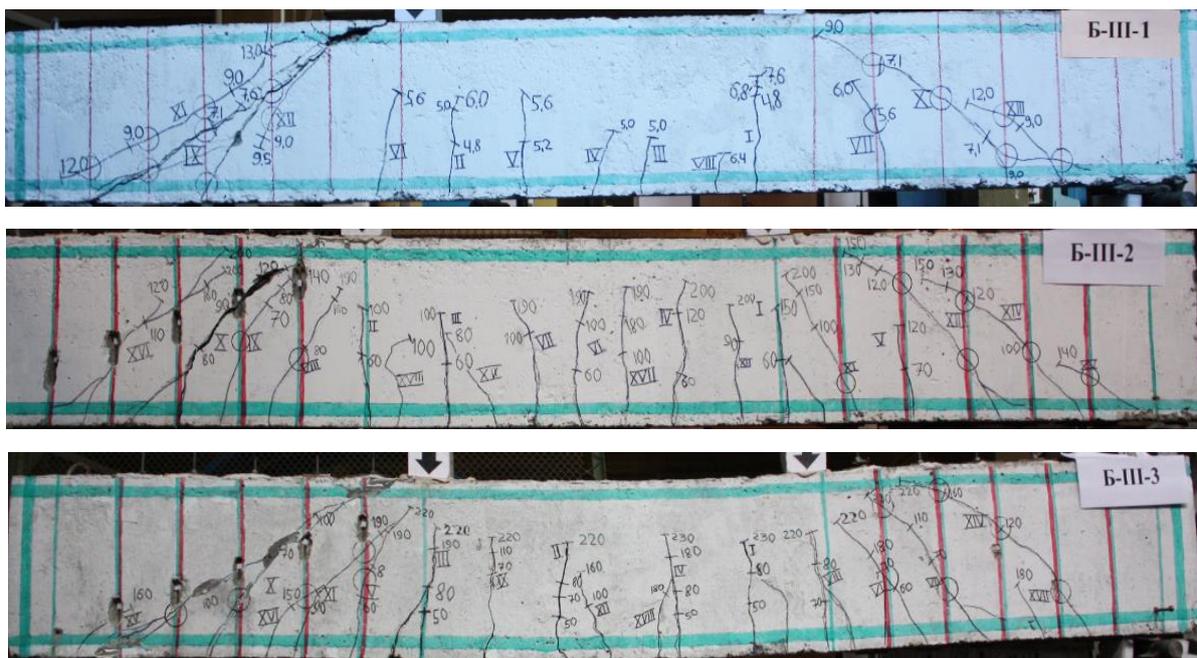


Рис. 9. Общий вид опытных балок III серии после испытаний

**Анализ результатов экспериментально-теоретических исследований.** Проведенные экспериментальные исследования показали, что все опытные балки, усиленные в зоне среза установкой дополнительной предварительной напряженной арматуры, разрушились в зоне среза по критической наклонной трещине с достижением основной и дополнительной поперечной арматуры относительных деформаций, соответствующих пределу текучести. При этом в процессе нагружения опытных балок, усиленных под нагрузкой, относительные деформации в основной поперечной арматуре раньше, чем в дополнительной, достигали значений, соответствующих пределу текучести. Перед разрушением опытных балок относительные деформации в основной поперечной арматуре превышали относительные деформации, соответствующие началу площадки текучести.

Для сопоставления с результатами экспериментальных данных расчет прочности усиленных в зоне среза опытных балок производился по методу предельных равновесий (по наклонной трещине) [6], методу ферменной аналогии [6; 7], методике расчета усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов [8], а также по предлагаемой методике с использованием программы [1; 2; 9].

Результаты расчета и их сопоставление с опытными данными представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты расчета прочности опытных балок в зоне среза

Шифр балки	$V_{exp}$ , кН	$V_{th}$ , кН, [6]	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ [6]	$V_{th}$ , кН, [7]	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ [7]	$V_{th}$ , кН, [8]	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ [8]	$V_{th}$ , кН, [1; 2]	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ [1; 2]
Б-I-1	283,3	281,05	1,01	50,34	5,63	–	–	267,3	1,06
Б-I-2	482,8	398,01	1,21	143,44	3,37	–	–	465,5	1,04
Б-I-3	460,8	398,01	1,16	143,44	3,21	384	1,20	445,3	1,03
Б-II-1	244,5	252,5	0,97	50,34	4,86	–	–	236,3	1,03
Б-II-2	351,4	351,74	1,00	143,44	2,45	–	–	363,2	0,97
Б-II-3	335,6	351,74	0,95	143,44	2,34	344,7	0,97	348,5	0,96
Б-III-1	184,8	224,5	0,82	50,34	3,67	–	–	176,3	1,05
Б-III-2	315,6	323,7	0,97	143,44	2,20	–	–	290,9	1,08
Б-III-3	295,4	323,7	0,91	143,44	2,06	316,7	0,93	276,4	1,07

Анализ результатов расчетов и сопоставление с экспериментальными данными показывает удовлетворительную сходимость предлагаемой методики расчета прочности усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов, которая учитывает:

- начальное напряженно-деформированное состояние усиливаемых элементов при усилении;
- предварительное напряжение дополнительной поперечной арматуры;
- различные физико-механические и геометрические характеристики усиливаемой и усиливающей частей усиленного в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента [1; 2].
- напрямую учитывает комбинацию внутренних усилий (для опытных балок, кроме поперечной силы – изгибающий момент).

Рассмотренные методы расчета прочности железобетонных элементов в зоне среза в действующих нормативных документах [6 – 8] не учитывают особенности деформирования под нагрузкой усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов, что подтверждается результатами сопоставления с опытными данными (см. табл. 4).

**Заключение.** В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

- экспериментально подтверждена эффективность усиления в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, в том числе под нагрузкой;
- выполнены экспериментальные исследования, получены новые экспериментальные данные о характере разрушения, особенностях деформирования, образования, развития и раскрытия трещин усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов (в том числе усиленных под нагрузкой) в результате комплексных испытаний опытных балок;
- результаты экспериментально-теоретических исследований показали удовлетворительную сходимость с опытными данными результатов расчетов по предложенной методике расчета [1; 2] усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пецольд, Т.М. Методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза / Т.М. Пецольд, Е.Д. Лазовский, Д.О. Глухов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2012. – № 16. – С. 40 – 45.

2. Лазовский, Е.Д. Предпосылки, методика и программа для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов / Е.Д. Лазовский, Д.О. Глухов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2013. – № 16. – С. 33 – 39.
3. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 45 с.
4. Бетон: ГОСТ 24452-80. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 18 с.
5. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение: ГОСТ 12004-81. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 45 с.
6. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02 / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск, 2003. – 140 с.
7. ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) Еврокод 2 проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск, 2010.
8. Усиление железобетонных конструкций: Пособие П1-98 к СНиП 2.03.01-84\* / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 1998. – 189 с.
9. Применение мягких вычислений для сглаживающей аппроксимации сложных сингулярных зависимостей / Д.О. Глухов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2012. – № 12. – С. 2 – 5.

*Поступила 18.11.2013*

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF STRENGTH  
OF STEEL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS REINFORCED  
THE SLICER AREA INSTALLING ADDITIONAL  
PRELIMINARY TENSE TRANSVERSE REINFORCEMENT**

*Y. LAZOUSKI*

*The results of experimental and theoretical research of strength of steel reinforced concrete members reinforced the slicer area installing additional preliminary tense transverse reinforcement are presented. Comparison of the results of the experiment with the data, obtained through the calculation on the proposed methodology developed by the author, based on provisions of the overall deformation model and the modified compression field theory, is carried out.*

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 691.5.535

### К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В ШТУКАТУРНЫХ РАСТВОРАХ

*канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ, Ю.В. ВИШНЯКОВА,  
канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается предложение применять в качестве мелкодисперсного наполнителя для штукатурных растворов шлам водоочистки. Определены оптимальные расходы наполнителя в цементных композициях, обоснованные данными лазерного микроанализа частиц. Приведены результаты исследований основных свойств штукатурных растворных смесей и растворов с карбонатосодержащим наполнителем. Установлено оптимальное количество наполнителя для цементных и известковых штукатурных растворов. Дополнительно полученные результаты по жизнеспособности и морозостойкости подтверждают возможность применения штукатурных растворов, содержащих карбонатосодержащий наполнитель.*

В лаборатории строительных материалов проведены исследования по изучению основных свойств штукатурных растворных смесей и растворов с карбонатосодержащим наполнителем. Наполнитель получали из многотоннажного вторичного продукта Полоцкой и Новополоцкой ТЭЦ – шлама водоочистки путем предварительной сушки и последующего измельчения.

На начальном этапе проведены исследования прочности композиций на цементах ПЦ500 Д20 заводов ПРУП «Белорусский цементный завод» и ПРУП «Кричевцементношифер», содержащих известь и наполнитель, с определением показателей нормальной густоты. Наполнитель вводили в количестве от 10 до 60 % от массы цемента. Наибольший размер частиц наполнителя составил 80 мкм. Испытания проводили на образцах-кубиках размером 20×20×20 мм. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Прочность и нормальная густота цементных композиций

Наименование завода	№ состава	Расход		Прочность, МПа		Нормальная густота
		извести, % от массы цемента	наполнителя, % от массы цемента	7 суток	28 суток	
ПРУП «Кричевцементно-шифер»	1	–	–	28,4	42,6	0,25
	2	30	–	20,1 (100)	29,5 (100)	0,37
	3	–	10	25,5 (127)*	38,4 (130)*	0,27
	4	–	20	23,1 (115)	35,6 (121)	0,3
	5	–	30	21,8 (108)	33,2 (113)	0,33
	6	–	40	18,6 (93)	29,9 (101)	0,37
	7	–	50	15,1 (75)	25,5 (86)	0,4
	8	–	60	13,6 (68)	24,9 (84)	0,45
ПРУП «Белорусский цементный завод»	1	–	–	24,9	39,2	0,28
	2	30	–	18,3 (100)	27,4 (100)	0,40
	3	–	10	23,6 (129)*	34,8 (127)*	0,30
	4	–	20	21,4 (117)	32,6 (119)	0,32
	5	–	30	19,7 (108)	29,5 (108)	0,35
	6	–	40	16,3 (89)	26,2 (97)	0,39
	7	–	50	14,5 (79)	23,4 (86)	0,43
	8	–	60	12,1 (66)	22,9 (85)	0,48

\* – изменение прочности цементных композиций с наполнителем относительно цементно-известковой композиции, выраженное в процентах.

Анализ полученных результатов позволяет установить, что увеличение дозировки наполнителя ведет к повышению показателя нормальной густоты. Увеличение водопотребления в свою очередь приводит к

снижению прочности цементных композиций с наполнителем. Так, например, прочность составов 3 практически в 2 раза выше прочности составов 8 в возрасте 7 суток и в 1,5 раза – в возрасте 28 суток.

Значения прочности цементных композиций, содержащих наполнитель в количестве 20 – 30 % от массы цемента (составы 4, 5), превышают показатели цементно-известковых композиций (составы 2) в возрасте 7 суток на 8 – 17 %, а в возрасте 28 суток – на 8 – 21 %; значения нормальной плотности ниже на 12 – 20 %. Введение наполнителя в количестве 50 – 60 % вызывает снижение прочности цементного камня (составы 7, 8), при этом показатели нормальной плотности превышают значения цементно-известковых композиций.

Для определения размеров частиц наполнителя и цемента использовали лазерный микроанализатор размеров частиц «Analysette 22» NanoТес немецкой фирмы «FRITTSCH». С помощью специальной программы по обработке результатов получены характеризующие их зависимости (рис. 1, 2).

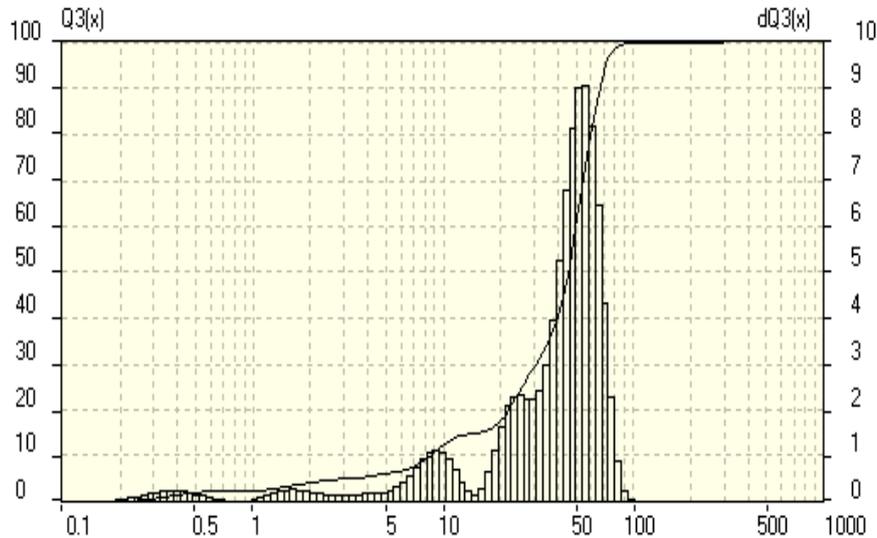


Рис. 1. Распределение частиц наполнителя по размерам:  
 $Q3(x)$  – кумулятивная кривая распределения;  $dQ3(x)$  – кривая распределения плотности

Полученные результаты позволяют проследить распределение частиц по размерам в наполнителе (см. рис. 1). Фракция частиц наполнителя размером до 1 мкм составляет 2,4 % от общего количества. В диапазоне от 1 до 2 мкм содержания частиц равно 1,7 % от массы пробы наполнителя. Содержание частиц в диапазонах 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5; 5 – 10 мкм колеблется в пределах от 0,5 до 6,1 %. Далее происходит увеличение содержания количества частиц по фракциям. Так, частицы размером от 10 до 50 мкм составляют 48,2 %. Наибольшее количество частиц 49,7 % приходится на фракцию размером от 50 до 100 мкм.

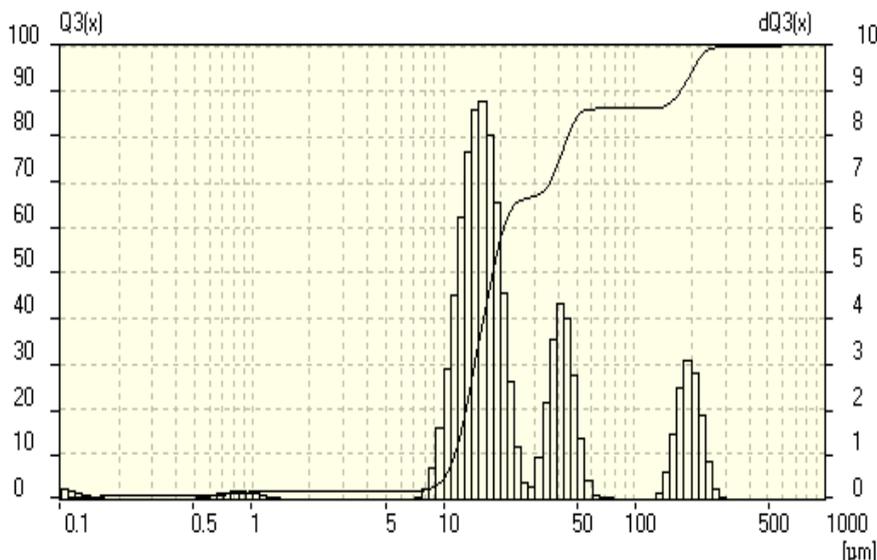


Рис. 2. Распределение частиц цемента по размерам:  
 $Q3(x)$  – кумулятивная кривая распределения;  $dQ3(x)$  – кривая распределения плотности

Распределение частиц по размерам в цементе происходит следующим образом (см. рис. 2). Частицы цемента фракций от 0,05 до 1 мкм составляют 1,7 % от общего количества. Содержание частиц в диапазонах 1 – 2 и 5 – 10 колеблется в пределах от 0,3 до 2,5 %. Наибольшее количество частиц 53,7 % приходится на фракцию размером от 10 до 20 мкм. В диапазоне от 20 до 50 мкм содержание частиц составляет 25,7 % от массы пробы цемента. Колебание содержания частиц в диапазонах 50 – 100 и 100 – 200 мкм находится в пределах от 2,6 до 7,9 %.

Анализ полученных кривых распределения позволяет сделать вывод о том, что размеры частиц наполнителя сопоставимы с размерами частиц цемента. При оптимальном расходе частицы наполнителя позволяют формировать более плотную структуру цементного камня, что объясняет сопоставимые результаты по прочности цементной композиции с наполнителем (составы 4, 5) по отношению к цементно-известковой композиции (состав 2), представленные в таблице 1.

Оптимальное количество наполнителя для штукатурных цементных и известковых растворных смесей определяли, основываясь на показателях прочности растворов, расслаиваемости и водоудерживающей способности растворных смесей. За контрольные принимали составы цементно-известковых штукатурных растворов марок М 50 и М 75 с расходом цемента 156 и 192 кг соответственно, а также известково-песчаный раствор с соотношением извести и песка 1:6, используемый для внутренних отделочных работ. Подвижность растворных смесей составляла 8 см. В исследованиях использовался наполнитель с наибольшим размером зерен 80 мкм. Результаты исследований приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Основные показатели качества штукатурных цементных растворных смесей и растворов

№ состава	Марка контрольного состава	Расход на 1 м <sup>3</sup> , кг			В/Т	Прочность, МПа		Расслаиваемость, %	Водоудерживающая способность, %
		цемента	извести	наполнителя		7 сут	28 сут		
1	М50	156	96 (60*)	–	1,46	3,5	5,1	8,0	96,8
2		160	–	40 (30*/40")	1,69	3,2	4,3	9,8	95,8
3		159	–	59 (40/60)	1,5	3,8	5,2	8,1	96,5
4		157	–	78 (50/80)	1,39	4,2	5,7	8,0	97,0
5		156	–	96 (60/100)	1,45	3,6	5,1	8,4	97,2
6		155	–	114 (70/120)	1,49	3,2	4,5	9,2	97,9
7	М75	192	90 (50)	–	1,28	5,0	7,5	8,3	96,5
8		197	–	37(20/40)	1,48	4,3	7,0	9,6	95,7
9		195	–	55 (30/60)	1,35	5,2	7,6	8,5	96,2
10		194	–	72 (40/80)	1,21	5,8	8,3	8,0	96,5
11		192	–	90 (50/100)	1,3	5,1	7,7	8,3	97,0
12		190	–	107 (60/120)	1,34	4,6	7,2	9,0	97,4

\* – процент ввода извести или наполнителя от расчетной массы цемента;  
 " – процент ввода наполнителя от расчетной массы извести.

За первые 7 суток наибольшей прочности достигли образцы цементного раствора с наполнителем в количестве 80 % от расчетной массы извести. Для марки М 50 прирост прочности составил 20 %, а для марки М 75 – 16 %. При этом значения прочности экспериментальных составов 3 – 5 и 9 – 11 не ниже показателей контрольных составов 1 и 7. Испытания в возрасте 28 суток показали, что прирост прочности составов 4 и 10 относительно контрольных значений незначителен и сократился до 11 – 12 %.

Увеличение расхода наполнителя с 40 до 120 % ведет к увеличению расхода воды на 15 – 19 %. Водоцементное отношение экспериментальных составов 4 и 10 указывает на то, что водопотребность композиций сокращается на 40 литров по сравнению с расходом воды в контрольных растворных смесях.

Наиболее низкая расслаиваемость растворных смесей соответствует составам 3 – 5, 9 – 11 и аналогична показателям цементно-известковых растворов. Введение наполнителя в количестве менее 60 % и более 100 % от расчетной массы извести способствует увеличению расслаиваемости растворных смесей.

Водоудерживающая способность экспериментальных смесей возрастает по мере увеличения дозировки наполнителя. Основываясь на экспериментальных данных, можно сделать вывод, что по основным свойствам оптимальным является введение наполнителя в количестве 60 – 100 % от расчетной массы извести.

В известково-песчаных составах часть извести от 20 до 60 % заменяли наполнителем в количестве 80 % от сокращаемого расхода извести.

В возрасте 7 суток составы 3 – 5 показали прочность сопоставимую или превышающую показатель контрольного состава. Так, у состава 4 при замене 40 % извести наполнителем прочность на 60 %

превышает контрольное значение. Следует отметить, что уже в возрасте 28 суток разница между показателями состава 1 и состава 4 существенно сократилась и составляет 20 %. При этом прочность известковых растворов с наполнителем (составы 3, 5) находится на уровне значений известково-песчаного раствора (состав 1).

Таблица 3

Основные показатели качества штукатурных известковых растворных смесей и растворов

№ состава	Расход, кг			Прочность, МПа		Расслаиваемость, %	Водоудерживающая способность, %
	известки	наполнителя	воды	7 сут	28 сут		
1	230	–	343	0,8	1,5	7,8	96,2
2	190	38 (20 %)*	328	0,6	1,5	7,8	96,5
3	169	58 (30 %)	314	0,8	1,6	7,9	96,3
4	147	78 (40 %)	305	1,3	1,8	8,1	96,6
5	124	99 (50 %)	301	0,9	1,5	8,0	96,4
6	99	118 (60 %)	301	0,7	1,2	8,3	96,0

\* – процент сокращения расхода известки по массе.

Сокращение расхода известки снижает водопотребление растворных смесей. Так, для состава 4 расход воды сокращается на 20 % по сравнению с контрольным составом. При расходе известки 40 – 50 % от расчетной массы контрольного раствора (составы 5, 6) требуемое количество воды становится постоянным.

Исследования расслаиваемости и водоудерживающей способности не выявили выраженных зависимостей от количества содержащегося наполнителя в растворных смесях. Расслаиваемость смесей изменяется в пределах 7,8 – 8,3 %, а водоудерживающая способность – 96 – 96,6 %.

Анализ полученных результатов показал, что оптимальным является сокращение расхода известки на 40 – 50 % при введении наполнителя в количестве 80 % от сокращенного расхода известки. Кроме того, в процессе исследований установлено:

- усадочные деформации для цементно-известковых растворов составили 1,5 – 1,8 мм/м, для цементных с наполнителем – 0,7 – 1,1 мм/м;
- у известкового контрольного состава усадочные деформации равны 2,1 мм/м, а у известковых растворов с наполнителем показатели составили 1,2 – 1,4 мм/м;
- снижение усадочных деформаций на 40 – 60 % способствует формированию более однородной структуры, снижает вероятность появления микротрещин и тем самым повышает прочность штукатурных растворов, содержащих наполнитель.

При производстве штукатурных работ важным показателем растворных смесей является жизнеспособность. С целью выяснения срока возможного применения растворных смесей с наполнителем оценивалось изменение подвижности с течением времени. По экспериментальным данным испытаний построены зависимости, иллюстрирующие изменение подвижности штукатурных растворных смесей от времени проведения испытаний (рис. 3).

В течение получаса зафиксировано уменьшение подвижности у цементной и цементно-известковой растворной смеси. После первого часа испытаний неизменным осталось значение подвижности только у цементного состава с наполнителем в количестве 100 % от расчетной массы известки. Наибольшее падение подвижности на 1,6 см отмечено у цементной растворной смеси. Через 3 часа после начала испытаний подвижность цементной смеси достигла 5 см, а цементно-известковой – 5,5 см. За это же время подвижность составов с наполнителем уменьшилась на 11 – 22 %. Еще через один час подвижность цементно-известковой растворной смеси составила 4,9 см, а у смесей с наполнителем – 5,9 – 6,5 см.

Установлено, что изменение подвижности у штукатурных растворных смесей в сторону уменьшения показателя происходит значительно медленнее, чем у цементного, цементно-известкового составов, и достигло 5 см только через 6 – 8 часов после начала испытаний. Для штукатурных смесей жизнеспособность увеличивается на 1 – 2 часа.

Интенсивное изменение подвижности у штукатурных смесей объясняется не только более низкой первоначальной подвижностью, но и большим количеством цемента в штукатурных составах.

В экспериментальных штукатурных смесях увеличение дозировки наполнителя до 100 % от массы известки ведет к замедлению процессов гидратации цемента и увеличению сроков схватывания, что можно объяснить возрастанием количества органических примесей, содержащихся в наполнителе в количестве до 10 %, а также присутствием в наполнителе гипса в количестве до 9 %. На начальной стадии гидратации образующийся этрингит в тонкодисперсном состоянии замедляет гидратацию  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  и продлевает сроки схватывания цемента.

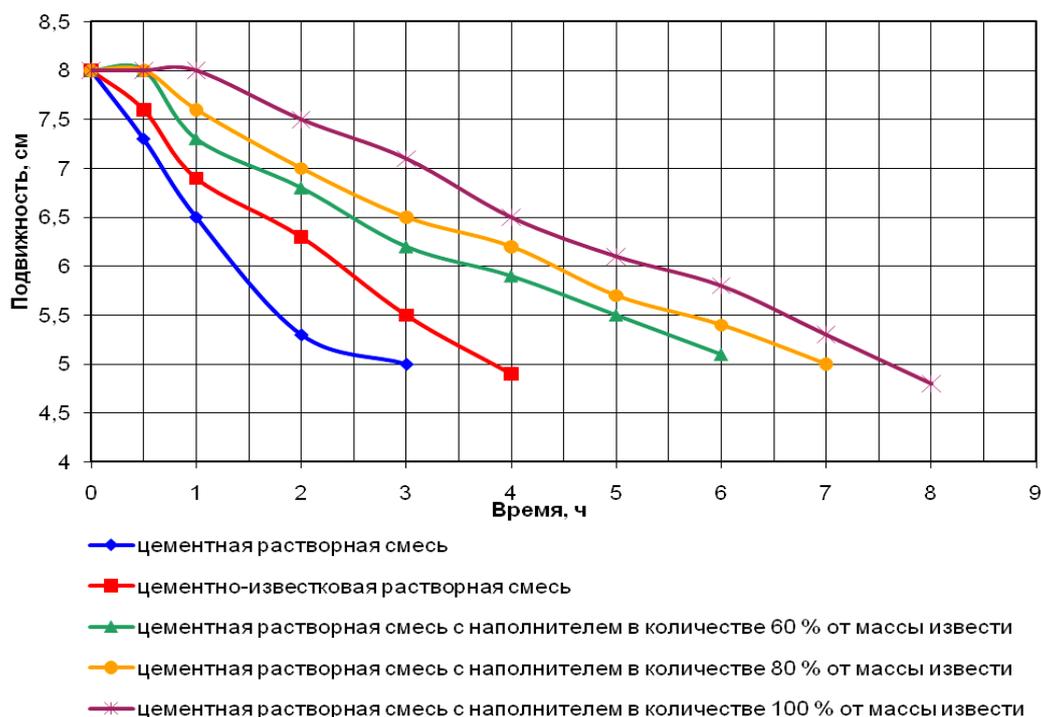


Рис. 3. Изменение подвижности штукатурных растворов с течением времени

Теплотехнические характеристики штукатурных цементных растворов определяли на составах марки М 75. Контрольными являлись цементно-известковые растворы. За контрольный для штукатурных известковых растворов принят состав с соотношением 1:6. Результаты исследований приведены в таблицах 4 и 5 (показатели плотности, коэффициента теплопроводности приведены для растворов в сухом состоянии).

Таблица 4

## Теплотехнические показатели цементных растворов

№ состава	Назначение раствора	Расход, кг		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Термическое сопротивление, м <sup>2</sup> К/Вт	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)
		известь	наполнитель				
1	штукатурный	90	–	1820	0,51	0,048	0,1
2		–	72 (80 %)	1920	0,45	0,064	0,095

\* – процент ввода наполнителя от расчетной массы извести

В экспериментальных составах с наполнителем плотность увеличивается относительно контрольных растворов на 90 – 110 кг/м<sup>3</sup>. Увеличение плотности растворов обусловлено формированием оптимальной плотной структуры цемент – наполнитель, понижающей исходную пустотность системы, а также более низким водотвердым отношением растворов с наполнителем.

Таблица 5

## Теплотехнические показатели известковых растворов

№ состава	Назначение раствора	Расход, кг		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Термическое сопротивление, м <sup>2</sup> К/Вт	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)
		известь	наполнитель				
1	штукатурный	230	–	1690	0,39	0,081	0,12
2		147	78 (40 %)*	1780	0,35	0,095	0,11

\* – процент сокращения расхода извести по массе

Коэффициент паропроницаемости штукатурных известковых растворов на 14 – 16 % превышает значения цементных композиций. Для цементных растворов коэффициент паропроницаемости практически не изменяется и находится в пределах 0,095 – 0,1 мг/(м·ч·Па), а для известковых растворов равен 0,11 – 0,12 мг/(м·ч·Па).

Формирование более плотной структуры растворов с наполнителем ведет к уменьшению открытой пористости по сравнению с контрольными составами. Поэтому, несмотря на более высокую плотность экспериментальных составов с наполнителем, показатели коэффициентов теплопроводности на 11 – 15 % ниже значений контрольных составов. При этом термическое сопротивление увеличивается на 15 – 25 %.

Таким образом, цементные и известковые растворы, содержащие наполнитель по своим теплотехническим характеристикам обеспечивают необходимые параметры для отделки как со стороны фасада, так и со стороны помещений в зданиях.

Важным показателем долговечности растворов является морозостойкость. При проведении исследований определяли морозостойкость штукатурных цементных растворов марок М50 и М75. Результаты испытаний представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6

Определение морозостойкости штукатурных растворов марки М50

№ состава	Расход			Прочность на сжатие, МПа, в состоянии		Прочность на сжатие после				
	известки, кг	наполнителя		сухом	водо- насыщенном	50	60	70	75	80
		%	кг							
1	96,6	–	–	5,1	3,6	3,7	3,2	2,7	–	–
2	–	80	77,3	5,7	4,7	4,7	4,3	4,1	3,9	3,5

Таблица 7

Определение морозостойкости штукатурных растворов марки М75

№ состава	Расход			Прочность на сжатие, МПа, в состоянии		Прочность на сжатие после				
	известки, кг	наполнителя		сухом	водо- насыщенном	65	75	85	90	100
		%	кг							
1	89,3	–	–	7,6	4,3	4,3	4,0	3,6	3,2	–
2	–	80	71,4	8,3	5,7	5,8	5,7	5,3	5,0	4,4

Испытания на морозостойкость показали, что изменений прочности кладочных растворов марок М50 и М75 и потери массы не наблюдалось после 50 и 75 циклов соответственно.

В штукатурных составах марки М50 снижение прочности отмечено после 55 циклов попеременного замораживания и оттаивания. В процессе осмотра образцов штукатурных составов через 60 циклов установлено незначительное шелушение на поверхности контрольных и экспериментальных составов. На 60 циклах для цементно-известкового раствора падение прочности составило 11 и 8 % для цементного раствора с наполнителем.

Зафиксировано, что у цементно-известкового раствора прочность снизилась на 25 % через 70 циклов. Прочность состава с наполнителем уменьшилась на 17 % и только после 80 циклов попеременного замораживания и оттаивания образцов снизилась на 26 %.

На образцах штукатурного цементно-известкового раствора марки М 75 поверхностное шелушение появилось после 75 циклов при незначительном снижении прочности на 8 %. Штукатурный цементный раствор с наполнителем не имел повреждений поверхности и только через 80 циклов отмечено появление незначительного шелушения.

Испытания на прочность при 85 циклах попеременного замораживания и оттаивания установили снижение показателя цементно-известкового раствора на 13 %, а цементного состава с наполнителем на 7 %. Через 90 циклов испытаний прочность цементно-известкового раствора уменьшилась на 26 %. Следует отметить, что величина падения прочности экспериментального состава в 2 раза меньше, или равняется 12 %. Вплотную к предельно допустимому показателю прочность цементного состава приблизилась через 100 циклов, снижение составило 23 %.

На уменьшение морозостойкости штукатурных растворов марок М 50 и М 75 на 5 – 10 циклов по сравнению с показателями кладочных растворов влияет изменение расхода компонентов раствора, а также гранулометрия заполнителя – кварцевого песка, что вызывает увеличение расхода воды по сравнению

с кладочными составами. Указанная зависимость подтверждается показателями водопоглощения штукатурных растворов. Водопоглощение по массе штукатурных растворов составляет 7,6 – 8,1 %, что на 15 % превышает показатели кладочных растворов.

Для штукатурного раствора М50 и М75 показатели морозостойкости отличаются на одну марку. Так, цементно-известковый раствор М50 имеет марку по морозостойкости F50, а цементный раствор с наполнителем марку F75. Штукатурный известково-цементный состав М75 соответствует марке по морозостойкости F75, а цементный с наполнителем – марке F100.

**Выводы.** Из результатов гранулометрического анализа следует, что частицы наполнителя и цемента соизмеримы. Введение наполнителя позволяет повысить степень наполнения цементного камня и оптимизировать насыщение цементного камня наполнителем, что позволяет снизить водопотребность и повысить прочность по сравнению с цементно-известковой композицией.

Проведенный комплекс исследований свидетельствует, что для штукатурных цементных растворов смесей оптимальным является введение наполнителя с максимальным размером частиц 80 мкм в количестве 60 – 100 % от расчетной массы извести. Прочность растворов с наполнителем в возрасте 7 суток превышает значения цементно-известковых составов на 14 – 17 %.

Для штукатурных известковых смесей оптимальным является сокращение расхода извести на 40 – 50 % при введении наполнителя в количестве 80 % от заменяемой массы извести. Расслаиваемость и водоудерживающая способность сохраняются на уровне контрольных значений, при этом прочность растворов с наполнителем в возрасте 7 суток превышает значения известкового состава на 60 %, а в 28 суток – на 15 %.

Присутствие наполнителя в штукатурных цементных составах позволяет увеличить жизнеспособность растворов смесей в 1,5 – 2 раза, что делает возможным сокращение количества поставок растворенной смеси на объект и тем самым уменьшить трудоемкость работ и сократить транспортные расходы. Цементные штукатурные растворы с наполнителем имеют более низкое водопоглощение и меньшее падение прочности в водонасыщенном состоянии на 20 – 25 % в сравнении с цементно-известковыми растворами, что способствует повышению морозостойкости до 15 % и обеспечивает соответствие требованиям СТБ 1307.

Поступила 03.12.2013

## TO THE QUESTION OF THE APPLICATION OF FINE-DISPERSED FILLING AGENT IN FINISHING MORTARS

A. BAKATOVICH, J. VISHNIAKOVA, A. KOLTUNOV

*It is offered to apply in the capacity of fine-dispersed filling material to finishing mortars a water treatment raw sludge. Optimum charges of a filling material in the cement compositions, proved by data of laser microanalysis of corpuscles, are defined. Results of research of key properties of plaster mortar mixes and solutions with carbonate filling material are presented. Optimum quantities of a filling material for cement and limy finishing mortars are determined. Additionally obtained results on viability and frost resistance confirm possibility of application of finishing mortars containing carbonate filling material.*

УДК 662.613

## ПРИМЕНЕНИЕ ЗОЛ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В БЕТОНАХ

*канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Анализируется опыт применения зол тепловых электростанций в бетонах. Показано, что влияние зол на физико-механические свойства бетонов определяется химическим составом, содержанием свободного оксида кальция и оксида магния, величиной удельной поверхности. Представлены результаты исследований цементного камня и бетона с добавкой древесной золы. Установлено, что древесная зола обладает высокой водопотребностью; увеличение количества золы приводит к снижению удобоукладываемости бетонной смеси. Установлено, что замена 5 – 10 % цемента золой приводит к снижению прочности бетона на 15 %. Бетоны с добавкой древесной золы имеют более низкую плотность. Введение в бетонную смесь золы в сочетании с добавкой суперпластификатора позволяет при сохранении требуемой подвижности снизить водоцементное отношение и обеспечить прочность бетона на сжатие не ниже контрольного бетона.*

**Введение.** Современные ресурсосберегающие технологии подразумевают широкое использование попутных продуктов промышленности и призваны существенно сократить расход цемента, производство которого отличается высокой энергоемкостью. Особого внимания заслуживают научные разработки, связанные с вопросами утилизации зол-уноса тепловых электростанций в цементах и бетонах.

**Теоретические исследования.** В бетон могут вводиться золы ТЭС, отвечающие требованиям ГОСТ 25818-91 [1]. Согласно стандарту золы по виду сжигаемого угля подразделяют: на антрацитовые, образующиеся при сжигании антрацита, полуантрацита и тощего каменного угля (А); каменноугольные, образующиеся при сжигании каменного, кроме тощего, угля (КУ); бурогоугольные, образующиеся при сжигании бурого угля (Б). Химический состав зол колеблется в зависимости от месторождений углей. Примерное содержание основных оксидов в золах различных ТЭС: 35 – 60 % SiO<sub>2</sub>; 15 – 35 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1 – 20 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1 – 30 % CaO и небольшое количество MgO, SO<sub>3</sub>, щелочей и других соединений. В зависимости от химического состава золы подразделяются на (низкокальциевые) кислые, содержащие до 10 % оксида кальция, и высококальциевые (основные), содержащие оксида кальция более 10 % по массе. Соотношение компонентов золы предопределяет ее активность и вяжущие свойства. Наличие свободных оксидов кальция и магния является основным критерием, определяющим способность золы и шлака проявлять вяжущие свойства.

Минерально-фазовый состав золы включает неорганическую и органическую составляющие. Неорганическая фаза, в свою очередь, состоит из аморфной составляющей, представленной стеклом и аморфизированным глинистым веществом, и кристаллической, включающей слабоизмененные зёрна минералов исходного топлива (кварц, полевые шпаты и другие термически устойчивые минералы) и кристаллические новообразования, возникшие при сжигании топлива (муллит, гематит, алюмосиликат кальция и др.) [2].

Частицы большинства зол имеют сферическую форму и гладкую остеклованную фактуру поверхности. Однородность частиц различна. Более однородны частицы, состоящие полностью из стекла. Максимальное содержание сферических стекловидных частиц имеют мельчайшие фракции золы. Чем зерна золы крупнее, тем выше в ней содержание агрегированных, шероховатых, пористых частиц. Имеются частицы, внутренняя часть которых не расплавилась и состоит из мельчайших минеральных и коксовых зерен. Встречаются и полые шарики в результате вспучивания стекла в момент образования частицы. Размер частиц – от нескольких микрон до 50 – 60 микрон. Могут также образовываться стекловидные частицы неправильной формы. У некоторых частиц поверхность губчатая из-за различного количества пузырьков. Они также могут содержать во внутренней части большое количество кристаллических веществ [3].

Способность стекловидной фазы к гидратации и гидролизу в работе [4] объясняется рыхлой субмикроструктурой и относительно высокой проницаемостью аморфитов, обусловленной пустотами между ионными группировками. Активность промежуточного аморфного вещества стекловидной фазы определяется соотношением глинозема и кремнезема, чем оно больше, тем легче идет процесс гидратации зольного стекла в щелочной и в сульфатно-щелочной среде. В нейтральной среде зольное стекло устойчиво. Отмечается [4], что на гидравлическую активность кальциево-алюмосиликатного стекла, содержащегося в золе, положительно влияют примеси оксидов магния, железа и некоторых других элементов.

Определенной гидравлической активностью в золах, наряду со стекловидной фазой, обладает дегидратированное и аморфизированное глинистое вещество. Активность зависит от минералогического состава глин, входящих в минеральную часть топлива, и повышается при тепловой обработке. С повышением в золе содержания аморфизированного глинистого вещества увеличивается ее водопотребность [4].

Измерения действительной удельной поверхности золы, выполненные в работе [5] по адсорбции азота, показали, что она на порядок выше удельной поверхности цемента. Отмечается, что для золы характерно значительное содержание частиц с мелкими замкнутыми порами, которые являются результатом вспучивания расплавленной минеральной массы газами, выделяющимися при дегидратации глинистых минералов, диссоциации частиц известняка, гипса и органических веществ. Общий объем пор может достигать 60 % объема частиц золы. Высокое содержание микропор в золе и обуславливает высокое значение ее действительной удельной поверхности. С высокой действительной поверхностью золы связаны такие ее свойства, как адсорбционная способность, гигроскопичность, гидравлическая активность.

Удельная поверхность золы составляет 1500 – 3000 см<sup>2</sup>/г. Для плотных бетонов рекомендуются [4] золы с удельной поверхностью не менее 1000 см<sup>2</sup>/г, для ячеистых бетонов – не менее 2500 см<sup>2</sup>/г. У некоторых зол активность может быть повышена при применении дополнительного домола, способствующего разрушению стекловидной оболочки на поверхности зерен.

Средняя плотность золы составляет 1,74 – 2,4 г/см<sup>3</sup>, однако плотность отдельных фракций может значительно отличаться от средних значений. Мелкие частицы топлива при пылеугольном сжигании сторают на лету. При этом на их поверхности образуется плотная оболочка, а внутри они имеют пористую структуру. Пористостью частиц объясняется малая насыпная плотность золы, которая колеблется в пределах 600 – 1300 кг/м<sup>3</sup>. Насыпная плотность зависит от вида топлива и температуры сжигания, обычно увеличиваясь с повышением последней [2].

Высококальциевые золы, обладая некоторыми вяжущими свойствами, применяются вместо цемента или для замещения части цемента. Высококальциевые золы являются гидравлически активными благодаря высокому содержанию стекловидной алюмосиликатной фазы, составляющей 40 – 65 % всей массы и имеющей вид частиц шарообразной формы размером 5 – 100 мкм. Прочность камня на основе золы обычно невысока и составляет в среднем около 10 МПа, но из-за нестабильного состава варьирует от 0 до 30 МПа [2; 4].

Приведенные в работе [6] данные показывают, что в мелкозернистом бетоне с частичной заменой портландцемента ЦЕМ I 42,5 высококальциевой золой в количестве 30 % по истечении 1,5 лет при нормальных условиях твердения было выявлено значительное расширение. Кроме этого, характерные деформации расширения выявлены после 55 циклов переменного увлажнения-высушивания при температуре 100 °С. При этом морозостойкость у бетона с золой составляла F100 против F200 контрольного состава без золы.

В целом можно отметить, что недостатком высококальциевой золы является неравномерное изменение объема и разрушение материалов как за счет поздней гидратации «пережженных» оксидов кальция и магния в уже затвердевшем материале, так и за счет образования дополнительного количества этtringита и при реакции с глиноземистым компонентом цемента.

Наибольшее распространение для устранения деструктивных явлений при твердении высококальциевых зол находят добавки хлористого кальция, соляной кислоты и других хлоридов, которые в свою очередь могут способствовать развитию коррозии бетона. Также предлагается использовать в составе бетонов микрокремнезем, который призван стабилизировать CaO<sub>св</sub>. Отмечается [5], что в этом случае возникает другая проблема – необходимость повышения удобоукладываемости бетонной смеси (снижение которой обусловлено высокой водопотребностью SiO<sub>2</sub>, введением пластификаторов). Это приводит к получению высокопрочных бетонов, стоимость которых существенно выше рядовых. Поэтому основным видом золы, вводимой в бетоны, является низкокальциевая зола ТЭС сухого удаления. Она представляет собой преимущественно силикатное стекло, слагающий его аморфный кремнезем химически активен по отношению к Ca(OH)<sub>2</sub>, выделяющемуся при гидратации цемента. Реакция между ними приводит к образованию высокодисперсных гидросиликатов кальция (типа CaO·SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O) с высокой связующей способностью взамен малопрочного Ca(OH)<sub>2</sub>, а измельчение частиц – к уменьшению размеров пор и снижению проницаемости [7].

Отмечается [4], что пуццолановая реакция начинается поздно (примерно в 7-суточном возрасте) и протекает медленно; основной ее эффект при нормальном твердении бетона проявляется к 3-месячному возрасту, но более интенсивное твердение бетона с золой наблюдается и в более позднем возрасте – до года и более. По данным японских исследователей, прочность при сжатии бетонов, содержащих 190 и 240 кг/м<sup>3</sup> цемента и 30 %-ную добавку золы в 10-летнем возрасте, соответственно в 1,44 и 1,43 раза превышает прочность бетона в возрасте 3 месяца. В итоге прочностной эффект введения золы и экономия цемента, определенные по 28-дневной прочности, оказываются ниже, чем для бетона большего возраста. Тем не менее этот «возрастной» эффект не теряется, а обусловит и дополнительный запас прочности, пониженную проницаемость и, следовательно, повышенную долговечность такого бетона [5].

Замещение части цемента золой приводит к уменьшению усадочных деформаций бетона, которые проявляются при снижении водопотребности бетонной смеси. Уменьшение усадки объясняется тем, что зола адсорбирует из цемента растворимые щелочи и образует устойчивые, нерастворимые алюмосиликаты [7].

Зола, как и другие активные минеральные добавки, способствует повышению сульфатостойкости цементных бетонов. Результаты 10-летних испытаний показали, что бетон, содержащий зольный цемент, более стоек к воздействию морской воды даже по сравнению с бетоном на шлакопортландцементе [5].

Зола также применяется в бетонных смесях в виде микронаполнителя. Она заполняет пустоты между песчинками, увеличивает содержание теста вяжущего и объемную концентрацию твердой фазы в бетонной смеси. Значительный эффект достигается в бетонных смесях с низким расходом цемента, где имеет место явный дефицит дисперсных частиц. Введение золы его ослабляет или ликвидирует, в итоге улучшается зерновой состав цементно-песчаной составляющей, уменьшается расслоение бетонной смеси и повышается однородность бетона. В связи с тенденцией применения в монолитном строительстве все более подвижных смесей с повышенной склонностью к расслоению роль золы особенно возрастает.

При увеличении расхода цемента расслоение бетонной смеси снижается, но повышается тепловыделение твердеющего бетона, что может привести к образованию микротрещин уже на ранних стадиях твердения. Сокращение расхода цемента при введении золы снижает тепловыделение и вероятность образования термических микротрещин, что также улучшает структуру бетона. В массивном бетоне опасность микротрещин существенно возрастает, и положительная роль золы проявляется во всем диапазоне расходов цемента.

Значительный практический опыт применения золы-уноса в бетонах накоплен в гидротехническом строительстве. В настоящее время доказана эффективность замены 25 – 30 % портландцемента золой-уносом для бетонов внутренних зон массивных гидротехнических сооружений и 15 – 20 % для бетона в подводных частях сооружений. В ряде случаев обоснована целесообразность увеличения содержания в гидротехническом бетоне золы-уноса до 50 – 60 % от массы цемента. При замене золой до 40 % цемента при их совместным измельчением прочность бетона через 28 суток близка, а через 60 суток практически равна прочности бетона без добавки [4].

В Беларуси принята Государственная программа строительства энергоисточников на местных видах топлива, а также Программа строительства мини-ТЭЦ. В 2015 году за счет увеличения объемов использования местных видов топлива и возобновляемых источников энергии доля собственных энергоресурсов в балансе котельно-печного топлива составит не менее 28 %, а в 2020 – не менее 32 % [8].

Основу местных видов топлива составляют дрова и топливная щепка, отходы деревообработки и лесозаготовки, а также торф. Использование древесных отходов как альтернативы традиционным видам топлива рассматривается в силу следующих преимуществ: древесные отходы являются CO<sub>2</sub>-нейтральными; относятся к возобновляемым источникам энергии; в их составе практически нет серы; возможность сжигать влажные отходы (до 55 – 60 % влаги); уменьшение эмиссии двуокиси углерода; низкая коррозионная агрессивность дымовых газов; возможность конденсировать влагу дымовых газов и высвободить скрытую теплоту парообразования; низкая по сравнению с ископаемым топливом цена [9].

Расширение практики использования древесных отходов для производства энергии будет приводить к увеличению количества золы, содержание которой колеблется от 0,5 весовых процентов (на сухую массу) для мягких пород древесины, до 4 – 8 весовых процентов для коры [10], которая также характеризуется большим содержанием минеральных примесей (песка, земли, камней).

В настоящее время в республике древесное топливо используется семью мини-ТЭЦ и более тремя тысячами котлов. В установках для сжигания биомассы обычно присутствуют три фракции золы: зольный остаток (подовая зола); зола-уноса из циклонов; зола-уноса из фильтров.

Согласно данным работы [10], при сжигании древесной щепы образуется 60 – 90 % подовой золы, 10 – 30 % циклонной золы-уноса, 2 – 10 % золы-уноса фильтров тонкой очистки.

В таблице 1 показан химический состав золы, получаемой при сжигании отходов древесины.

Таблица 1

Химический состав древесной золы

Фракции древесной золы	Содержание основных оксидов, %				
	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O
Подовая зола	32,6	3,0	6,6	0,9	–
Циклонная зола	32,3	3,2	7,5	1,3	–

Источник: [10].

Согласно приведенной классификации древесная зола относится к высококальциевым золам. Высококальциевой зольной частью с содержанием CaO 15 – 40 % характеризуются также каменные и бурые угли ряда месторождений, многие типы торфа и горючие сланцы. У последних содержание в зольной части CaO составляет 25 – 60 %.

Известны бетонные смеси, содержащие в своем составе такие компоненты, как дисперсные золошлаковые отходы мусоросжигательных заводов, золошлаковые отходы и золы-уноса, в том числе пылевидные фракции, являющиеся отходами тепловых электростанций и котлов, зола от сжигания осадка сточных вод, летучая зола от сжигания твердых городских отходов. В связи с этим актуальным является изучение прочности цементного камня и бетона, содержащих в своем составе добавку древесной золы.

**Экспериментальные исследования.** Для приготовления золоцементной смеси использовали подовую древесную золу сухого удаления и портландцемент ПРУП «Кричевцементошифер» марки ЦЕМ II/A-III 42,5Н. Приготовление составов выполнялось путем сухого перемешивания портландцемента и золы в соотношениях 90:10, 80:20 и 70:30 соответственно и последующим затворением водой. В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор Стахемент 2000 МЖ 30, Водоцементное отношение принято равным 0,3.

Определение гранулометрического состава золы показало, что содержание зерен размером 0,63 – 0,315 мм составляет 26,2 %; 0,315 – 0,14 мм – 71,1 %; менее 0,14 мм – 2,7 %. Водопоглощение золы составила 55 %, насыпная плотность 600 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность 2280 кг/м<sup>3</sup>.

Из полученного золоцементного теста изготавливались кубики с размером ребра 2 см. Образцы хранились в камере нормально-влажностного твердения при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха не менее 90 %. Кубики испытывались в возрасте 28 суток. Определение подвижности золоцементного теста выполнялось по методике НИИЖБ на мини-конусе, путем измерения распыла конуса после 10 ударов встряхивающего столика. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

## Прочность золо-цементного камня

Номер состава	Соотношение компонентов, %		В/Ц	Добавка, % от массы цемента	Распыл мини-конуса на встряхивающем столике после 10 ударов, см	Прочность цементного камня на сжатие	
	цемент	зола				МПа	(%)
1	100	–	0,3	–	9	28,0	100 %
2	95	5	0,3	–	8,5	24,68	88,14
3	95	5	0,3	0,3	16	25,02	89,36
4	90	10	0,3	0,3	15,5	25,52	91,14
5	95	5	0,25	0,3	15,0	30,93	110,46

Делая вывод о влиянии древесной золы, следует отметить следующее:

- замена 5 – 10 % цемента золой приводит к снижению прочности цементного камня на 10 – 12 %;
- увеличение количества золы вызывает снижение удобоукладываемости цементного теста в связи с высокой водопоглощаемостью золы;

- введение в золоцементное тесто суперпластификатора Стахемент 2000МЖ30 в количестве 0,3 % от массы цемента увеличивает распыл мини-конуса с 8,5 до 16 см. Введение суперпластификатора позволяет снизить водоцементное отношение и обеспечить увеличение прочности золоцементного камня, так снижение водоцементного отношения с 0,3 до 0,25 привело к росту прочности по сравнению с составом без золы на 10 %.

Результаты исследования показали, что древесная подовая зола используемой фракции, несмотря на высокое содержание оксида кальция (32,6 %), не обладает гидравлической активностью. Ученые отмечают, что гидратации подвергаются в первую очередь зерна золы размером 5 – 30 мкм. Гранулометрический состав используемой золы представлен более крупными частицами. Для повышения гидратационной активности зола должна быть дополнительно измельчена.

Эффективность замены части цемента золой определялась по прочностным характеристикам мелкозернистого бетона, составы которого представлены в таблице 3. Прочность на изгиб и сжатие определяли путем испытания балочек 40×40×160 мм в возрасте 28 суток, хранившихся в нормально-влажностных условиях.

Таблица 3

## Прочность мелкозернистого бетона с добавкой древесной золы

Номер состава	Расход материалов, кг на 1 м <sup>3</sup>				Добавка, % от массы цемента	В/В	Плотность расч./факт., кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте 28 сут	Прочность при изгибе, МПа, в возрасте 28 сут
	цемент	зола	песок	вода					
1	429	–	1469	257	–	0,60	2155/2151	18,87	4,76
2	407	22	1469	257	0,3	0,60	2155/2145	16,24	4,63
3	407	22	1484	236	0,3	0,55	2149/2138	22,44	4,99

Экспериментальные данные показывают, что введение золы в состав бетона приводит к снижению средней плотности. При равном водовяжущем отношении (составы 1, 2) прочность бетона на сжатие и изгиб при замене древесной золой 5 % цемента снижается. Введение суперпластификатора Стахемент 2000МЖ30 позволяет при сохранении заданной подвижности снизить водовяжущее отношение, что приводит к росту прочности золобетона в возрасте 28 суток на 18 % (составы 1, 3).

**Заключение.** Проведенные исследования показывают, что подовая древесная зола сухого удаления без дополнительного помола по зерновому составу представлена частицами крупнее 0,14 мм. Древесная зола обладает высокой водопотребностью (55 %), поэтому при введении золы в бетонную смесь происходит снижение удобоукладываемости. Бетоны с добавкой древесной золы имеют более низкую плотность по сравнению с беззолным бетоном. Введение в бетонную смесь золы в сочетании с добавкой суперпластификатора позволяет при сохранении требуемой подвижности снизить водоцементное отношение и обеспечить прочность бетона на сжатие не ниже контрольного (беззолного) бетона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Золоуноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия: ГОСТ 25818-91. – Введ. 01.08.2001. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 13 с.
2. Путилин, Е.И. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог: Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС / Е.И. Путилин, В. С. Цветков. – М.: Гос. дор. науч.-исслед. ин-т ФГУП «СОЮЗДОРНИИ», 2003. – 57 с.
3. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н.И. Ватин [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4. – С. 16 – 21.
4. Дворкин, Л.И. Эффективные цементно-золенные бетоны / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, Ю.А. Корнейчук. – Ровно, 1998. – 195 с.
5. Дворкин, Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности: учеб.-справ. пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 360 с.
6. Староверов, В.Д. Золо ТЭС в цементах и бетонах / В.Д. Староверов // Науч.-исслед. работа студентов, аспирантов и молодых ученых СПбГАСУ: сб. науч. тр. студентов, аспирантов и молодых ученых победителей конкурсов 2010 г. – СПб.: СПбГАСУ, 2011. – Вып. 6. – С. 37 – 47.
7. Данилович, И.Ю. Использование топливных шлаков и зол для производства строительных материалов / И.Ю. Данилович, Н.А. Сканава. – М.: Высш. шк., 1988. – 73 с.
8. Стратегия развития энергетического потенциала Республики Беларусь: Утв. Постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 09.08.2010 № 1180 [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – Режим доступа: <http://www.pravo.by>. – Дата доступа: 02.09.2010.
9. Гаев, Ф.Ф. Энергетическое использование древесных отходов / Ф.Ф. Гаев [Электронный ресурс] / Справочно-информационная система Отходы.ру. – Режим доступа: <http://www.waste.ru>. – Дата доступа: 26.07.2003.
10. Вильдбахер, Н. Утилизация золы котельных, работающих на древесном топливе / Норберт Вильдбахер. – Минск: Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации, 2007. – 28 с.

Поступила 19.11.2013

#### APPLICATION OF ASHES FROM THERMAL POWER STATIONS IN CONCRETE

L. PARFENOVA

*The analysis of experience of application of the ashes of thermal power stations in concrete is made. It is shown that influence of ashes on physical and mechanical properties of concrete is defined by a chemical compound, content of free calcium oxide and magnesium oxide, value of a specific surface. Results of research of a cement stone and concrete with the additive of woody ash are presented. It is determined that woody ash possesses a high water demand. The increase in quantity of ash leads to loss of concrete mix workability. It is determined that replacement of 5 – 10 % of cement with ash leads to a 15 % reduction of strength of concrete. Concretes with the additive of woody ash have lower density. Ash input in concrete mix in combination with superplasticizer additive allows to reduce a water-cement ratio and at the same time saves the required fluidity and provides compression strength of concrete not below control concrete sample.*

УДК 691.328.1

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ И МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА**

**Д.С. ЗЕЛЕНКЕВИЧ, А.Н. ЯГУБКИН,  
канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Представлен обзор наиболее перспективных добавок в бетонную смесь, обеспечивающих повышенную водонепроницаемость и морозостойкость бетона. Рассмотрены их основные характеристики, преимущества и недостатки. Показаны подходы к выбору с обоснованием целесообразности применения добавок для обеспечения водонепроницаемости и морозостойкости бетонов. Разработанные в Полоцком государственном университете составы бетонов с учетом использования их для изготовления конструкций, эксплуатирующихся в условиях ОАО «Нафтан», обладают высокими показателями водонепроницаемости и морозостойкости.*

**Введение.** Бетоны и растворы, в которых используется цементное вяжущее, так же как и другие каменные материалы, разрушаются под воздействием влаги, отрицательной температуры, когда в результате увеличения объема воды при ее переходе из жидкого в твердое состояние развиваются значительные усилия. Следовательно, сопротивляемость материалов воздействию этих усилий зависит от их плотности, прочности, а также наличия в них незаполненных или не полностью заполненных пор, в которых может размещаться вода или лед, не создавая давления на стенки пор, или действуя на них с меньшим усилием.

Бетон высокой водонепроницаемости и морозостойкости должен отвечать следующим требованиям, определяющим его экономическую эффективность: снижение трудоемкости работ по его приготовлению; снижение расхода материалов; обеспечение высокого качества работ; сокращение сроков и стоимости строительства в целом [1].

**Исследовательская часть.** Эффективным технологическим приемом повышения водонепроницаемости и морозостойкости бетона является использование специальных добавок в бетонную смесь [2 – 5]. Действие добавок, повышающих водонепроницаемость бетона, сводится в основном к коагуляции в бетоне капилляров и других неплотностей сечением более 1 мкм, через которые мигрирует влага. Это приводит к улучшению структуры, повышению плотности цементного камня и приданию бетону и раствору водоотталкивающих (гидрофобных) свойств [6]. По эффективности действия добавки разделены на три группы в порядке уменьшения достижения эффекта.

К **первой группе** относятся добавки, повышающие водонепроницаемость бетона в 5 и более раз. Среди наиболее перспективных можно выделить следующие:

- фенилэтоксисилоксан 113-63 (ФЭС-50). Прозрачная подвижная жидкость, нерастворимая в воде, образует эмульсию. Введение добавки способствует длительному сохранению подвижности бетонной смеси, но приводит к снижению прочности бетона. Не рекомендуется тепловлажностная обработка бетона [7];

- алюмометилсиликонат натрия АМСР-3. Продукт взаимодействия металлического алюминия с метилсиликонатом натрия. Бесцветная или желтоватая жидкость, смешивающаяся с водой в любых соотношениях [7];

- пластиИЛ. Гидрофобизатор для растворов и бетонов на портланд- и шлакопортландцементе. Добавка не содержит хлоридов, вызывающих коррозию арматуры; повышает жизнеспособность и нераслаиваемость смесей; обладает пластифицирующим действием. Рекомендуемая дозировка – 1,5 % массы цемента [7];

- гидробетон. Рекомендуемая дозировка составляет 2,0 – 3,0 % массы цемента [7];

- аддимент ДМ 2 (ФРГ). Добавка не содержит хлоридов, вызывающих коррозию арматуры. Рекомендуемая дозировка – 0,2 – 0,8 % массы цемента [7];

- олеат натрия (ЗАО «Еврохим»). Рекомендуемая дозировка – 0,05 – 0,6 % массы цемента [7];

- зикагард-702 В-Аквафоб (Швейцария) [7].

К добавкам **второй группы**, повышающим водонепроницаемость бетона в 2 – 4,9 раза, относятся:

- полигидросилоксаны 136-41 (ГКЖ-94) и 136-157М (ГКЖ-94М). Не допускается электропрогрев смеси [7];

- комплексная органоминеральная добавка КОМД-С. Добавка растворима в воде, обладает усиленным пластифицирующим действием (на 35 – 45 %) [7];

- церезит Ц – водная суспензия из нерастворимых смесей олеиновой кислоты и извести в насыщенном известковом растворе (20 % извести; 7,8 % олеиновой кислоты; 0,5 % нашатырного спирта; 0,2 % охры сухой; 5 % сернокислого алюминия и 66,5 % воды) [8];

- битумная эмульсия БЭ «Эмульбит», состоящая из битума марки БН-III (56 – 57 %; СДБ (3 – 4 %) и воды (40 %) [6]. Рекомендуемая дозировка – 5 – 10 %. После введения битумных эмульсий в бетонную смесь при её затворении повышается не только водонепроницаемость, но и морозоустойчивость, щелочестойкость, улучшаются и другие свойства бетона. Также обладает пластифицирующим эффектом [1];

- нитрат кальция. Продукт хорошо растворим в воде. Дозировка не должна превышать 3 % [7]. Добавка приводит к интенсификации процессов гидратации цементных минералов и увеличению объема гелеобразных масс, которые закупоривают капиллярные и седиментационные поры и каналы [9]. Взаимодействие одних и тех же ионов добавки и продуктов гидратации цемента позволяет получить равномерную структуру цементного камня, а благодаря особенности воздействия на гидратацию двукальцивого силиката и реакции превращения эпоксида с аммонием в амин значительно увеличивается динамика набора прочности бетонов в течение долгих лет [10]. Основным недостатком нитрата кальция и других водорастворимых добавок-уплотнителей заключается в том, что при термовлажностной обработке бетона добавки не повышают его водонепроницаемость [11];

- сульфат алюминия. Бесцветные кристаллы хорошо растворимы в воде. Дозировка не должна превышать 3 % [7];

- полиаминная смола С-89. Рекомендуемая дозировка – 0,6 – 1,5 % [7];

- нитрат железа. Продукт хорошо растворим в воде. Дозировка не должна превышать 3 % [7];

- хлорид железа. Продукт состава  $FeCl_2 \cdot 6H_2O$  хорошо растворим в воде и сильно гигроскопичен.

Количество добавки не должно быть менее 3 % для бетона неармированных конструкций, и менее 2 % – для бетона армированных конструкций [7];

- диэтиленгликолевая смола ДЭГ-1. Рекомендуемая дозировка – 1,0 – 1,5 % [7];

- триэтиленгликолевая смола ТЭГ-1. Рекомендуемая дозировка – 1,0 – 1,5 % [7];

- сульфат железа. Дозировка добавки не должна превышать 3 % [7];

- хлоралюмокальций. Смесь, состоящая из 15 % безводного хлористого кальция, 5 % безводного хлористого алюминия и 30 % воды по массе [6];

- азотнокислое железо (нитрат железа) – готовый товарный продукт, соответствующий ГОСТ 4111-74 [6];

- пластифицирующие вещества сами по себе и в сочетании с абиеатом натрия и хлористым кальцием в виде комплексной добавки [6];

- абиеат натрия – сухой водорастворимый порошок красно-кирпичного цвета, получаемый из нейтрализованной (омыленной едким натром) абиеитовой смолы (винсола), соответствующий ВТУ 407-62 [6];

- силикаты натрия и калия, сульфат аммония, олеат натрия и другие при содержании в бетонной смеси в количестве 0,5 – 1 % от массы цемента обеспечивают наилучшую водонепроницаемость бетона и повышение его прочности до 20 % [12];

К «набухающим» добавкам относятся бентонитовая глина, бентонитовый цемент. Однако эти добавки достаточно дефицитные и дорогие, что делает их использование в современном строительстве практически невозможным. Из примеров их применения можно отметить строительство метрополитенов [10].

- стеарат цинка (ЗАО «Еврохим»). Дозировка – 0,1 – 1,0 % массы цемента [7];

- стеарат кальция (ЗАО «Еврохим»). Дозировка – 0,2 – 1,0 % массы цемента [7];

- гидрофоб Е (Словения). Обладает пластифицирующим действием [7];

- сементол Е (Словения). Обладает пластифицирующим действием [7];

- зикалайт (Швейцария). Дозировка – 2 % массы цемента [7];

- зикагард-700С (Швейцария) [7].

К добавкам *третьей группы*, повышающим водонепроницаемость бетона в 1,4 – 1,9 раза, относятся:

- сернокислые соли пеназолинов ССП [7].

- этилсиликонат натрия ГКЖ-10 и метилсиликонат натрия УКЖ-11 [7].

- уплотняющие добавки, которые размещаются в поровом пространстве и набухают в условиях насыщенного раствора гидроксида кальция и при этом кольматируют капилляры и неплотности: трепел и диатомит, кремнеземистая опоковидная порода, глина [6];

- тонкомолотые и тонкодисперсные минеральные добавки из сырьевых материалов: гранулированные доменные шлаки, золы и шлаки тепловых электростанций. Рассмотренные минеральные вещества являются отходами и поэтому экономически эффективны, однако водонепроницаемость бетона они повышают незначительно [8];

- гидрофобизирующие добавки оказывают непосредственное пластифицирующее действие на частицы цемента, образуя на поверхности зерен водные пленки. При этом гидратация цемента и нарастание механической прочности в начальные сроки твердения несколько замедляются. Впоследствии они не препятствуют нарастанию прочности [11].

Эффективным способом повышения морозостойкости бетонов является введение в их состав добавок *поверхностно-активных веществ*. Благоприятное влияние пластифицирующих добавок типа СДБ на морозостойкость бетона заключается в том, что в их присутствии формируется наиболее оптимальная структура бетона, но не микропористая, а плотная за счет замедления процесса схватывания цементного теста и более полной седиментации.

Введение в бетонные смеси пластифицирующе-воздухововлекающих, воздухововлекающих и газообразующих добавок обеспечивает возникновение микропор шаровидной формы, что повышает морозостойкость бетонов. Наиболее эффективным является сочетание добавок, таких как [8]:

- пластифицирующие, пластифицирующе-воздухововлекающие и воздухововлекающие добавки; газообразующие добавки-полигидросилоксаны Ж 136-41, Ж 146-57М и этилгидридесквioxсан ПГЭН; смолы ДЭГ-1, ТЭГ-1 и С-89; алкил (арил гидрид) силесквioxсаны ААС; водная (5 – 15 %-ная) эмульсия полиуретана (ВЭП) вводится в бетонную смесь в количестве 1,5 – 18 % массы цемента [6].

Для повышения морозостойкости бетона в состав смеси, помимо указанных, можно вводить противоморозные добавки. При этом значительно повышается прочность при сжатии и стойкость бетонов к одновременному действию хлористых солей и низких температур:

- карбамид, или мочеви́на (М). Добавка хорошо растворима в воде [7];
- соединение нитрата кальция с мочевиной (НКМ). Такие добавки обеспечивают наибольшее повышение морозостойкости бетонов, твердеющих на морозе. В присутствии этих добавок формируется стабильная морозостойкая структура порового пространства бетона с преобладанием микропор и пор геля, уменьшается количество льда при замораживании, повышается предельная растяжимость, динамически модель упругости и прочность бетона [6];
- нитрат натрия (НН) [7];
- ускоряющая противоморозная добавка (УПДМ). Сбалансированная по компонентному составу жидкая смесь из отходов производства ацетоуксусного эфира, ацетилацетона и нитрохлораكتинида, взятых в соотношении 7:3:1 по объему [7];
- формиат натрия спиртовой (ФНС). Отход нефтехимического производства, представляющий 30 – 40 %-ный водный раствор натриевых солей муравьиной и серной кислот [7];
- асол-К. Продукт из органических и неорганических компонентов: водного раствора поташа, ингибиторов коррозии и модификаторов [7];
- гидробетон-С-3М-15. Добавка также обладает пластифицирующим действием [7];
- гидрозим. Не вызывает коррозии арматуры [7];
- лигнопан-4. Добавка также обладает пластифицирующим действием [7];
- победит-Антимороз [7];
- аммиачная вода. Продукт ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), представляющий собой аммиачный газ  $\text{NH}_3$ , растворенный в воде [7];
- Бетонсан (ЗАО «Компания Конвент ЦЕНТР») [7];
- Сементол Б (Словения) [7].

Морозостойкость бетона также повышается при совместном введении в его состав суперпластификатора МФ-АР [14] и воздухововлекающих добавок типа СНВ (смола нейтрализованная воздухововлекающая) или СДО (смола древесная омыленная) в количестве 0,005 – 0,035 % массы расходоуемого цемента.

Каждая из перечисленных добавок в бетон отличается своими свойствами и находит применение в современном строительстве. Но если речь идет о достижении одновременно двух результатов, таких как *водонепроницаемость* и *морозостойкость*, то здесь следует обратить внимание на добавки Дегидрол люкс марки 10-2 и Бетоноправ люкс марки 2. Дегидрол люкс, являясь добавкой для получения водонепроницаемого бетона, также обладает дополнительно эффектом морозостойкости; Бетоноправ люкс, являясь добавкой для получения морозостойкого бетона, обладает дополнительно водонепроницаемым эффектом [15].

Главная трудность при введении добавок в бетонную смесь – точность их дозировки. При недостаточном количестве вводимой добавки бетон приобретает специфические свойства лишь частично, а при избыточном количестве увеличивается пористость цементного камня и снижается его прочность вследствие усиленного вовлечения воздуха в бетонную смесь [13].

Работы по производству водонепроницаемого и морозостойкого бетона обходятся во много раз дешевле, чем устройство сложной, трудоемкой и дорогостоящей гидроизоляции и обмазки. Эта техноло-

гия существенно влияет на улучшение качества сооружений, удлиняет срок их службы, влияет положительно и на другие свойства бетона, что отражает актуальность рассматриваемой проблемы.

В Полоцком государственном университете по заявкам как государственных предприятий, так и частных фирм ведутся исследования по разработке бетонов повышенной водонепроницаемости и морозостойкости, а также эффективных добавок-модификаторов. Разработаны составы бетонов с учетом использования их для изготовления конструкций, эксплуатируемых в условиях ОАО «Нафтан», обладающие высокими показателями водонепроницаемости и морозостойкости. Дальнейшее совершенствование этой технологии благоприятно скажется на улучшении одного из основных показателей строительства – повышении качества и долговечности сооружений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Давидсон, М.Г. Водонепроницаемый бетон / М.Г. Давидсон. – Л.: Лениздат, 1965. – 654 с.
2. Бабаев, Ж.Т. Энергосберегающая технология железобетонных конструкций из высокопрочного бетона с химическими добавками / Ж.Т. Бабаев, А.А. Комар. – М.: Стройиздат, 1987. – 240 с.
3. Рамачандран, В. Наука о бетоне / В. Рамачандран, Р. Фельдман. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
4. Батяновский, Э.И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э.И. Батяновский, Е.А. Иванова, Р.Ф. Осос // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3. – С. 7 – 17.
5. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
6. Афанасьев, Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы / Н.Ф. Афанасьев. – М.: Стройиздат, 1989. – 125 с.
7. Касторных, Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы / Л.И. Касторных. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 219 с.
8. Руководство по применению химических добавок в бетоне. – М.: Стройиздат, 1980. – 55 с.
9. Чумаков, Ю.М. Влияние суперпластификаторов на свойства бетона // Бетон и железобетон / Ю.М. Чумаков, Б.Д. Тринкер. – 1980. – № 10. – С. 16.
10. Добавки в бетоны и растворы строительные // Группа компаний «Твибо» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tvibo.ru/nitcal>. – Дата доступа: 14.09.2012.
11. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона: моногр. / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – М.: Казанский гос. архитектурно-строительный ун-т: Изд-во «Палеотип», 2006. – 244 с.
12. Вавржин Ф. Химические добавки в строительстве / Ф. Вавржин, Р. Кпчма. – М.: Стройиздат, 1964. – 219 с.
13. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986. – 528 с.
14. Рекомендации по применению бетонов с комплексными добавками. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1982. – 12 с.
15. Материалы для ремонта, защиты и гидроизоляции бетона, камня, кирпича // НПК Виком [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dehidrol.ru/schemes/nachinayushim/delaem-beton/vodonepronicaemuj-beton.html>. – Дата доступа: 12.11.2012.

Поступила 03.12.2013

#### USE OF POLYMER AND MINERAL SUPPLEMENTS FOR INCREASE OF WATERPROOF AND FROST RESISTANCE PROPERTIES OF CONCRETE

**D. ZELENKEVICH, A. YAGUBKIN, V. BOZYLEV**

*The article provides an overview of the most promising additives in the concrete mix, ensuring increased waterproof and frost resistance properties of concrete. The main characteristics, advantages and disadvantages of the additives are considered. Approaches to the choice of substantiating the appropriateness of additives to waterproof and frost resistance properties of concrete are shown. The concrete compositions, which take into account their use for the manufacture of constructions for OJSC "Naftan", developed in Polotsk State University "Naftan" possess waterproof and frost characteristics of high performance.*

УДК 691.327.333:666.9.015.7

**К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ ПЕНОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

*канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ, А.А. ДРАГЕЛЬ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрены преимущества и недостатки неавтоклавного ячеистого бетона по сравнению с автоклавным. Проанализированы существующие методы производства стеновых блоков из пенобетона неавтоклавного твердения. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого из них. Отмечено что литьевая технология требует соблюдения определенного режима при твердении пенобетона и ухода за ним. Кроме того, изделия, полученные по литьевой технологии, имеют более высокую степень трещинообразования и усадку, а также более низкую прочность. Изучены основные способы повышения прочности неавтоклавного пенобетона от момента изготовления смеси до твердения пенобетона и ухода за ним. Наиболее распространенным способом повышения прочностных показателей пенобетона является использование добавок, повышающих прочность, и добавок, обеспечивающих дисперсное армирование. Приведены основные добавки-ускорители твердения и пластификаторы. Рассмотрены характеристики наиболее распространенных дисперсно-армирующих добавок.*

**Введение.** В настоящее время в Республике Беларусь основным стеновым материалом является ячеистый бетон автоклавного твердения, который обеспечивает более высокие физико-механические свойства по сравнению с технологией получения пенобетона. При этом необходимо отметить, что для получения качественных изделий из ячеистых бетонов автоклавного твердения необходимо использовать сложное оборудование и следовать высоким требованиям как к сырью, так и к технологии на каждом этапе производства газосиликатных блоков – от подбора составов смеси до автоклавной обработки. Технология производства изделий из пенобетона не требует громоздкого оборудования и позволяет получать монолитный пенобетон даже в условиях строительной площадки. К преимуществам пенобетона следует также отнести высокие экономические показатели – себестоимость пенобетона на 30 – 40 % ниже автоклавного газобетона.

Недостатком пенобетона является низкая прочность. Так, к конструкционно-теплоизоляционному неавтоклавному бетону согласно [1] относятся бетоны с маркой по средней плотности D600 и выше. При данной плотности невозможно получить требуемое сопротивление теплопроводности при оптимальной толщине стены без применения более эффективного утеплителя.

Способы решения данной задачи различны, начиная от технологии изготовления пенобетона и заканчивая введением различных добавок, в том числе и дисперсно-армирующих.

**Основная часть.** Качество пенобетона в большей мере зависит не только от вида и расхода исходных компонентов, но и от способа его получения. В настоящее время существует большой выбор решений в технологии производства пенобетона, в том числе:

- традиционная технология, основанная на перемешивании исходного раствора с пеной заданной кратности;
- баротехнология, связанная с приготовлением пеномассы под давлением;
- технология, предусматривающая воздухововлечение при турбулентно-кавитационном способе перемешивания компонентов;
- технология, основанная на способе сухой минерализации пены.

Совмещение технологических операций перемешивания, транспортирования и формирования пор существенно влияет на свойства конечного продукта и позволяет получать заданную плотность и теплопроводность пенобетона. Прогрессивная технология и современное оборудование позволяют производить пенобетон плотностью от 400 до 1200 кг/м<sup>3</sup>, твердеющий при атмосферном давлении. В процессе формовки для ускорения твердения пенобетонов иногда применяют пропарку при атмосферном давлении, электропрогрев, быстротвердеющие цементы или химические добавки-ускорители.

Пену готовят из водных растворов специальных пенообразователей с добавками ПАВ в лопастных пенновзбивателях или центробежных насосах. Применяют клееканифольный, смолосапоиновый, алюмосульфонафтенный и синтетические пенообразователи. Стабилизаторами пены служат добавки раствора животного клея, жидкого стекла или сернокислого железа; минерализаторами же являются цемент и известь.

В результате выполнения основных технологических операций приготовления пенобетона, вышеописанных в общем виде, в бетонной смеси происходят качественные изменения – его молекулярная структура приобретает свойства системы сферических ячеек диаметром от 0,1 до 2 мм в неограниченной

матрице (например, в цементно-песчаной). Окончательно структура готового изделия создается после его формования и твердения [2].

Пористая структура полностью формируется в очень короткий промежуток времени в условиях механического перемешивания под избыточным давлением. Поэтому температура окружающей среды, точность дозировки компонентов, в том числе строгое выдерживание водотвердого отношения, постоянство свойств вяжущего и кремнеземистых заполнителей не оказывают в этом случае такого большого влияния на свойства материала, как для газобетонов. Основным показателем ячеистого бетона – средняя плотность – легко корректируется непосредственно в ходе технологического процесса. Это очень важно при изготовлении таких бетонов на малых предприятиях или строительных площадках [3].

Различают следующие виды обычных пенобетонов:

- теплоизоляционные (D200-D500);
- конструктивно-теплоизоляционные (D600-D800);
- конструкционные (D900-D1200) [1].

Для получения блоков из пенобетона в мировой практике применяют три способа:

1) *заливка пенобетона в кассетные металлические формы*, представленные на рисунке 1, а. Залитый пенобетон застывает в течение 10 часов, после этого форма разбирается, и из нее извлекаются готовые блоки. Одну форму можно использовать 2 раза за сутки. Соответственно, если производить 20 м<sup>3</sup> пенобетона в день, то нужно 10 форм и 2-х сменная работа. При объемах производства до 40 м<sup>3</sup> блоков в день технология разливки по формам экономически более целесообразна. Плюсы – сравнительно небольшие вложения и простота производства. Минусы – трудно производить большие объемы, привязанность к типоразмерам;

2) *резка пенобетонных массивов на резательных установках* (рис. 2). Сначала пенобетон заливается в формы без перегородок, где получается большой массив объемом 2 – 3 м<sup>3</sup>. Примерно через 14 часов пенобетон подается на резку, где из него автоматически выпиливаются блоки нужного размера.

Данный метод отличается высокой производительностью и высокой технологичностью. Причем при резке пенобетона можно получать блоки любых типоразмеров. Минусы – высокая стоимость и отходы в виде крошки от пиления составляют 0,5 %;

3) *разливка пенобетона в специальные формы и их последующая автоматическая распалубка* (рис. 1, б). Сначала пенобетон заливается в специальные формы с перегородками, где при застывании получаются готовые блоки. Примерно через 14 часов формы подаются в установку автоматической распалубки, где блоки выдавливаются на европоддон, а формы при этом автоматически смазываются.

Данный метод прост и производителен. Большой недостаток – привязанность к одному типоразмеру выпускаемых блоков; установку автоматической распалубки невозможно перенастроить на производство блоков других типоразмеров [4].



Рис. 1. Оснастка для производства блоков из пенобетона в формах:

- а – кассетная металлическая форма для пенобетона;  
б – специальные формы с последующей автоматической распалубкой

При заливке массивов пенобетона прочность несколько снижается, за счет повышенного трещинообразования. Трещинообразование вызвано тем, что испарение воды с поверхности массива и из глубины происходит неравномерно, вследствие чего возникают усадочные деформации. Таким образом, литому пористому бетону, как и любому другому, связанному цементом, необходимо создать температурно-влажностный режим. Это служит, с одной стороны, для поддержания процесса гидратации цемента,

набора прочности, с другой стороны, препятствует образованию трещин в бетоне. С этой целью рекомендуется сразу же после укладки смеси накрывать бетонную поверхность полиэтиленовой пленкой.



Рис. 2. Установка для резки пенобетонных массивов

Для повышения прочности пенобетона также используют различные добавки-пластификаторы и ускорители твердения. Рассмотрим *характеристики* наиболее распространенных из них:

- *суперпластификатор С-3*, в основном, состоит из нитриевых солей продукта конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида;

- производится в жидкой и сухой форме, в виде водорастворимого порошка светло-коричневого цвета или водного раствора темно-коричневого цвета, имеющего концентрацию не менее 32 %. При хранении не выделяет вредных газов или паров;

- в сухом виде не изменяет своих свойств в интервале температур от +85 °С до –40 ° с последующим полным оттаиванием. Водный раствор суперпластификатора С-3 сохраняет свои свойства при нагревании до 40 – 45 °С. При нагревании раствора выше указанной температуры компоненты добавки подвергаются частичной деструкции, что снижает пластифицирующий эффект. По этой же причине не рекомендуется предварительный разогрев бетонных смесей с химической добавкой С-3;

- легко смешивается с другими добавками (гидрофобизаторами, ускоряющими, замедляющими, воздухововлекающими), не вступая в химическую реакцию с ними и сохраняя свои свойства;

- в процессе эксплуатации железобетонных изделий не оказывает вредного влияния на организм человека. Добавка разрешена для применения в конструкциях, контактирующих с питьевой водой.

Применение суперпластификатора С-3 позволяет:

- увеличить подвижность бетонной смеси от П1 до П5;
- снизить водопотребность при затворении вяжущего вещества на 20 – 28 %;
- увеличить конечные прочностные характеристики до 50 %;
- регулировать сроки схватывания, изменяя количество вводимой добавки С-3;
- в 1,5 – 1,6 раз увеличить сцепление бетона с закладной арматурой и металлоизделиями с одновременным ингибированием поверхности металла;
- получить «литые» бетоны с повышенной влагонепроницаемостью, трещиностойкостью, морозостойкостью (350 циклов);
- снизить расход цемента (на 20 %).

Суперпластификатор С-3 выступает как замедлитель срока схватывания. При этом дальнейший набор прочности в бетоне происходит быстрее.

Применение С-3 позволяет снизить энергетические затраты (при вибрации, тепловлажностной обработке бетона) на 30 – 50 %, а в ряде случаев и полностью отказаться от дополнительных энергозатрат.

Дозировки: суперпластификатор С-3 добавляется в бетонные растворы в количестве 0,3 – 0,7 % сухого вещества по отношению к массе цемента.

*Ускорители твердения* могут быть порошковые и жидкие, к примеру, *Простон-Д18* – порошковый ускоритель твердения для работы с бетонами при пониженных и повышенных температурах, его *характеристики*:

- безвреден для человека;
- не горюч, не токсичен, не взрывоопасен;

- Простон-Д18 представляет собой порошок серого цвета. Рекомендуется для использования при температурах ниже +10 °С и выше +25 °С; добавляется в раствор на стадии замеса; позволяет сократить цикл бетонных работ (при заливке в формы или опалубку) в 1,5 – 2 раза.

*Применение:*

- при производстве пенобетона для ускоренного схватывания и более полной реакции за короткий срок, что позволяет значительно уменьшить усадку;

- при производстве любых бетонов (пенобетонов) при низких (менее +10 °С) температурах. Особенно незаменим, когда после дневной заливки бетона (пенобетона) температура в ночное время может опускаться ниже нуля. Позволяет выдерживать временное понижение температуры до –10 °С без потери качества бетона (пенобетона);

- при производстве любых бетонов (пенобетонов) при высоких (более +25 °С) температурах. Позволяет прореагировать цементу до испарения воды из раствора, что понижает вероятность растрескивания;

- улучшает обрабатываемость бетона и снижает водоотделение;

- обеспечивает более высокую скорость твердения, возможность работать при более низких температурах (до –3 °С).

Нормы расхода (в процентах от массы цемента в растворе) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Нормы расхода Простон-Д18

Тип бетона	Диапазон температур, °С			
	от +10 до +5	от +5 до 0	от +2 до –3	от +25 до +35
Ячеистые бетоны	0,4	0,8	1	0,5
Легкие бетоны	0,5	1	1,2	0,5
Тяжелый бетон	1	1,5	2	0,5

*Асилин-12* – жидкий ускоритель твердения для работы с бетонами при пониженных и повышенных температурах.

*Характеристики:*

- Асилин-12 представляет собой пастообразную жидкость темного цвета;

- безвреден для человека;

- не горюч, не токсичен, не взрывоопасен;

- за счет того, что ускоритель находится в жидком состоянии, реакция с бетоном проходит более полно, чем в случае с порошкообразными растворителями, и это улучшает результат примерно на 30 %;

- рекомендуется для использования при температурах ниже +10 °С и выше +25 °С;

- добавляется в раствор на стадии замеса;

- позволяет сократить цикл бетонных работ (при заливке в формы или опалубку) в 1,5 – 2 раза.

*Применение:*

- при производстве пенобетона для ускоренного схватывания и более полной реакции за короткий срок, что позволяет значительно уменьшить усадку;

- при производстве любых бетонов (пенобетонов) при низких (менее +10 °С) температурах. Особенно незаменим, когда после дневной заливки бетона (пенобетона) температура в ночное время может опускаться ниже нуля. Позволяет выдерживать временное понижение температуры до –10 °С без потери качества бетона (пенобетона)

- при производстве любых бетонов (пенобетонов) при высоких (более + 25 °С) температурах. Позволяет прореагировать цементу до испарения воды из раствора, что понижает вероятность растрескивания;

- улучшает обрабатываемость бетона и снижает водоотделение;

- обеспечивает более высокую скорость твердения, возможность работать при более низких температурах (до –3 °С) [5].

Нормы расхода (в процентах от массы цемента в растворе) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Нормы расхода Асилин-12

Тип бетона	Диапазон температур			
	от +10 до +5	от +10 до +5	от +10 до +5	от +10 до +5
Ячеистые бетоны	0,4	0,4	0,4	0,4
Легкие бетоны	0,5	0,5	0,5	0,5
Тяжелый бетон	1	1	1	1

Таким образом, использование добавок-пластификаторов позволяет снизить количество воды затворения, а следовательно и усадочные деформации в пенобетоне. Ускорители твердения также позволяют цементному камню набрать требуемую прочность до потери устойчивости пены.

Наиболее эффективным решением проблемы низкой прочности пенобетона является использование дисперсно-армирующих добавок. Как показывает патентный анализ [6] – номенклатура искусственных волокон весьма обширна – от чрезвычайно дефицитных (из карбида или нитрида кремния, бора, углерода, сапфира, вольфрама) до сравнительно доступных для применения в массовом строительстве (стальных, стеклянных, базальтовых, полимерных). В качестве армирующих элементов для бетонов могут использоваться и природные волокна: древесные (целлюлозные), сизалевые, бамбуковые, тростниковые, джутовые и др. Однако в конструкционном отношении они уступают искусственным волокнам.

Рассмотрены волокна, получившие наибольшее распространение в качестве армирующих материалов для пенобетонов.

**Фибра базальтовая.** Представляет собой базальтовые волокна, добавляемые в бетон, пенобетон, полистиролбетон, раствор, штукатурный состав и т.д. Повышает сопротивление механическим воздействиям, в отличие от металлической сетки, армирует раствор по всем направлениям, обладает высокой адгезией к раствору и образует однородную массу. Фибра базальтовая является эффективной армирующей добавкой для пенобетона, полистиролбетона и просто бетона. Используется во всех типах цементных растворов, когда необходимо предотвратить образование деформационных трещин, возникающих вследствие механического воздействия или усадки (например, при заливке полов, стяжке или при заливке в опалубку). Применение фибры базальтовой позволяет избежать трудоемких операций по армированию [7].

*Свойства базальтовой фибры:*

- предотвращает появление усадочных трещин;
- повышает устойчивость к истиранию;
- исключает появление пластических деформаций, трещин, отслаивание поверхности;
- увеличивает морозостойкость;
- высокая прочность и долговечность;
- высокая термостойкость, абсолютная негорючесть;
- стойкость к агрессивным средам;
- экологическая чистота.

Необходимо отметить, что полипропиленовая и стеклянная фибры по своим характеристикам существенно уступают базальтовой. К их основным недостаткам относятся:

- деформируемость даже при небольших нагрузках растяжения;
- быстрое старение, т.е. утрата свойств с течением времени;
- подверженность горению при воздействии открытого пламени;
- различное относительное удлинение полимерной, стеклянной, металлической фибры и цементного камня;
- высокая стоимость.

Все перечисленные недостатки полностью отсутствуют у базальтовой фибры.

Небольшая добавка данного волокна значительно увеличивает сопротивление цементного камня изгибающим нагрузкам. При этом повышается долговечность материала, снижается усадочная деформация, значительно возрастает трещиностойкость, ударная вязкость. Все это раскрывает перед дисперсно-армированными материалами новые области применения, а также позволяет значительно уменьшить общий вес строительных конструкций за счет уменьшения сечения при неизменных прочностных показателях.

При производстве пенобетона, полистиролбетона, стеновых камней и др. при заданной прочности изделия возможно существенное снижение расхода вяжущих (цемента, гипса и др.) с одновременным снижением плотности изделия.

*Применение фибры базальтовой в пенобетоне, полистиролбетоне позволяет:*

- увеличить ударную прочность углов и граней, что позволяет повысить транспортабельность и обеспечить целостность блоков при монтаже;
- возможность получения изделий с высокой геометрической точностью, что позволяет производить монтаж на клею, сокращая поперечное сечение «мостиков холода», и экономить кладочно-монтажные смеси;
- введение волокна способствует сокращению времени первичного твердения. Достижимая структурная прочность позволяет ранее извлечение из кассетных форм;
- в момент распалубки форм ребра не скалываются, не происходит разрушение блока, т.е. качество изделия повышается и исключается появление брака;

Фибра базальтовая обеспечивает снижение образования пластических (усадочных) трещин на трех стадиях:

1) фибра базальтовая повышает способность бетона к пластической деформации без разрушения в критический период (2 – 6 часов после укладки). Тем самым уменьшается размер и количество микро-трещин, что способствует большей прочности бетона. В этом отношении фибра базальтовая благодаря большой общей площади поверхности более эффективна для контроля дегидратации бетона, чем стальная сетка;

2) на более позднем этапе, когда бетон затвердел и начинает давать усадку, фибра базальтовая соединяет края трещин и таким образом снижает риск разлома;

3) фибра базальтовая обеспечивает равномерную дегидратацию, тем самым снижает внутренние напряжения бетона. Впоследствии благодаря лучшему контролю за выступанием воды на поверхности снижается образование трещин при пластическом оседании.

**Фибра полипропиленовая** (фиброволокно) – это специальные волокна для повышения прочности и трещиностойкости бетона, раствора, штукатурных составов, пенобетона, газобетона. Фибра проста в использовании, она заранее фасуется в пакеты в количестве, необходимом для добавки в 1 м<sup>3</sup> готовой смеси (обычно по 600 г). При готовности смеси (бетона, раствора, штукатурки, пенобетона) в неё высыпается нужное количество пакетов и около 1 – 2 минут перемешивается. После этого смесь используется обычным образом.

*Характеристики фибры полипропиленовой:*

- фибра представляет собой полипропиленовые волокна, добавляемые в бетон, пенобетон, раствор, штукатурный состав и т.д. При перемешивании равномерно распределяется по всему объему смеси и армирует ее;

- фиброволокно является эффективной армирующей добавкой для пенобетона и просто бетона.

- используется во всех типах цементных растворов, когда необходимо предотвратить образование деформационных трещин, возникающих вследствие механического воздействия или усадки (например, при заливке полов, стяжке или при заливке в опалубку). Применение фиброволокна позволяет избежать трудоемких операций по армированию.

*Особенности:* повышает сопротивление механическим воздействиям; в отличие от металлической сетки, армирует раствор по всем направлениям; образует однородную массу. Добавляется в раствор на стадии замешивания или в готовый раствор.

*Применение:*

Фибра полипропиленовая разработана как альтернатива обычной металлической фибре. Основное её назначение – повышение сопротивления усадочному трещинообразованию материалов на цементной основе. Фибра добавляется в процессе приготовления растворной или бетонной смеси. Она легко и равномерно распределяется по всему объему, создавая пространственное армирование, препятствующее образованию и развитию усадочных трещин. Также повышается прочность конечных изделий на изгиб, ударная прочность.

*Фибра применяется при производстве:*

- пенобетона и других ячеистых бетонов (незаменима при заливке пенобетона в опалубку, полов, крыш, дымоходов и т.п.);

- бетонных сооружений, декоративного бетона;

- строительных смесей, штукатурок, растворов;

При добавлении фиброволокна в бетон наблюдаются положительные факторы:

- предотвращается появление усадочных трещин;

- повышается устойчивость к истиранию;

- исключается появление пластических деформаций, трещин, отслаивание поверхности;

- увеличивается морозостойкость.

В Полоцком университете разработана **дисперсно-армирующая добавка «Cell-in»**, которая создана не на основе полимерной фибры, а с использованием природных волокон. Фибра «Cell-in» позволяет увеличить прочность пенобетона как за счет армирующего эффекта, так и за счет высокого сцепления цементного камня с поверхностью природных волокон.

Данные исследований показателей средней прочности ячеистых бетонов с дисперсным армированием при марке образцов по средней плотности D400 приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения средней прочности по образцам из пенобетона D400

Наименование показателей	Процент армирования, %			
	0	0,5	1	2
σ, МПа	0,59	0,72	0,54	0,41

Формование образцов и исследование их физико-механических характеристик проводилось с использованием сырьевой смеси, содержащей 2000 грамм цемента, 1040 миллилитров воды, 150 миллилитров водного раствора пенообразователя ПБ-2000 рабочей концентрации 3 %. Количество вводимой в смесь дисперсно-армирующей добавки «Cell-in» (в сухом состоянии) составило 0,5, 1, 2 % от массы вяжущего.

Прочность образцов возрастает по мере увеличения количества вводимой дисперсно-армирующей добавки до определенного предела (в данном опыте до 0,5 % от массы вяжущего). При количестве добавки до 0,5 % от массы вяжущего прочность образцов возросла на 18 %. Дальнейшее увеличение количества дисперсно-армирующей добавки приводит к снижению прочности (при количестве 2 % от массы вяжущего – на 31 %).

**Заключение.** Снижение теплопроводности за счет уменьшения плотности при сохранении заданной прочности является приоритетной задачей в современном производстве пенобетона. Для решения данной задачи необходимо создание оптимального технологического режима, а также комплексное использование добавок, в том числе и дисперсно-армирующих.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бетоны ячеистые. Технические условия: ГОСТ 25485-89. – Введ. 01.01.1990. – М.: Науч.-исслед., проектно-конструкторский и технолог. ин-т бетона и железобетона (НИИЖБ) Госстроя СССР, 1990. – 13 с.
2. Махамбетова, У.К. Современные пенобетоны / У.К. Махамбетова, Т.К. Солтанбеков, З.А. Естемесов. – СПб.: ГУПС, 1999. – 161 с.
3. Пенобетон. Технологии производства ячеистых бетонных смесей // Пеноблок трейд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bibliotekar.ru/referaty-stroy-1/29.htm>. – Дата доступа: 10.09.2013.
4. Обзор технологий производства пенобетона // Строй-бетон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ibeton.ru/intro\\_main.php](http://www.ibeton.ru/intro_main.php). – Дата доступа: 12.10.2013.
5. Состав и материалы для производства пенобетона // Строй-бетон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibeton.ru/OtherMaterials.php>. – Дата доступа: 01.12.2013.
6. Композиция для изготовления дисперсно-армированного пенобетона: пат. МКП С 04 В 38/10 Рос. Федерации / Б.М. Румянцев, В.Т. Нгуен, Н.Т. Нгуен; заявитель Моск. гос. строит. ун-т. – № 2235082; заявл. 31.03.2003; опубл. 27.08.2004 // Открытия. Изобретения. – 2004.
7. Фибра базальтовая // Строймеханика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.penobet.ru/article12.html>. – Дата доступа: 02.12.2013.
8. Фибра полипропиленовая (полипропиленовое волокно) для добавок в бетон, пенобетон, газобетон // Строй-бетон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibeton.ru/fibra.php>. – Дата доступа: 02.12.2013.

Поступила 04.12.2013

#### TO THE QUESTION OF THE STRENGTH INDICATORS OF PRODUCTS FROM NON-AUTOCCLAVED FOAMED CONCRETE INCREASING

V. BOZYLEV, A. DRAGEL

*The existing methods of non-autoclaved foamed concrete wall blocks production are analyzed. The advantages and disadvantages of each are considered. It is noted that the injection molding technology requires compliance with certain mode during the foamed concrete hardening and its further care. Moreover, products, obtained by injection molding technology have a higher degree of shrinkage and cracking, and lower strength. The main ways of the strength increasing of non-autoclaved foamed concrete, from the moment of mixture manufacturing, till foamed concrete hardening are studied. The most common way to improve the strength properties of the foam concrete is to use the strength enhancing additives, and additives that provide the dispersion reinforcement. The main curing accelerators and plasticizers are given. The characteristics of the most common dispersion-reinforcing additives are considered.*

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 629.12.068

### ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ОПАСНОСТЕЙ В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

*д-р техн. наук, проф. В.К. ЛИПСКИЙ, А.Н. ВОРОНИН  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается проблема выявления опасностей на различных стадиях жизненного цикла магистрального трубопроводного транспорта с применением процессного подхода. Суть процессного подхода заключается в систематическом выявлении процессов и обеспечении их взаимодействия. Предпочтение выбора процессного подхода основывалось на утверждении, что именно в процессах происходит как создание качества услуги, так и возникновение потерь качества, а соответственно, и безопасности как одного из компонентов качества. В технических нормативных правовых актах предложено использовать графическое отображение процессов, так как такая форма представления процессов лаконична, хорошо воспринимается, интуитивно понятна и в то же время содержательна и информативна.*

**Введение.** Деятельность любой организации может быть графически представлена в виде взаимосвязей между персоналом, процессами, правовыми актами, сырьем. Это позволяет наглядно увидеть схему и понять цель функционирования организации, выявить и оценить неэффективные звенья.

Общепризнанный международный стандарт в области менеджмента качества ИСО 9000:2000 [1] при оценке эффективности и результативности деятельности рекомендует применять процессный подход, суть которого заключается в систематическом выявлении процессов и обеспечении их взаимодействия.

Применение процессного подхода подразумевает рассмотрение организацией своей деятельности как совокупности процессов, использующих ресурсы и преобразующих входы в выходы под влиянием управляющих воздействий для достижения главных целей организации. В таком случае подразделения организации рассматриваются не как структурные единицы со своими обособленными целями, а как участники процесса. Представив процесс производства продукции или оказания услуги в виде последовательности процессов, можно лучше понять структуру формирования ценности продукции, проанализировать причины возникновения потерь качества, а следовательно и ее составного компонента – безопасности – на предмет возможности появления опасностей. В то же время для грамотного построения сети процессов необходимо обладать информацией по их классификации.

В работе [2] процессы, действующие на предприятии, подразделяются на ключевые, функциональные и межфункциональные.

Авторы в [3] предлагают классифицировать процессы, действующие на предприятии, на 5 основных: бизнес-процессы, процессы жизненного цикла, вспомогательные, технические, процессы системы менеджмента качества.

В соответствии с [4] процессы, лежащие в основе отдельного вида деятельности, подразделяются на процессы жизненного цикла, процессы менеджмента и обеспечения ресурсами.

Как указано в [5], в процессы, необходимые для системы менеджмента качества, следует включать процессы управленческой деятельности руководства, обеспечения, жизненного цикла и измерения. Данную классификацию процессов следует считать наиболее полной, так как она охватывает все процессы, присутствующие в деятельности организации. Учитывая, что безопасность является одним из показателей качества, целесообразно при описании сети процессов для оценки их безопасности использовать именно эту классификацию процессов.

Процессы управления должны включать планирование и анализ со стороны руководства. Характерной чертой этого класса процессов являются результаты, представляющие собой разработанные условия, при которых должны функционировать процессы обеспечения, процессы жизненного цикла и процессы измерения.

Процессы обеспечения ресурсами являются вспомогательными. Их нельзя отнести ни к управленческим, ни к процессам жизненного цикла. Отличительная особенность этих процессов состоит в том, что их результатами являются ресурсы, которые используются при выполнении процессов жизненного цикла и менеджмента ресурсов.

Процессы жизненного цикла могут быть подразделены на отдельные процессы, каждый из которых соответствует определенному этапу жизненного цикла продукции: планирование, проектирование, разработка продукции, закупки, производство и обслуживание. Специфика этих процессов в том, что их результатом является произведенная продукция или оказанная услуга.

Процессы измерения должны включать процессы мониторинга, анализа, управления несоответствующей продукцией и её улучшения. Характерным признаком этих процессов являются результаты, представляющие собой указания, которые направлены на совершенствование продукции или оказанной услуги и применяются при выполнении процессов управления, обеспечения и процессов жизненного цикла.

**Основная часть.** Точное и детальное описание сети процессов в магистральном трубопроводном транспорте, соответствующих действительным условиям, требует представления особенностей, свойственных данному виду транспорта при его функционировании, а также задействованных в нем процессах и ресурсах на всех этапах его жизненного цикла.

Среди особенностей, свойственных магистральному трубопроводному транспорту при его функционировании и отличающему его от других видов транспорта, можно выделить следующие:

- в результате функционирования магистрального трубопроводного транспорта производится не продукция, а оказывается услуга транспортирования газа, нефти и нефтепродуктов от мест их добычи, получения к местам потребления;

- магистральный трубопроводный транспорт – сооружение линейно-протяженного типа. Основной его составляющей является линейная часть, представляющая непрерывную нить, сваренную из отдельных стальных труб и уложенную вдоль трассы тем или иным способом;

- данный вид транспорта характеризуется возможностью его повсеместной укладки, поэтому может эксплуатироваться в разнообразных топографических, геологических, гидрологических и климатических условиях;

- при функционировании такого вида транспорта гарантируется низкая себестоимость транспортировки энергоносителя по сравнению с другими видами транспорта;

- при транспортировании углеводородных носителей трубопроводным транспортом обеспечивается сохранность их качества благодаря полной герметизации трубы;

- в процессе эксплуатации соблюдается автоматизация операций по наливу, перекачке, транспортировке и сливу энергоносителя;

- магистральный трубопроводный транспорт при эксплуатации обслуживается малой численностью персонала;

- в ходе эксплуатации магистрального трубопроводного транспорта обеспечивается непрерывность процесса перекачки;

- в штатном режиме эксплуатации магистральный трубопроводный транспорт как опасный производственный объект становится источником ряда опасностей, сопровождающихся масштабными негативными последствиями для окружающей среды, персонала, населения, других технических объектов.

В жизненном цикле магистрального трубопровода можно выделить 7 основных стадий: проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, капитальный ремонт, консервация, ликвидация магистрального трубопровода [6].

Взаимодействие между процессами на каждой из стадий организовано последовательно, параллельно или последовательно-параллельно, что связано с возможностью выполнения следующего процесса при поступлении на его вход результата одного либо нескольких процессов одновременно.

Опасности могут возникать на каждой из стадий жизненного цикла, при этом каждой из стадий будут свойственны опасности только этой стадии, что связано с наличием индивидуальных материальных и информационных потоков на каждой из стадий. Возможные виды опасностей, которые свойственны тому или иному объекту технического нормирования и, соответственно, магистральному трубопроводному транспорту, представлены в [7] и состоят из 11 видов. Наиболее интересными с точки зрения зарождения и проявления наибольшего количества опасностей являются такие стадии жизненного цикла, как проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, капитальный ремонт. Меньшее количество опасностей проявляется при консервации и ликвидации.

Проектирование – наиболее короткая и в то же время важная стадия. Именно при проектировании принимаются все основные решения, от правильности которых зависит количество и качество процессов и объектов в магистральном трубопроводном транспорте. На этой стадии анализируется назначение объекта, условия его будущей эксплуатации, и в зависимости от этого принимают решение о выборе материала трубопровода, вида оборудования. Правильность принятия решений на данной стадии позволяет значительно уменьшить строительные и эксплуатационные затраты [8].

Проектирование – единственная стадия жизненного цикла, в которой не наблюдается проявление опасностей, связанных с функционированием магистрального трубопроводного транспорта. При проектировании закладываются как основы для функционирования магистрального трубопроводного транспорта, так и потенциальные условия, приводящие к возникновению опасности в дальнейшем.

Взаимодействие между процессами на данной стадии жизненного цикла происходит преимущественно последовательно. Анализируя требования технических нормативных правовых актов в области организации *проектирования* [9 – 11], проектирование в магистральном трубопроводном транспорте в общем виде можно отобразить как последовательную сеть процессов. Сеть процессов, представляющая собой первый уровень декомпозиции и построенная в соответствии с принципом системного подхода к управлению, показана на рисунке 1.



Рис. 1. Стадия жизненного цикла «проектирование» в магистральном трубопроводном транспорте

При строительстве магистрального трубопровода качество монтажных работ во многом определяет его безаварийность в будущем. Некачественное выполнение работ при строительстве будет способствовать зарождению опасностей и их переходу на следующую стадию жизненного цикла – «эксплуатация». Существенным является то, что соблюдение всех правил проведения монтажных работ, правильность технологии монтажа, транспортировки, погрузки, разгрузки, приемки и хранения материала, позволит обеспечить длительный и бесперебойный срок службы трубопровода и значительно снизить эксплуатационные расходы [12]. Взаимодействие между процессами на данной стадии жизненного цикла происходит преимущественно последовательно.

Анализируя требования технических нормативных правовых актов в области организации *строительства* [13 – 18], данную стадию жизненного цикла на примере строительства линейной части магистрального трубопровода в общем виде можно отобразить последовательной сетью процессов. Сеть процессов, представляющая собой первый уровень декомпозиции и построенная в соответствии с принципом системного подхода к управлению, проиллюстрирована рисунком 2. Следует учесть, что ход процессов и их результаты подвергаются производственному, операционному, инспекционному и авторскому надзору.



Рис. 2. Стадия жизненного цикла «строительство» на примере магистрального трубопровода

При составлении данной последовательности процессов учитывались основные виды работ при строительстве линейной части магистрального трубопровода. Работы, связанные с сооружением вспомогательных объектов магистрального трубопроводного транспорта, таких как установки электрохимической защиты трубопроводов от коррозии, линии и сооружения технологической связи, средства телемеханики трубопроводов и автоматики, линии электропередачи, технические средства противопожарной защиты сооружения трубопроводов, здания и сооружения служб эксплуатации, вдольтрассовые проезды, вертолетные площадки, во внимание не принимались во избежание информационной перегруженности и детализации.

Каждый процесс при строительстве магистрального трубопровода является носителем потенциальной опасности. Чтобы выявить эти процессы на более детальном уровне, необходимо провести декомпозицию процессов первого уровня. Сеть процессов, представляющая собой второй уровень декомпозиции и построенная в соответствии с принципом системного подхода к управлению, показана на рисунке 3.

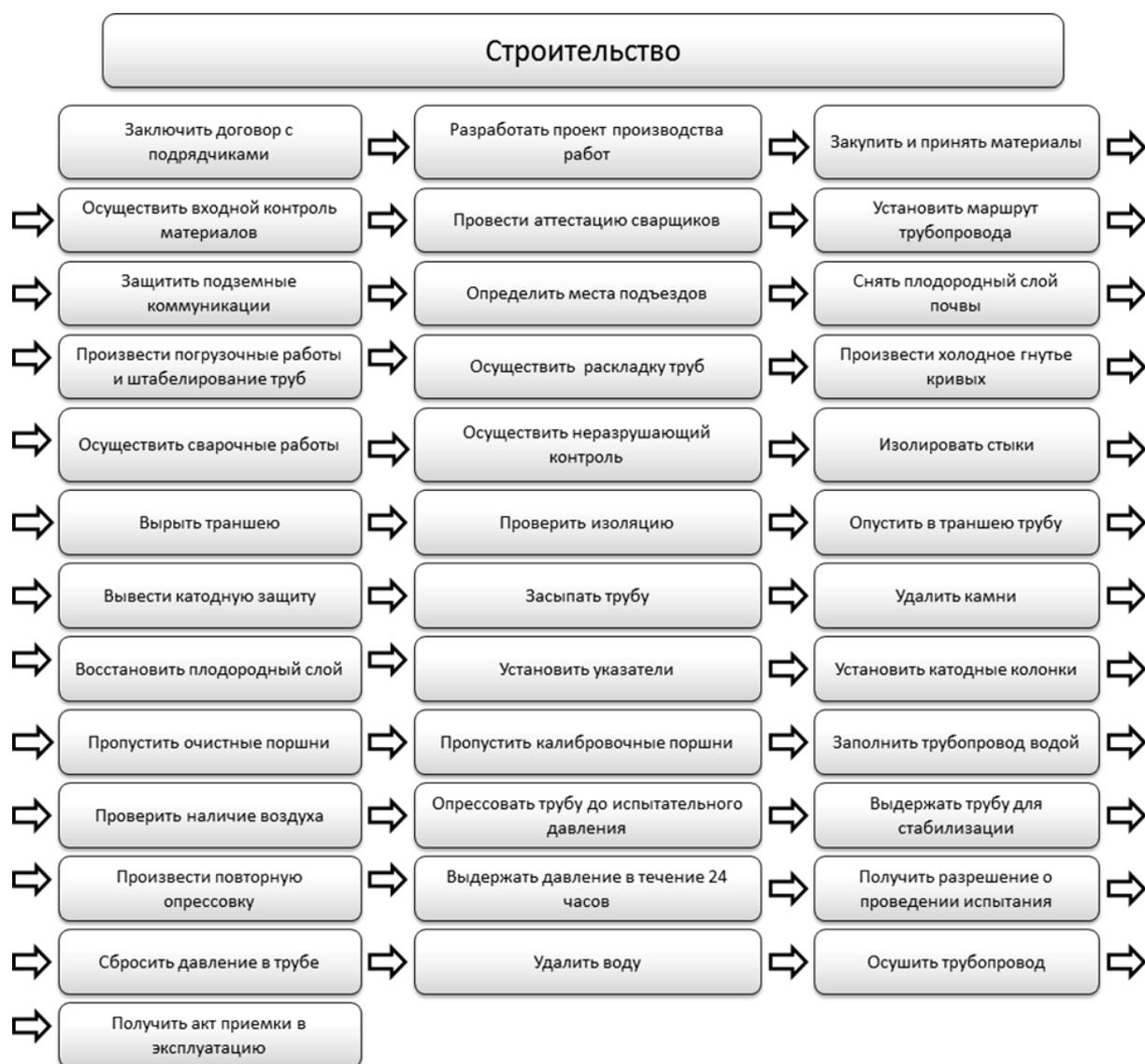


Рис. 3. Стадия жизненного цикла «строительство» на примере линейной части магистрального трубопровода на втором уровне декомпозиции

Визуальное детальное представление процессов создает удобные условия для дальнейшего анализа возможности возникновения той или иной опасности, представленной в [7]. Сопоставив каждый процесс второго уровня декомпозиции с потенциальными опасностями, можно составить список опасностей, свойственных процессам на различных стадиях жизненного цикла. В качестве примера на рисунке 4

представлены два последовательных процесса второго уровня декомпозиции стадии жизненного цикла «строительство» на примере линейной части с присущими им опасностями.

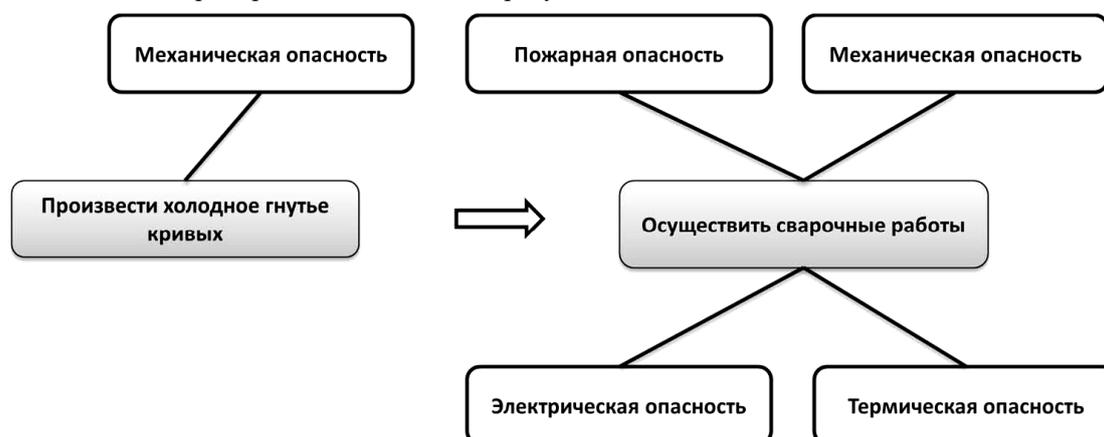


Рис. 4. Сопоставление опасностей процессам второго уровня декомпозиции на стадии жизненного цикла «строительство»

Подробно рассмотрев каждый процесс на более низком уровне декомпозиции и сопоставив ему возможные опасности, можно заключить, что на стадии строительства могут возникать следующие виды опасностей: механическая, пожарная, термическая, электрическая.

Эксплуатация – самая продолжительная стадия жизненного цикла в магистральном трубопроводном транспорте, длится в течение нормативного срока службы и более (при возможной эксплуатации трубопровода). Именно при эксплуатации выявляются все недостатки проектных решений и монтажа. Отличительной особенностью этой стадии является одновременное как последовательное, так и параллельное взаимодействие между процессами. Эксплуатацию на примере линейной части магистрального трубопровода [19; 20] в общем виде можно отобразить последовательно-параллельной сетью процессов. Сеть процессов, представляющая собой первый уровень декомпозиции и построенная в соответствии с принципом системного подхода к управлению, показана на рисунке 5.

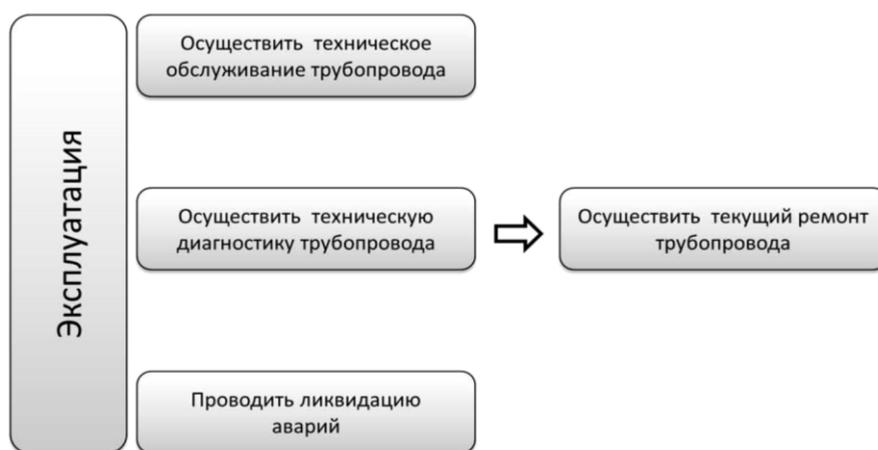


Рис. 5. Стадия жизненного цикла «эксплуатация» на примере линейной части магистрального трубопровода

Сеть процессов на примере эксплуатации линейной части магистрального трубопровода, представляющая собой второй уровень декомпозиции и построенная в соответствии с принципом системного подхода к управлению, показана на рисунке 6.

Проанализировав каждый процесс на данном уровне декомпозиции на предмет появления опасности, было выявлено, что на стадии эксплуатации проявляется наибольшее количество опасностей, которые относятся к следующим видам: механическая, промышленная, химическая, пожарная, взрывоопасность, термическая, электрическая.

Капитальный ремонт в магистральном трубопроводном транспорте представляет собой комплекс технических мероприятий, направленных на полное или частичное восстановление объектов до проектных характеристик. Капитальный ремонт производится после устранения выявленных в результате диагностики опасных дефектов. Потенциально опасные дефекты устраняются в процессе капитального ремонта. При капитальном ремонте ход процессов и их результаты подвергаются производственному, операционному, инспекционному и авторскому надзору. Взаимодействие между процессами осуществляется преимущественно последовательно.

Капитальный ремонт на примере линейной части магистрального трубопровода с заменой труб путем демонтажа заменяемого трубопровода и укладки вновь прокладываемого трубопровода в прежнее проектное положение на основе анализа литературных источников в области капитального ремонта магистрального трубопроводного транспорта [21] в общем виде можно отобразить последовательной сетью процессов, представляющей собой первый уровень декомпозиции и построенной в соответствии с принципом системного подхода к управлению (рис. 7).

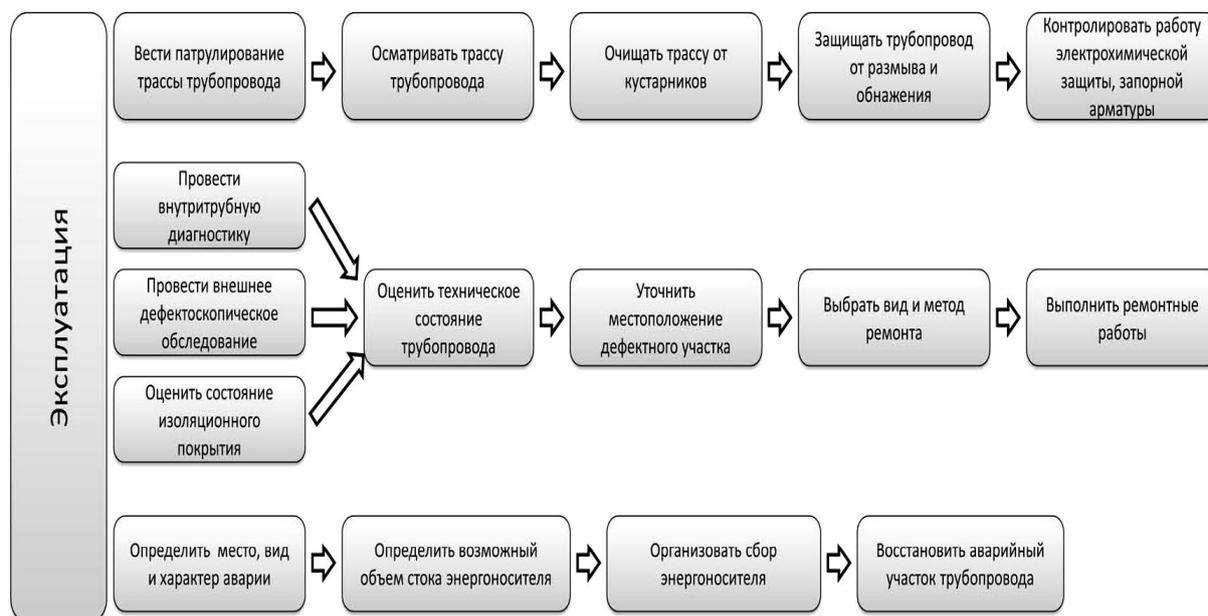


Рис. 6. Стадия жизненного цикла «эксплуатация»  
на примере линейной части магистрального трубопровода на втором уровне декомпозиции

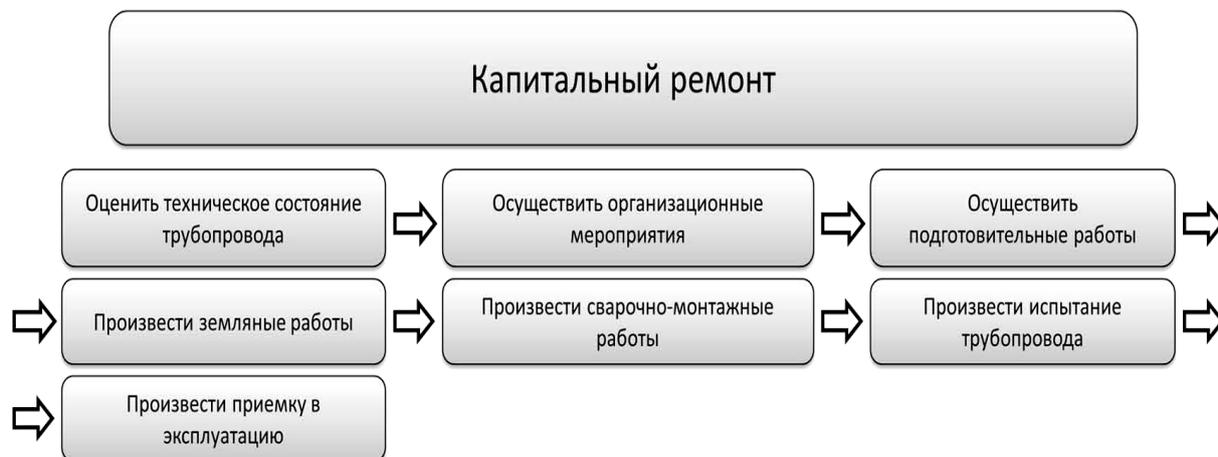


Рис. 7. Стадия жизненного цикла «капитальный ремонт»  
на примере линейной части магистрального трубопровода с заменой труб

Схема сети процессов, представляющая собой второй уровень декомпозиции и построенная в соответствии с принципом системного подхода к управлению, показана на рисунке 8.

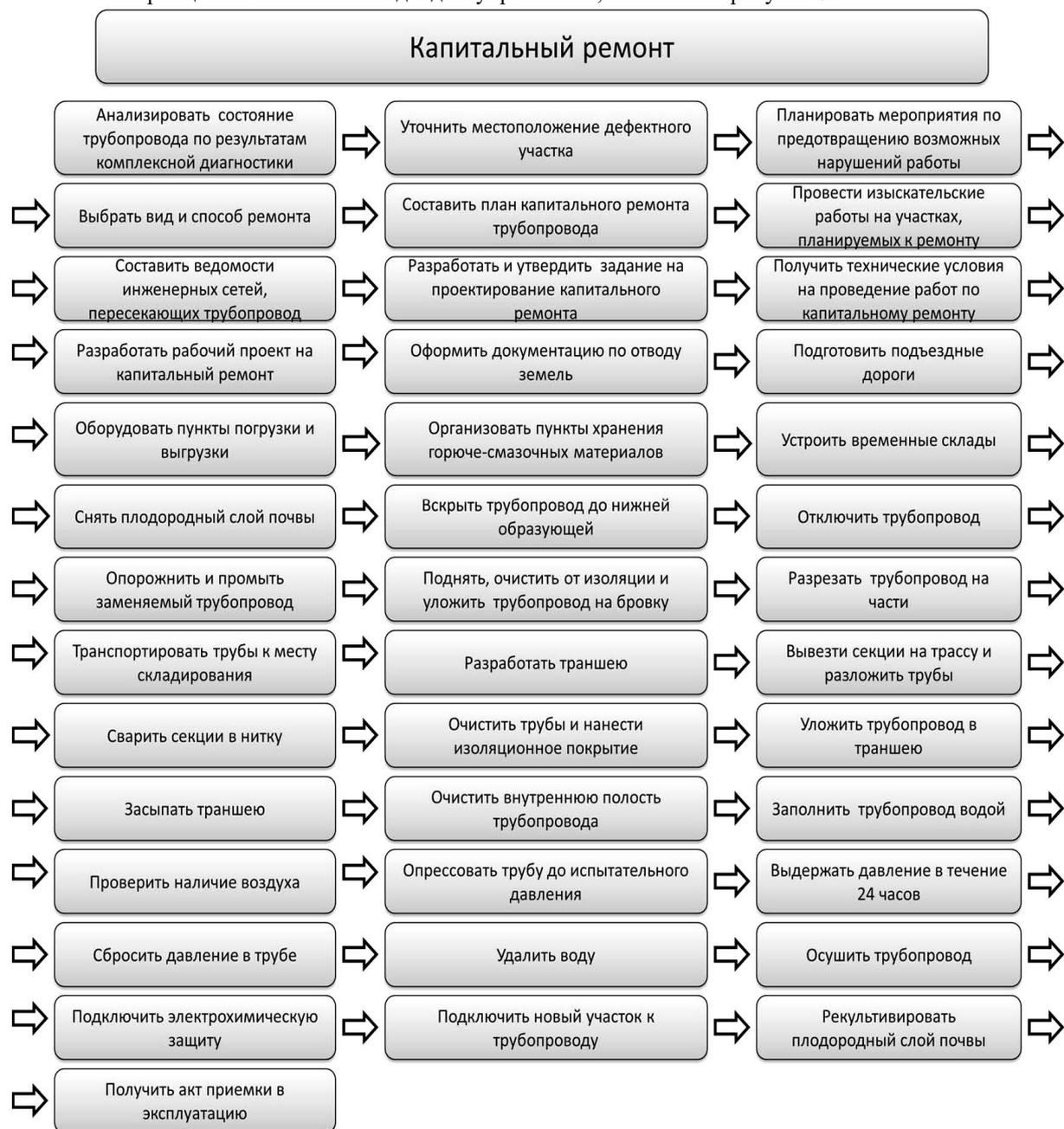


Рис. 8. Стадия жизненного цикла «капитальный ремонт» на примере линейной части магистрального трубопровода с заменой труб на втором уровне декомпозиции

Анализ рисунка 8 позволил сделать вывод, что на стадии жизненного цикла «капитальный ремонт» могут возникать следующие виды опасностей: механическая, промышленная, пожарная, взрывоопасность, термическая, электрическая.

Реконструкция магистрального трубопровода представляет собой комплекс мер по переустройству или техническому переоснащению магистрального трубопровода [22]. По содержанию производимых работ и применению технических нормативных правовых актов данная стадия жизненного цикла является сходной со строительством. Здесь могут возникать следующие виды опасностей: механическая, промышленная, пожарная, взрывоопасность, термическая, электрическая. Взаимодействие между процессами осуществляется преимущественно последовательно.

Консервация магистрального трубопровода является комплексом мер по защите объектов магистрального трубопровода от негативных воздействий окружающей среды и иных факторов после вывода магистрального трубопровода из эксплуатации [22]. На данной стадии жизненного цикла могут возникать такие опасности, как механическая, пожарная, взрывоопасность, термическая, электрическая. Взаимодействие между процессами осуществляется преимущественно последовательно.

Ликвидацией магистрального трубопровода являются действия по демонтажу, сносу или перепрофилированию объектов магистрального трубопровода и приведению окружающей среды в состояние, безопасное для жизни и здоровья граждан и пригодное для дальнейшего использования [22]. На данной стадии жизненного цикла также могут возникать опасности: механическая, пожарная, взрывоопасность, термическая, электрическая. Взаимодействие между процессами осуществляется преимущественно последовательно.

**Заключение.** Представление стадий жизненного цикла магистрального трубопроводного транспорта до второго уровня декомпозиции с помощью процессного подхода позволило произвести сопоставление видов опасностей стадиям жизненного цикла.

Опасности в магистральном трубопроводном транспорте могут зарождаться на любой из стадий жизненного цикла, причем самыми ответственными из них являются проектирование и строительство. Проявление опасностей может происходить на всех стадиях жизненного цикла за исключением проектирования. При строительстве магистрального трубопровода может проявляться 4 вида опасностей; при эксплуатации – 7; капитальном ремонте – 6; реконструкции – 6; при ликвидации – 5.

Эксплуатация – самая опасная и ответственная стадия как по количеству свойственных ей опасностей, так и по масштабу их проявления. Следовательно, из всех стадий жизненного цикла эксплуатация требует наиболее тщательной систематической оценки опасностей. Выполнять оценку опасностей следует, ориентируясь на процессный подход, потому что именно в процессах происходит как придание качества, так и потеря безопасности услуги. Отображение процессов и взаимосвязей между ними в графической форме облегчает процесс оценки опасностей, так как такое представление является лаконичным, наглядным, хорошо воспринимаемым, интуитивно понятным и в то же время содержательным и информативным.

Предложенный подход отображения процессов в графическом виде целесообразно применить и при разработке технических нормативных правовых актов в магистральном трубопроводном транспорте. В настоящее время в технических нормативных правовых актах процессы представлены в текстовой форме. Это не всегда является удобным для понимания и восприятия информации, так как по тексту слабо может прослеживаться последовательность процессов, не описаны входы в процессы и выходы из них. Графическое отображение процессов с входами, выходами, управляющими воздействиями позволит устранить этот недостаток. Наряду с этим рассматриваемый подход позволяет при разработке технических нормативных правовых актов учитывать максимально возможный перечень опасностей, возникающих в процессах на различных стадиях жизненного цикла, что реализуется при помощи декомпозиции процессов высшего уровня до простых операций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Международный стандарт ИСО 9000. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – 2-е изд. 2000-12-15. ISO-2000.
2. Полоцкий, Ю.И. Идентификация и описание сети процессов / Ю.И. Полоцкий, А.В. Виноградов // Методы менеджмента качества. – 2002. – № 11. – С. 7 – 8.
3. Владимирцев, А.В. Внедрение процессной модели на предприятиях / А.В. Владимирцев, О.А. Марцынковский, Ю.Ф. Шеханов // Методы менеджмента качества. – 2002. – № 8 – С. 15 – 21.
4. Методика и порядок работ по определению, классификации и идентификации процессов. Описание процессов на базе методологии IDEF0. Методические рекомендации: ТК РБ 4.2-МР-05-2002. – Минск: БелГИСС, 2002. – 52 с.
5. Системы менеджмента качества. Требования: СТБ ИСО 9001-2009. – Минск: БелГИСС, 2009. – 44 с.
6. Безопасность магистральных трубопроводов. Проект технического регламента таможенного союза. [Электронный ресурс] / Официальный сайта Гос. комитета по стандартизации Респ. Беларусь – 2012. – Режим доступа: <http://mgs.gosstandart.gov.by/ru-RU/ts-regl-pr.php>. – Дата доступа: 23.11.2012.
7. Рекомендации по разработке технических регламентов. – Минск: БелГИСС, 2004. – 32 с.
8. Трушкевич, А.И. Организация проектирования и строительства: учеб. пособие / А.И. Трушкевич. – Минск: Выш. шк., 2003. – 416 с.
9. Порядок разработки, согласования, утверждения и состав обоснований инвестиций в строительство предприятий, зданий и сооружений: СНБ 1.02.03 - 97. – Минск: Стройтехнорм, 1997. – 19 с.

10. Состав, порядок разработки и согласования проектной документации в строительстве: СНБ 1.03.02-96. – Минск: Стройтехнорм, 1996. – 31 с.
11. Инженерные изыскания для строительства: СНБ 1.02.01-96. – Минск: Стройтехнорм, 1996. – 110 с.
12. Технология сооружения газонефтепроводов: учебник / Ф.М. Мустафин [и др.]; под ред. Г.Г. Васильева. Т. 1. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2007. – 632 с.
13. Приемка законченных строительством объектов. Порядок проведения: ТКП 45-1.03-59-2008 (02250). – Минск: Стройтехнорм, 2008. – 74 с.
14. Организация строительного производства: ТКП 45-1.03-161-2009 (02250). – Минск: Стройтехнорм, 2009. – 56 с.
15. Технический надзор в строительстве. Порядок проведения: ТКП 45-1.03-162-2009 (02250). – Минск: Стройтехнорм, 2009. – 16 с.
16. Авторский надзор в строительстве. Порядок проведения: ТКП 45-1.03-207-2010 (02250). – Минск: Стройтехнорм, 2010. – 24 с.
17. Строительство. Технологическая документация при производстве строительно-монтажных работ. Состав, порядок разработки, согласования и утверждения технологических карт: ТКП 45-1.01-159-2009 (02250). – Минск: Стройтехнорм, 2009. – 22 с.
18. Правила производства и приемки работ. Магистральные трубопроводы: СНиП III-42-80. – Минск: Стройтехнорм, 2002. – 47 с.
19. Правила технической эксплуатации магистральных нефтепроводов: РД 153-39.4-056-00 [Электронный ресурс] // База нормативной технической документации. – 2012. – Режим доступа: [http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/480940/pravila\\_tekhnicheskoi\\_ekspluatatsii\\_magistralnykh\\_nefteprovodov.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/480940/pravila_tekhnicheskoi_ekspluatatsii_magistralnykh_nefteprovodov.pdf). – Дата доступа: 20.12.2012.
20. Трубопроводный транспорт нефти: учебник для вузов: в 2 т. / С.М. Вайншток [и др.]; под ред. С.М. Вайнштока: – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т. 2. – 624 с.
21. Правила капитального ремонта магистральных нефтепроводов: РД 39-00147105-015-98 [Электронный ресурс] // База нормативной технической документации. – 2012. – Режим доступа: [http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/480940/pravila\\_kapitalnogo\\_remonta\\_magistralnykh\\_nefteprovodov.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/480940/pravila_kapitalnogo_remonta_magistralnykh_nefteprovodov.pdf). – Дата доступа: 21.12.2012.
22. О магистральном трубопроводном транспорте: Закон Респ. Беларусь от 09.01.2002 № 87-3.

Поступила 04.12.2013

**APPLICATION OF THE PROCESS APPROACH AT IDENTIFYING  
OF DANGERS IN THE PIPELINE TRANSPORT  
AT DIFFERENT STAGES OF LIFE CYCLE**

**V. LIPSKY, A. VARONIN**

*This article is devoted to identifying dangers at different stages of the life cycle of the main pipeline transport with the use of the process approach. The essence of the process approach is to identify processes and provide their interoperability. Preference in selection of process approach was based on the statement that the creation of quality and emergence of quality loss, and thus the security as a component of quality happen in processes. It was also proposed to use a graphical display of the processes in the technical normative legal acts because the presentation of processes becomes concise, well received, intuitive and at the same time meaningful and informative.*

УДК 621.642

## ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ БЕЛАРУСИ

канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО, А.И. БОНДАРЧУК  
(Полоцкий государственный университет)

Исследуется вопрос технического состояния резервуарных парков Беларуси, находящихся в эксплуатации, в число которых входит более 1500 резервуаров. Самым распространенным типом является вертикальный стальной резервуар. Изучение актов обследования технического состояния показало, что превышение нормативного срока эксплуатации вертикальных стальных резервуаров способствует появлению и прогрессивному развитию коррозионных дефектов конструкции. Наличие критериев оценки коррозии позволит на ранней стадии развития дефекта оценить опасность этого повреждения. Таким образом, приоритетным направлением в обеспечении безопасной эксплуатации вертикальных стальных резервуаров на предприятиях Беларуси выступает разработка методов оценки коррозионных повреждений на основе данных диагностического обследования резервуаров. Данная методика позволит оценить «критичность» дефекта и выбрать оптимальный метод его ремонта. В то же время данная методика оценки опасности позволит поддержать резервуар в работоспособном состоянии, не увеличивая затраты на его обслуживание.

**Введение.** В процессе добычи, транспортировки и переработки нефти появляется необходимость в использовании емкости для промежуточного или длительного хранения продукта. В качестве объектов такого назначения используют резервуары разной конструкции (изготовленные из стали или железобетона), которые объединяют в группы по хранимому в них продукту, образуя резервуарные парки. Всего в Беларуси находится в эксплуатации более 1500 резервуаров.

**Анализ количества резервуаров.** Все резервуарные парки предприятий, расположенных в Беларуси, можно распределить по ведомственной принадлежности:

- 1) резервуарный парк предприятий по обеспечению нефтепродуктами (РУП «ПО «Белоруснефть»);
- 2) предприятий по нефтепереработке (ОАО «Нафтан», ОАО «Мозырский НПЗ»);
- 3) предприятий трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов (ОАО «Гомельтранснефть Дружба», ОАО «Полоцктранснефть Дружба», ЧУП «ЗападТранснефтепродукт»);
- 4) другие предприятия (например, министерство обороны).

Резервуарные парки, относящиеся к четвертому пункту, рассматривать нецелесообразно, так как объемы хранимого продукта на территории таких предприятий крайне малы.

Самый многочисленный резервуарный парк располагается на территориях предприятия по обеспечению нефтепродуктами, затем в порядке убывания – предприятий по нефтепереработке и предприятий трубопроводного транспорта (таблица).

Количество резервуаров на предприятиях Беларуси

Распределение предприятий	Название предприятия	Количество резервуаров, %
Предприятия по обеспечению нефтепродуктами	РУП «ПО «Белоруснефть»	55,4
	ОАО «Нафтан»	35,1
Предприятия по нефтепереработке	ОАО «Мозырский НПЗ»	5,2
	ЧУП «ЗападТранснефтепродукт»	1,8
	ОАО «Гомельтранснефть Дружба»	1,6
Предприятия трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов	ОАО «Полоцктранснефть Дружба»	0,9

В данной таблице приведены сведения об общем количестве резервуаров, включая вертикальные, горизонтальные и железобетонные конструкции. Необходимо отметить, что в понятие «вертикальные резервуары» также включены такие типы конструкции, как вертикальные резервуары с понтоном и плавающей крышей.

В [1] приведена классификация всех существующих резервуаров для промышленности по основному используемому материалу для сооружения:

- металлические;
- неметаллические (железобетонные, резиноканевые, из синтетических материалов);
- подземные емкости глубокого заложения, созданные по специальной закрытой технологии в соляных отложениях, в тугопластичных пластах или в пластах крупнообломочных пород.

С учетом анализируемых резервуарных парков предприятий, указанных в таблице, приведенную выше классификацию можно применить для Республики Беларусь. Таким образом, по основному используемому материалу в Беларуси различают следующие типы резервуаров:

- металлические резервуары;
- неметаллические (железобетонные).

По конструктивному решению широко представлены металлические цилиндрические резервуары вертикального и горизонтального исполнения. Согласно рисунку 1, наиболее широко распространенный тип – это вертикальный резервуар, изготовленный из стали (сокращенно РВС). В Беларуси около 77 % от всего количества резервуаров приходится на такой тип конструкции, включая резервуары с понтоном и плавающей крышей.



Рис. 1. Количество резервуаров в Беларуси по типам

Среди приведенных выше предприятий самое большое количество вертикальных стальных резервуаров, около 52 % от всего их числа, сосредоточено на территориях РУП «ПО «Белоруснефть» – крупнейшего в Беларуси государственного предприятия по обеспечению нефтепродуктами. Основная деятельность предприятия связана с равномерным распределением нефтепродуктов по республике путем их перемещения с нефтеперерабатывающих заводов на областные филиалы РУП «ПО «Белоруснефть» и затем на региональные или районные пункты налива. На предприятии можно выделить один из основных технологических процессов – длительное хранение светлых и темных нефтепродуктов.

На предприятиях ОАО «Нафтан» и ОАО «Мозырский НПЗ» расположено около 44 % вертикальных стальных резервуаров от всего их числа в Беларуси.

Для нефтеперерабатывающих заводов важным компонентом является промежуточное хранение полученных в ходе химических процессов продуктов разложения нефти. Поэтому резервуарный парк такого рода предприятий представляет собой группы резервуаров небольших объемов, количество которых зависит от производительности самого предприятия и ассортимента выпускаемой продукции. Следует отметить, что ОАО «Нафтан» – это крупный нефтехимический комплекс, который выпускает различные виды топлива, масла смазочные и битумы, ароматические углеводороды и продукты нефтехимии. На территории этого предприятия расположено более 37 % вертикальных резервуаров.

Резервуарные парки предприятий по трубопроводному транспорту нефти и нефтепродуктов состоят из резервуаров типа РВС только на 4,2 %. Специфика деятельности предприятий заключается в том, что хранение большого количества продукта обеспечивается качественно за счет больших геометрических объемов резервуаров, которые позволяют сократить потери хранимого продукта.

Горизонтальные стальные резервуары (РГС) эксплуатируются для хранения темных нефтепродуктов на предприятии по обеспечению нефтепродуктами РУП «ПО «Белоруснефть» и их количество равно 75 % от всего числа РГС в Беларуси. Также такой тип конструкции активно используется предприятиями для хранения ароматических углеводородов и продуктов нефтехимии на нефтеперерабатывающих заводах. Так, на ОАО «Нафтан» число РГС составляет 25 % от общего количества.

В Беларуси количество вертикальных железобетонных резервуаров (ЖБР) составляет всего 2 %. Причина нераспространенности заключается в том, что сегодня обслуживание и ремонт ЖБР требует от предприятия больших капиталовложений. При завершении эксплуатационного срока службы железобетонный резервуар, как правило, заменяют на стальной, что позволит сократить затраты, связанные с потерями нефти, тем самым снизить расходы на эксплуатацию и ремонт.

Таким образом, проведенный анализ количества резервуаров в промышленности Беларуси свидетельствует, что наиболее распространенным типом конструкции является вертикальный стальной резервуар.

**Анализ технического состояния резервуара.** Для каждого предприятия геометрический объем вертикального резервуара связан с технологическим процессом. Правила технической эксплуатации резервуаров для нефти и нефтепродуктов, действующие на предприятиях Беларуси, устанавливают требования для вертикальных резервуаров объемом от 100 м<sup>3</sup>. По этой причине в анализе не участвуют резервуары емкостью до 100 м<sup>3</sup>.

Рассмотрим вертикальные стальные резервуары объемом от 100 до 75000 м<sup>3</sup>, количество которых проиллюстрировано рисунком 2.

Согласно [2] в зависимости от объема, резервуары по степени опасности подразделяются на 4 класса:

- класс I – резервуары объемом более 50000 м<sup>3</sup>;
- класс II – резервуары объемом от 20000 до 50000 м<sup>3</sup>;
- класс III – резервуары объемом от 1000 до 20000 м<sup>3</sup>;
- класс IV – резервуары объемом до 1000 м<sup>3</sup>.

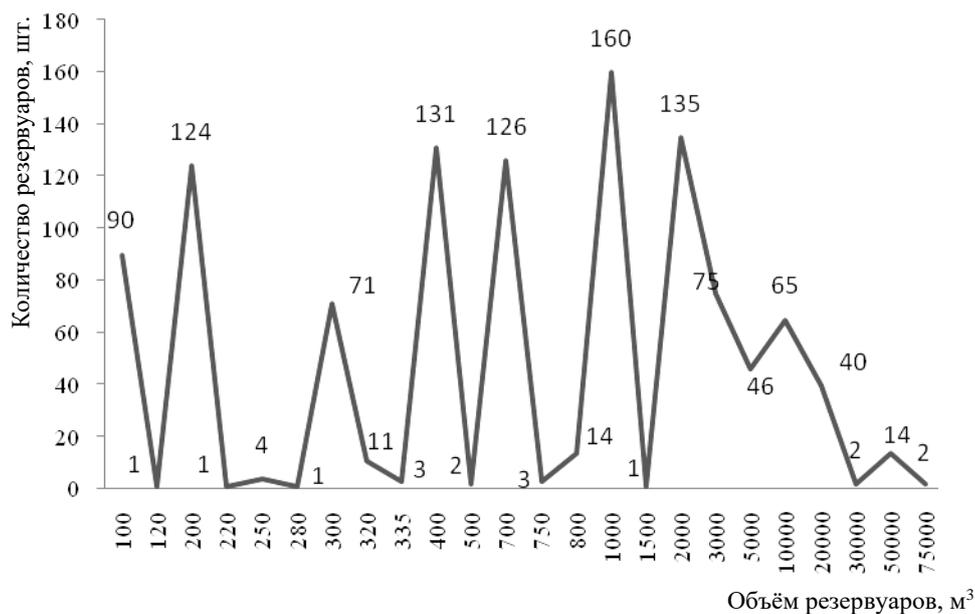


Рис. 2. Количество стальных вертикальных резервуаров в Беларуси объемом от 100 до 75000 м³

Из рисунка 2 видно, что количество вертикальных стальных резервуаров I класса составляет 16 штук, II класса – 42, III класса – 482, IV класса – 582. Полученные данные свидетельствуют о том, что в Беларуси по степени опасности преобладают вертикальные резервуары IV класса объемом до 1000 м³.

Следующим параметром оценки технического состояния резервуарных парков республики является продолжительность их эксплуатации. В соответствии с действующими нормативными документами, срок службы вертикальных стальных резервуаров составляет 20 – 25 лет, если другое значение не указано в проекте. Резервуар является технически сложным конструктивным сооружением. По этой причине параметры конструкции должны соответствовать критериям, установленным технической документацией, в течение всего времени эксплуатации. Другими словами, необходимо поддерживать резервуарный парк в работоспособном состоянии, обеспечив безотказность конструкции и ее элементов для экологически безопасной эксплуатации, что является актуальной задачей в Беларуси, так как среднее значение срока службы анализируемых объектов составляет 39,96 лет.

Изучение актов обследования технического состояния показало, что превышение нормативного срока эксплуатации вертикальных стальных резервуаров способствует появлению и прогрессивному развитию отклонений параметров конструкций от значений, предусмотренных проектом. Таким образом, речь идет о возникновении дефектов конструкции резервуара с течением времени его эксплуатации.

Все дефекты резервуаров, влияющие на эксплуатационную надежность стальных вертикальных резервуаров, можно классифицировать по ряду признаков. Одним из них является классификация *по процессу образования дефекта* [3]:

- дефекты, появившиеся в процессе изготовления металлопроката, – металлургические дефекты: задиры, нарушения геометрии проката, неравномерное легирование, нарушение кристаллической структуры материала, неравномерная термическая обработка и др.;
- дефекты, появившиеся в процессе производства рулонных заготовок, – заводские дефекты: свищи, непровары, гофры, смещения стыкуемых кромок и др.;
- дефекты, появившиеся в процессе транспортировки, – смятие части рулона, локальные вмятины на краю рулона (листа), прогибы в продольном направлении и др.;
- дефекты, появившиеся в процессе монтажа, – монтажные дефекты: некачественная подготовка основания, прожоги в местах установки временных креплений, остатки монтажных приспособлений и др.;
- дефекты, появившиеся в процессе эксплуатации резервуара, – эксплуатационные дефекты: коррозийные дефекты, локальная потеря устойчивости, хлопуны и др.

По первым трем позициям дефекты устраняются после обнаружения при изготовлении металлоконструкций резервуара на производстве либо выбраковываются. Наиболее опасными являются монтажные и эксплуатационные дефекты, появившиеся при некачественном монтаже резервуаров на площадке, и невыявленные в процессе контроля при сооружении.

Монтажные и эксплуатационные дефекты можно классифицировать по *конструктивным элементам резервуара*: основание; днище; окрайки днища; стенка; крыша; вспомогательные элементы (лестница, пожарный трубопровод и др.).

Используя акты обследования технического состояния вертикальных стальных резервуаров, был определен конструктивный элемент, который с учетом климатических условий в Беларуси и режимов эксплуатации в технологических процессах предприятий республики более всего подвергается образованию дефектов. Проведенный анализ актов показал, что стенка вертикального стального резервуара – это самый уязвимый элемент этой конструкции. Результаты анализа представлены на рисунке 3.

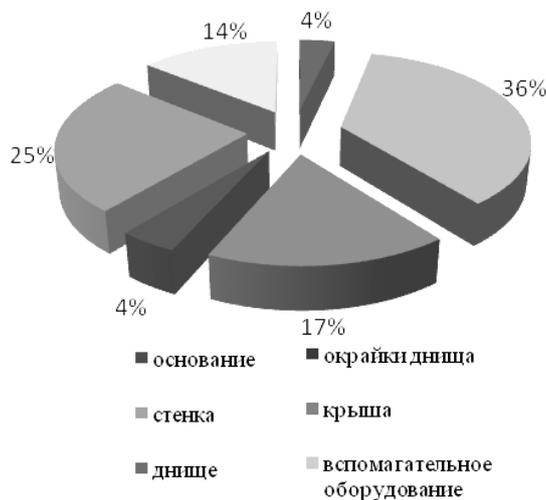


Рис. 3. Дефекты резервуара вертикального стального по конструктивным элементам

К наиболее часто встречающимся дефектам вертикального стального резервуара можно отнести следующие [3]:

- дефекты монтажных сварных швов;
- коррозионные повреждения;
- вырывы металла и остатки при варке монтажных приспособлений на стенке;
- хлопунцы;
- вмятины и выпучины;
- неравномерная осадка основания резервуара;
- недопустимые отклонения от вертикали.

Наряду с вышеперечисленными дефектами коррозионные повреждения являются самым распространенным видом разрушения целостности оболочки. На их долю приходится около 50 % от всего количества дефектов у вертикальных стальных резервуаров. При этом акты обследования технического состояния РВС позволили определить, что коррозионный износ металла конструкции встречается у 84 % резервуаров предприятий Беларуси, приведенных в таблице выше.

Согласно [4] и с учетом актов обследования состояния резервуаров в Беларуси, различают сплошную и язвенную коррозию. Сплошная коррозия – это коррозия, которая охватывает всю поверхность металла конструкции или ее отдельных элементов (например, пояса стенки резервуара или отдельного листа).

Коррозионная язва – это местное коррозионное разрушение, имеющее вид отдельной раковины. Язвенная коррозия характеризуется появлением на поверхности металла отдельных или множественных повреждений. Такой вид коррозии считают самой сложной, поскольку помимо увеличения площади корродируемого участка увеличивается и глубина язвы.

Самым распространенным видом является язвенная коррозия. Она обнаружена в 95 % случаев коррозионного повреждения металла вертикальных резервуаров. При этом нужно отметить, что около 26 % язвенной коррозии привело к образованию сквозного отверстия в элементах конструкции. Согласно [5], возникновение такой ситуации недопустимо в эксплуатации вертикального резервуара. Понятие «сквозное отверстие» означает, что фактическая толщина элемента конструкции вертикального стального резервуара стала меньше отбраковочной величины [5]. С целью обеспечения безопасной эксплуатации резервуаров на предприятиях должны быть предусмотрены профилактические осмотры и обследования объектов.

Профилактические осмотры выполняются ежедневно (каждую смену) обслуживающим персоналом. При проведении осмотра вероятность определения фактической толщины без измерительных при-

боров будет мала, тем более невозможно определить, будет ли она меньше отбраковочной величины. Помимо этого в течение 8 – 10 лет (не реже 1 раза) вертикальный стальной резервуар должен пройти полное диагностическое обследование. Результатом такого обследования служит заключение о его техническом состоянии и определении критериев отбраковки элементов конструкции, что в свою очередь позволит принять решение о необходимости проведения ремонта.

Тогда, с одной стороны, причиной образования коррозионного повреждения в резервуаре может являться несоблюдение графиков текущего и капитального ремонтов, а с другой – отсутствие оценки геометрических размеров коррозии по степени опасности его развития. Наличие критериев оценки, позволят на ранней стадии развития язвенной коррозии оценить опасность этого повреждения до момента наступления критического геометрического размера, близкого к отбраковочному. Оценив по степени опасности коррозию, необходимо принять решение по устранению данного дефекта и выбора оптимального метода ремонта в соответствии с его степенью опасности.

Таким образом, приоритетным направлением в обеспечении безопасной эксплуатации вертикальных стальных резервуаров на предприятиях Беларуси является разработка методов оценки коррозионных повреждений на основе данных диагностического обследования резервуаров. Данная методика позволит оценить «критичность» дефекта и выбрать оптимальный метод его ремонта. В то же время данная методика оценки опасности позволит поддержать резервуар в работоспособном состоянии, не увеличивая затраты на его обслуживание.

**Заключение.** Анализ актов технического состояния позволил выявить, что самым распространенным типом конструкции в Беларуси является вертикальный стальной резервуар. Основная причина большого количества дефектов таких резервуаров связана с истечением его срока службы. Для обеспечения безопасной эксплуатации резервуарных парков Беларуси необходимо разработать методы оценки коррозионных повреждений металла резервуара по геометрическим параметрам и на основе этой методики предложить оптимальный метод ремонта. Внедрение методики оценки коррозионных повреждений при соблюдении всех норм и правил технической документации позволит предприятию поддержать надежность конструкций резервуарных парков, не увеличивая затраты на их эксплуатацию и устранение последствий аварий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Резервуары для нефти и нефтепродуктов. Конструкции и оборудование / Ф.М. Мустафин [и др.]. – Уфа, 2009.
2. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Правила проектирования и устройства: ТКП 45-5.04-172-2010.
3. Бондарчук, А.И. Выбор методов ремонта вертикальных стальных резервуаров с учетом наличия дефектов / А.И. Бондарчук // Труды молодых специалистов Полоц. гос ун-та. Строительство. Вып. 52. – С. 161 – 163.
4. Стандарт Ассоциации. Резервуары стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности: СА-03-008-08.
5. Правила технической эксплуатации резервуаров для нефти и нефтепродуктов: ТКП 169-2009.

Поступила 02.12.2013

#### TECHNICAL CONDITION OF TANK FARM IN BELARUS

**L. SPIRIDENOK, A. BONDARCHUK**

*There are more than 1,500 tanks in operation in Belarus. The most common type is a vertical steel tank. Acts of technical condition show that a regulatory lifetime excess of vertical steel tanks contributes to the emergence and progressive development of corrosion defects in construction. The presence of corrosion assessment criteria allow to assess the danger of damage at early stages of defect. Thus, the priority in ensuring the safe operation of vertical steel tanks at the Belarusian enterprises is to develop methods for assessing corrosion damage on the basis of diagnostic testing of tanks. This technique will allow to estimate the “priority” of the defect and choose the optimal method of repair. At the same time, this technique of risk assessment will allow to support the tank to be operable without increasing the cost of its maintenance.*

УДК 66.094.29:621.643.053(476)

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ,  
НАХОДЯЩИХСЯ В ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ****А.Н. ЯНУШОНОК***(Полоцкий государственный университет);**канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Республика Беларусь обладает развитой сетью магистральных трубопроводов. Срок эксплуатации большей части эксплуатируемых в Беларуси магистральных трубопроводов превышает проектный ресурс. Показана характерная особенность проявления старения трубных сталей – снижение ударной вязкости металла, определяющей сопротивление хрупкому разрушению. Приведены основные критерии надежности магистральных трубопроводов. Рассмотрены вопросы повышения надежности магистральных трубопроводов, проработавших длительное время, за счет восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений на основе использования оригинального метода неразрушающего контроля.*

**Введение.** Республика Беларусь обладает развитой системой магистрального трубопроводного транспорта углеводородных энергоносителей. По магистральным нефтепроводам и нефтепродуктопроводам осуществляется снабжение углеводородным сырьем нефтеперерабатывающих заводов, расположенных в городах Новополоцк и Мозырь, реализовываются транзитные поставки в страны Европейского Союза и Украину. Общая протяжённость технических коридоров, в которых проложены магистральные трубопроводы, осуществляющие транспортировку нефти и нефтепродуктов, по территории Беларуси составляет 1231,5 км. В одностороннем исчислении их суммарная длина исчисляется 3613,5 км. Протяжённость разветвленной сети магистральных газопроводов составляет 7490 км, в том числе более 2500 км газопроводов большого диаметра, обеспечивающих непосредственно транзит природного газа в страны Европы. Характерной чертой эксплуатируемой системы транспорта углеводородов является ее прогрессирующее старение, так как большинство трубопроводов было построено в 60 – 80-е годы прошлого столетия. Около 80 % магистральных трубопроводов, транспортирующих жидкие углеводороды, и более 25 % магистральных газопроводов работают за пределами проектного ресурса. Еще приблизительно 25 % магистральных газопроводов вплотную подошли к данному возрасту. При этом часть магистральных трубопроводов построена в начале 60-х годов XX века, и срок их эксплуатации приближается к 50 годам. При этом обновление всей системы, в особенности линейной части магистральных трубопроводов Беларуси, требует значительных затрат и в настоящее время практически невозможно. В связи с этим встает актуальная задача обеспечения надежности линейной части магистральных трубопроводов при длительной их эксплуатации.

Задача обеспечения надежности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов – сложная и многофакторная. Основными факторами, определяющими сопротивление труб разрушению, являются: рабочее давление, температура, свойства перекачиваемого продукта, исходные свойства металла труб, качество проектных, строительного-монтажных и эксплуатационных работ, внешние воздействия, интенсивность деградации в результате старения. Результат воздействия комплекса данных факторов – это накопление повреждений, деградация свойств металла, коррозионные и эрозионные повреждения, что в итоге приводит конструкцию к предельному состоянию.

В качестве предельного состояния может быть принято как разрушение труб, так и недопустимые повреждения – уменьшение толщины стенки трубопровода и т.д.

Рассмотрим основные используемые критерии предельного состояния с точки зрения выбора и применения их для оценки надежности магистрального трубопровода.

В качестве основного критерия для магистральных трубопроводов традиционно используется критерий допускаемых напряжений или деформаций при статическом нагружении. В общем виде данный критерий может быть записан в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_s &\leq [\sigma]; \\ \varepsilon_s &\leq [\varepsilon],\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\sigma_s$  – эффективное напряжение в стенке трубы, вычисленное по заданному критерию прочности;  $\varepsilon_s$  – эффективная деформация;  $[\sigma]$  – максимально допустимое напряжение, заданное в форме, согласованной с выбранным критерием прочности;  $[\varepsilon]$  – максимально допустимая деформация.

То есть условием разрушения труб является достижение напряжения или деформации критического уровня. При этом к сварным соединениям магистральных трубопроводов предъявляется требование равнопрочности с основным металлом. В действующих нормах [1] заложен метод предельных состояний, в соответствии с которым предусмотрено рассмотрение нескольких предельных состояний и введение системы дифференцированных коэффициентов запаса прочности. В качестве основного предельного состояния выбрано достижение нормальными напряжениями временного сопротивления разрыва металла трубопровода, а в качестве дополнительного условия требуется выполнение условия деформативности для нормативных кольцевых напряжений.

Условие прочности по критерию наибольших нормальных напряжений имеет вид:

$$\sigma_{ки} \leq R_1, \quad (2)$$

где  $R_1$  – расчетное сопротивление растяжению (сжатию) материала труб.

А условие деформативности для нормальных кольцевых напряжений записывается как

$$\sigma_{ки} \leq R_2. \quad (3)$$

Здесь  $R_2$  – условный нормативный предел текучести материала труб.

Данный подход также применяется при определении максимального статического рабочего давления на дефектных участках трубопровода после проведения диагностических обследований внутритручными инспекционными снарядами, и используется в зарубежных нормативных документах [2]. Если учесть, что отказы и разрушения труб магистральных трубопроводов зачастую происходят в процессе пусковых испытаний и эксплуатации магистральных трубопроводов при напряжениях в металле труб, составляющих 0,5...0,6 минимального значения предела текучести  $\sigma_{02}$  [3, с. 112], то данный подход не может служить критерием обеспечения надежности трубопроводных конструкций. Кроме того исследователями Института проблем транспорта энергоресурсов, а также рядом других сделан вывод, что разрушение металла труб при статических нагрузках практически не чувствительно к дефектам, встречающимся на трубопроводах, а конструкционная надежность магистральных трубопроводов определяется сопротивляемостью металла труб хрупкому разрушению, которое возникает в результате усталости и деформационного старения трубной стали [4, с. 103].

Усталостный критерий предельного состояния при циклическом нагружении лимитирует количество циклов до разрушения и может быть записан в общем виде:

$$N \leq [N], \quad (4)$$

где  $N$  – число циклов или блоков квазициклического нагружения;  $[N]$  – предельное число циклов по испытанию материала на усталость.

В соответствии с данным критерием возможна оценка долговечности в условиях циклического нагружения магистрального трубопровода. В то же время по данным [5] в изломах труб, разрушившихся в условиях эксплуатации от глубоких коррозионных повреждений, признаки усталости металла зачастую отсутствуют. Это говорит о том, что данный критерий также не всегда может быть использован для определения надежности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов.

Для оценки трещиностойкости применяют критерии линейной и нелинейной механики разрушения. В линейной механике разрушения используются силовые, энергетические и деформационные критерии. При этом наиболее часто используется силовой критерий, который может быть записан в виде:

$$K_{1c} \leq K_{1ck} \quad (5)$$

где  $K_{1c}$  – максимальный коэффициент интенсивности напряжений на фронте трещины нормального отрыва;  $K_{1ck}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва в данном материале. Данные характеристики определяются при статическом или циклическом нагружении.

В нелинейной механике разрушения зачастую используют силовой подход П. Пэриса (6) и деформационный подход Махутова (7), которые оценивают количество циклов от момента зарождения трещины до момента, когда трещина станет сквозной. Данные зависимости связывают между собой скорость роста трещины  $\frac{da}{dN}$  с размахом напряженно-деформированного состояния в вершине трещины за один цикл:

$$\frac{da}{dN} = C_o (\Delta K_{I\sigma})^{n\sigma}; \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = C_e (\Delta K_{Ic})^{n_e}, \quad (7)$$

где  $C_e, n_e, C_e, n_e$  – параметры циклической трещиностойкости.

Существуют и другие эмпирические методы оценки надежности, учитывающие конкретные условия работы трубопровода [4; 7 – 10], однако они не учитывают полностью всё многообразие действующих факторов, и даже известные факторы оцениваются с высокой степенью погрешности.

Наиболее полной является гипотеза Л.А. Сосновского [6, с. 253], согласно которой энергетический критерий о предельном состоянии при комплексном повреждении может быть записан в следующем виде:

$$\Phi(U_{\sigma(ch)}^{eff}, U_{\tau(ch)}^{eff}, U_{T(ch)}^{eff}, \Lambda_{ij}, m_k, U_0) = 0. \quad (8)$$

Здесь  $U_{\sigma(ch)}^{eff}, U_{\tau(ch)}^{eff}, U_{T(ch)}^{eff}$  – соответственно силовая, фрикционная и тепловая эффективная (затрачиваемая на повреждение) энергия;  $\Lambda_{ij}$  – параметры взаимодействия;  $m_k$  – некоторые характеристики свойств контактирующих материалов;  $U_0$  – критическая величина эффективной энергии в некоторой области ограниченных размеров силовой системы (опасном объеме).

В соответствии с данным критерием возможна оценка предельного состояния и долговечности в условиях комплексного повреждения магистрального трубопровода, определяемого следующими явлениями: механической усталостью, трением и изнашиванием, тепловыми и электрохимическими (коррозионными) процессами. В данном случае эксплуатационная надежность труб определяется диалектическим взаимодействием необратимых повреждений, обусловленных комплексом нагрузок. В то же время экспериментальная проверка данного критерия затруднена из-за отсутствия опытных данных [6, с. 267].

Несмотря на значительный прогресс в механике разрушения и теории надежности, существующие подходы позволяют дать оценку надежности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов лишь приближенно, в связи с отсутствием однозначно верной прикладной методики, которая бы учитывала всё многообразие факторов. При этом даже известные факторы оцениваются с высокой степенью погрешности. Это связано со значительным рассеянием свойств металла в исходном состоянии, с рассеянием изменения параметров старения и т.д., а также со сложностью использования части предлагаемых критериев в реальной инженерной практике.

Нормативным показателем обеспечения надежности магистральных трубопроводов традиционно считается ударная вязкость [1]. Данный показатель широко используется в инженерной практике, определяется по результатам испытания стандартных образцов по ГОСТ 9454 [14] с U-, V- и T-образными надрезами и используется для выявления склонности металла к сопротивлению ударным воздействиям, в первую очередь к хрупкому разрушению.

Ударная вязкость – сложная, комплексная характеристика, зависящая от совокупности прочностных и пластических свойств материала, в настоящий момент является одним из важнейших критериев обеспечения нормальной (безаварийной) работы конструкций. С развитием механики повреждений идет поиск взаимосвязи между надежностью, трещиностойкостью и значениями ударной вязкости. Так, например, в работе [15] получена зависимость между ударной вязкостью образцов с V-образным надрезом и параметрами трещиностойкости для некоторых трубных сталей.

Длительная эксплуатация магистральных трубопроводов ведет к деградации трубной стали за счет процессов накопления необратимых повреждений и изменения структурного состояния. В структурно-неоднородных областях, таких как сварные соединения, деформационное старение протекает более интенсивно, создавая при этом дополнительные условия для охрупчивания металла труб в этих локальных областях [4, с. 133].

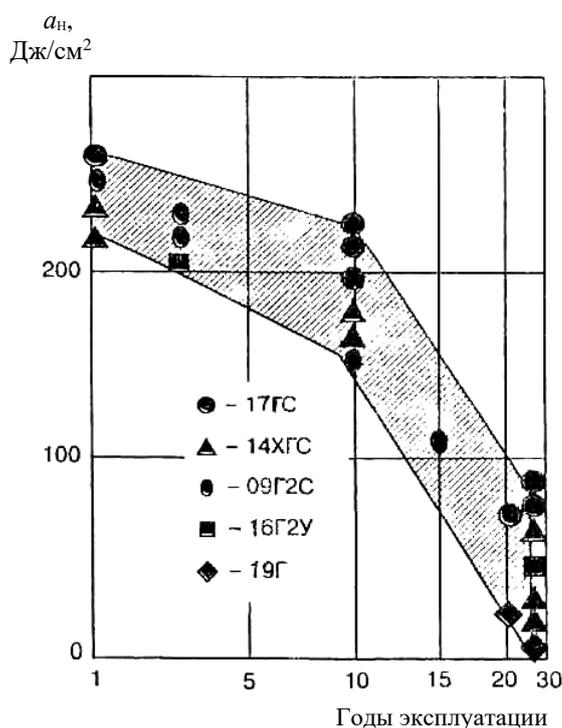
Если обобщить результаты многочисленных исследований по вопросу изменения структуры и свойств металла магистральных трубопроводов [3 – 5; 11 – 13 и др.], можно констатировать, что при длительных сроках эксплуатации (более 20 – 30 лет) происходит некоторое повышение прочностных свойств, снижение пластических свойств и коррозионной стойкости, а самое главное – смещение температуры вязко-хрупкого перехода в область положительных температур и значительное снижение ударной вязкости.

Качественные зависимости указанного снижения практически одинаковы для основных отечественных трубных сталей (стали 17ГС, 14ХГС, 09Г2С, 16Г2У, 19Г): через 30 лет эксплуатации ударная вязкость снижается в 3 – 5 раз. Так, например, для стали 17ГС – основной стали для большинства магистральных трубопроводов – наблюдается снижение с 260 до 80 – 90 Дж/см<sup>2</sup> (рисунок).

Из-за значительного снижения уровня ударной вязкости увеличивается потенциальная возможность возникновения и роста трещин, а следовательно, возрастает вероятность аварийного разрушения.

Это свидетельствует о необходимости периодического контроля и в случаях необходимости ремонта участков длительно эксплуатируемого магистрального трубопровода с недопустимо низкими значениями ударной вязкости, особенно кольцевых сварных соединений, отказы которых служат причиной множества аварий [16]. Таким образом, четко прослеживается взаимосвязь ударной вязкости с надежностью и безопасностью эксплуатации магистральных трубопроводов и очевидность разработки мероприятий по ее повышению, что весьма актуально (как показано выше) для всей системы магистральных трубопроводов с учетом их длительной эксплуатации.

Данные обстоятельства послужили предпосылкой для разработки эффективных мер по повышению надежности кольцевых сварных соединений длительно эксплуатируемых трубопроводов (в первую очередь за счет повышения ударной вязкости металла), а также неразрушающих методов оценки фактического состояния металла, его механических свойств и структуры с целью повышения надежности функционирования и продления ресурса безопасной эксплуатации всей трубопроводной системы.



Изменение ударной вязкости трубных сталей при эксплуатации газопроводов

Источник: [12].

В результате проведенных исследований определен режим восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, эксплуатируемых в течение длительного времени, приводящий к росту значений ударной вязкости до 50 % [17].

Также в связи с преобладанием на длительно эксплуатируемых трубопроводах повреждений коррозионного типа и снижения коррозионной стойкости металла труб до 7 % [13] проведены исследования влияния восстановительной термической обработки (по предложенному режиму) на изменение коррозионной стойкости металла кольцевых сварных соединений. В результате проведенных исследований выявлено, что термическая обработка на оптимальных режимах приводит к снижению скорости коррозии металла сварного соединения до 3,3 % [17].

При применении восстановительной термической обработки возникает проблема оценки эффективности восстановительной термической обработки. Судить об эффективности выполненной восстановительной термической обработки кольцевых сварных стыков магистральных трубопроводов только по результатам замера твердости переносными твердомерами (по показателю ее снижения) не совсем правильно, так как величина твердости связана с прочностью (а точнее сказать, лишь с временным сопротивлением) и не дает информации об изменении ударной вязкости. Вырезка образцов из стыков трубопроводов после термической обработки и оценка механических свойств на образцах, изготовленных из вырезки, вызывает необходимость последующего ремонта (заварки) места вырезки, оказывает

влияние на механические и эксплуатационные свойства области ремонта и прилегающих зон, что также нецелесообразно.

В результате экспериментальных исследований установлена зависимость между параметрами пирамидального отпечатка, полученного при определении твердости по Виккерсу стационарными или переносными твердомерами, и значениями ударной вязкости сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных трубных сталей (Сталь 20, 17ГС, 10Г2С1, 14ГН, 19Г, 14ХГС). Полученная зависимость может быть использована в основе неразрушающего способа определения механических характеристик (и в первую очередь ударной вязкости) расчетным путем при диагностировании технического состояния магистральных трубопроводов и контроле эффективности проводимой восстановительной термической обработки с погрешностью результата не более 13,1 % [17].

Экономическая оценка эффективности внедрения разработанного метода восстановительной термической обработки проводилась на основании сравнения двух возможных вариантов: 1 – затрат на производство ремонтных работ сварного соединения методом вырезки катушки и 2 – затрат на восстановление свойств сварного соединения с помощью восстановительной термической обработки. В зависимости от диаметра трубопровода и способа проведения работ по восстановительной термической обработке (собственными силами или силами подрядной организации) ожидаемый экономический эффект от внедрения способа в ценах июля 2011 года может составить от 0,28 до 3,2 миллионов белорусских рублей на один восстановленный стык [18].

Таким образом, предлагаемый способ повышения эксплуатационной надежности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, отработавших длительное время, путем проведения восстановительной термической обработки показывает потенциальную технико-экономическую эффективность своего применения и может быть внедрен в практику производства ремонтных работ.

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

- критерием, определяющим надежность длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов, является ударная вязкость металла кольцевых сварных соединений в связи с высокой долей их отказов вследствие развития хрупкого разрушения и недостаточной трещиностойкости металла кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов;

- решена задача повышения надежности эксплуатации магистральных трубопроводов, выработавших нормативный срок службы, за счет восстановления механических свойств кольцевых сварных соединений (в первую очередь ударной вязкости) восстановительной термической обработкой на основании применения оригинального способа неразрушающего контроля (определение ударной вязкости по параметрам отпечатка пирамидального индентора). Решение данной задачи позволяет снизить вероятность возникновения хрупкого разрушения, отказаться от преждевременной замены выработавших свой ресурс по критерию ударной вязкости кольцевых сварных соединений и тем самым сэкономить за счет продления срока эксплуатации денежные средства в размере до 3,2 млн. рублей на один восстановленный стык.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85. – Введ. 01.01.86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 50 с.
2. ANSI/ASME B31G-2009 / Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines / Battelle Memorial Inst. // ASME, New York.
3. Харионовский, В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов / В.В. Харионовский. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. – 467 с.
4. Дефектность труб нефтепроводов и методы их ремонта / А.Г. Гумеров [и др.], под ред. А.Г. Гумерова. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1998. – 252 с.
5. Черняев, К.В. Научно-технические проблемы обеспечения высокой надежности трубопроводного транспорта нефти на современном этапе / К.В. Черняев // Трубопроводный транспорт нефти. – 1997. – № 9. – С. 40 – 42.
6. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения: моногр. / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
7. Шарнина, Г.С. Определение остаточного ресурса нефтепроводов с дефектами на основе анализа режима нагружения и принципа линейного накопления дефектов / Г.С. Шарнина, В.А. Буренин, С.К. Рафиков // Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ: сб. науч. тр.; ред. кол.: А.Г. Гумеров [и др.]. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С. 210 – 217.
8. Сосновский, Л.А. Живучесть линейной части нефтепровода / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, А.М. Бордовский. – Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 2004. – 112 с.

9. Воробьев, В.В. Особенности эксплуатационной надежности и повреждения линейных участков нефтепровода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / В.В. Воробьев; БелГУТ. – Гомель, 2002. – 20 с.
10. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений: ОСТ 153-39.4-010-2002. – М., 2002. – 58 с.
11. Современные испытания на ударный изгиб и их роль в оценке трещиностойкости магистральных трубопроводов / П.П. Пётух [и др.]. // Вести Нац. акад. наук Беларуси. – 2003. – № 2. – С. 38 – 42.
12. Иванцов, О.М. Надежность и безопасность магистральных трубопроводов России / О.М. Иванцов // Трубопроводный транспорт. – 1997. – № 10. – С. 26 – 31.
13. Гумерова, Л.Р. Совершенствование методов снижения аварийности длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Л.Р. Гумерова; ГУП «ИПТЭР». – Уфа, 2012. – 27 с.
14. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах: ГОСТ 9454. – Введ. 01.01.79. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 15 с.
15. Айнабеков, А.И. Исследование зависимости между трещиностойкостью и ударной вязкостью конструкционных трубных сталей / А.И. Айнабеков, У.С. Сулейменов, А.А. Джумабаев // Хабаршысы Вестник. – 2009. – № 3(58). – С. 140 – 143.
16. Липский, В.К. Методика восстановительной термической обработки магистральных трубопроводов, основанная на неразрушающей оценке фактического уровня механических свойств металла / В.К. Липский, А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2006. – № 12. – С. 93 – 96.
17. Янушонок, А.Н. Способ повышения надежности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов при длительной эксплуатации / А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 95 – 103.
18. Янушонок, А.Н. Оценка экономической эффективности восстановительной термической обработки сварных кольцевых соединений магистральных трубопроводов, проработавших длительное время / А.Н. Янушонок, В.Н. Стахейко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Д. Экономические и юридические науки. – 2012. – № 6. – С. 95 – 102.

Поступила 05.12.2013

## ENSURING THE RELIABILITY OF MAIN PIPELINES WHICH ARE IN LONG-TERM OPERATION

A. YANUSHONOK, A. SNARSKIY

*Republic of Belarus has a developed network of main pipelines. Lifetime of the most operated main pipelines in Belarus exceeds design resource. A characteristic feature of the effects of aging is the reduction of pipe steels toughness metal defining resistance to brittle fracture. The article presents the basic criteria of reliability of main pipelines. The problems of improving the reliability of main pipelines, which have worked for a long time, by the reduction of heat treatment of circular welded joints on the basis of non-destructive inspection method are investigated.*

## ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.063

### СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАВНОТОЧНЫХ НИВЕЛИРНЫХ СЕТЕЙ, УРАВНЕННЫХ ПО МЕТОДУ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

*А.Ю. БУДО, д-р техн. наук, проф. В.И. МИЦКЕВИЧ, Д.В. УСОВ, О.О. УСОВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Показано, что после уравнивания равноточной нивелирной сети методами многокритериальной оптимизации точность высотного положения в слабом месте сети останется близкой и независимой от номера варианта при генерации ошибок измерений. Это установлено по 10 вариантам выборок, полученных датчиком псевдослучайных чисел при заданном стандарте измерений. Обработка равноточных нивелирных сетей по программному комплексу «Россия – Беларусь» показала, что точность высотного положения сети в слабом месте после многокритериального уравнивания по программе BUDO.exe оказалась меньше исходного стандарта измерений в 3 раза. Однако многокритериальное уравнивание преобразует равноточную нивелирную сеть в квазиравноточное построение. Делается вывод о целесообразности применения равноточных нивелирных сетей при геодезических работах на уникальных инженерных сооружениях, например, на атомных электростанциях.*

**Введение.** Программный комплекс «Россия – Беларусь» разработан в период июнь – сентябрь 2012 года для решения произвольных систем линейных уравнений на персональных компьютерах. Столь короткий промежуток времени для создания комплекса объясняется большой предшествующей подготовительной научно-исследовательской работой (2001 – 2010 гг.). Помог также опыт программирования, приобретенный В.И. Мицкевичем в период 1976 – 1981 годов при создании «Комплексной программы по математической обработке геодезических сетей», внедренной начиная с 1979 года во всех предприятиях Главного управления геодезии и картографии при Совете Министров СССР.

Отличительными особенностями нового программного комплекса «Россия – Беларусь» по сравнению с другими известными программами по решению систем линейных параметрических уравнений (Matlab и Excel) являются:

- 1) возможность решения любых систем уравнений (даже вырожденных) с оценкой точности конечных результатов [1];
- 2) решение систем с целью подстраховки пятью различными независимыми программами [2];
- 3) использование при решении вырожденных или обычных систем уравнений одних и тех же программ с выработкой предупреждающего сигнала в случае некорректности задачи [3];
- 4) осуществление многокритериального уравнивания ведётся тремя разными программами [4];
- 5) предусмотрена многокритериальная оптимизация при обобщенном уравнивании с использованием полной корреляционной матрицы [5];
- 6) поиск грубых ошибок в информации об измерениях из решения переопределенных систем линейных параметрических уравнений.

Основное преимущество программного комплекса – многократное повышение точности конечных результатов по сравнению с методом наименьших квадратов (МНК) при небольшом дополнительном увеличении времени вычислений [6].

Экспериментально установлено, что программы многокритериального решения систем уравнений дают лучшие по сравнению с МНК результаты с повышением точности решения в 2 – 3 раза.

Рассмотрим, насколько эффективен программный комплекс «Россия – Беларусь» при уравнивании равноточных нивелирных геодезических сетей.

**Основная часть.** Равноточные нивелирные сети, разработанные в Полоцком государственном университете в 2009 году, отвечают следующим четырём требованиям к их построению:

- они должны быть замкнутыми;
- стандарты превышений – одинаковыми;
- исходные пункты отсутствуют;
- количество примыкающих к пунктам превышений – неизменно на всех пунктах нивелирного построения.

Если такие сети уравнивать по методу наименьших квадратов, ошибки высотного положения на пунктах сети будут одинаковыми, и при равном количестве реперов и превышений точность сети в 1,1 – 1,3 раза будет выше по сравнению с неравноточной сетью.

Применим многокритериальное уравнивание для оценки точности следующих равноточных и неравноточных нивелирных сетей [7; 8].

**Пример 1**

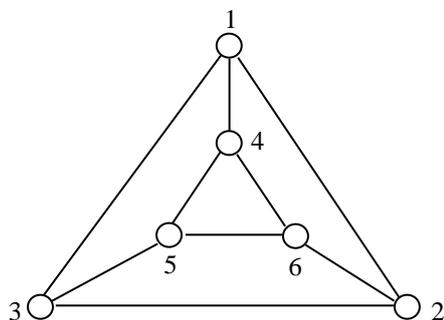


Рис. 1. Равноточная сеть

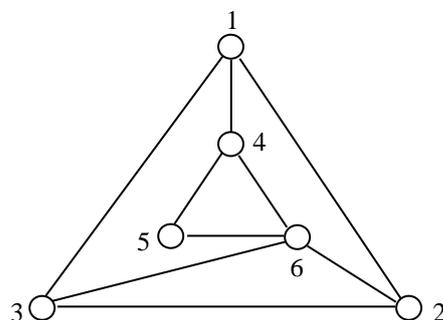


Рис. 2. Неравноточная сеть

**Пример 2**

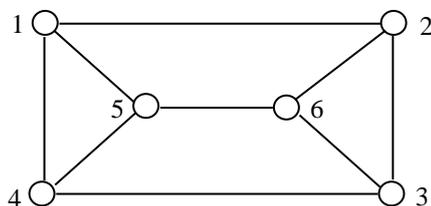


Рис. 3. Равноточная сеть

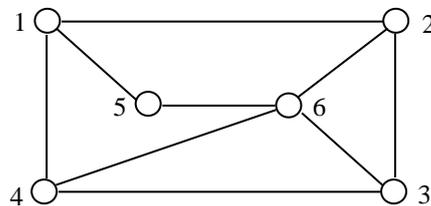


Рис. 4. Неравноточная сеть

**Пример 3**

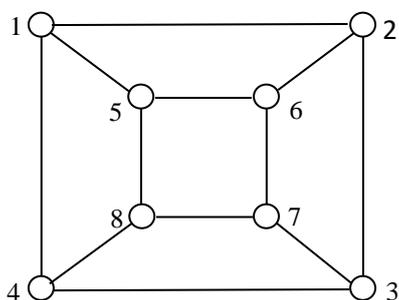


Рис. 5. Равноточная сеть

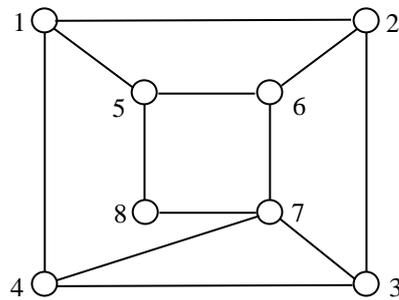


Рис. 6. Неравноточная сеть

Матрицы коэффициентов параметрических уравнений поправок для трёх примеров равноточных нивелирных сетей

**Пример 1**

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

## Пример 2

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

## Пример 3

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Таблица 1

Результаты уравнивания измерений, сгенерированных по программе PROVOROV, с дальнейшим использованием программ GAUSS1, TIXONOV2 и BUDO [2] для примера 1 при  $\sigma = 5$  мм

Номер варианта генерации ошибок измерений	Программа GAUSS1		TIXONOV2	BUDO
	равноточная сеть	неравноточная сеть	равноточная сеть	равноточная сеть
	M, мм	max M, мм	max M, мм	max M, мм
1	2	3	4	5
1	2,5	2,6	2,5	1,7
2	4,2	4,3	4,4	1,8
3	2,1	2,2	2,1	0,6
4	3,4	3,5	3,5	1,3
5	3,4	3,4	3,6	1,7
6	1,6	1,2	1,7	0,9
7	3,6	3,7	3,7	1,3
8	2,6	2,8	2,7	1,3
9	4,0	4,2	4,1	1,6
10	2,2	2,4	2,3	1,4

Таблица 2

Результаты уравнивания измерений, сгенерированных по программе PROVOROV, с дальнейшим использованием программ GAUSS1, TIXONOV2 и BUDO для примера 2 при  $\sigma = 5$  мм

Номер варианта генерации ошибок измерений	Программа GAUSS1		TIXONOV2	BUDO
	равноточная сеть	неравноточная сеть	равноточная сеть	равноточная сеть
	М, мм	max М, мм	max М, мм	max М, мм
1	2	3	4	5
1	2,5	3,0	2,6	1,4
2	2,6	3,3	2,7	1,6
3	1,5	1,9	1,6	0,6
4	2,6	2,9	2,6	1,1
5	3,4	4,2	3,6	1,4
6	1,1	1,0	1,1	0,8
7	3,7	4,4	3,8	1,3
8	2,1	2,6	2,2	1,1
9	3,2	2,8	3,3	1,4
10	1,6	1,8	1,6	1,2

Таблица 3

Результаты уравнивания измерений, сгенерированных по программе PROVOROV, с дальнейшим использованием программ GAUSS1, TIXONOV2 и BUDO для примера 3 при  $\sigma = 5$  мм

Номер варианта генерации ошибок измерений	Программа GAUSS1		TIXONOV2	BUDO
	равноточная сеть	неравноточная сеть	равноточная сеть	равноточная сеть
	М, мм	max М, мм	max М, мм	max М, мм
1	2	3	4	5
1	2,6	3,2	2,7	1,7
2	2,2	2,3	2,2	1,8
3	2,1	2,5	2,2	0,7
4	3,1	4,0	3,1	1,4
5	3,4	3,9	3,4	1,5
6	2,3	2,7	2,3	0,9
7	3,8	4,6	3,9	1,2
8	2,3	2,3	2,3	1,2
9	2,8	3,4	2,8	1,5
10	2,3	2,8	2,3	1,2

По результатам вычислений можно сделать следующие **выводы**:

- 1) по ошибкам высотного положения пунктов нивелирования (см. числа в колонках 2, 3 таблиц 1 – 3) видно, что равноточные сети, как правило, в 1,2 раза точнее неравноточных;
- 2) сравнивая колонки 2 и 5 во всех трёх таблицах, определяем, что многокритериальный метод, реализованный в программе BUDO.exe, гарантированно приводит к значительному повышению точности результатов, в отличие от МНК;
- 3) даже при малом количестве измерений многокритериальный метод в 1,5 – 3,0 раза эффективнее МНК (см. колонки 4 и 5 в трёх таблицах) в каждом из 10 вариантов эксперимента;
- 4) результаты диссертационной работы [9] могли быть использованы в атомной энергетике, создавая надёжные и точные нивелирные сети для мониторинга за осадками инженерных сооружений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сырова, Н.С. Оценка точности нуль-свободных геодезических сетей различными способами / Н.С. Сырова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 122 – 125.

2. Решение примера академика А.Н. Тихонова по обработке нивелирных сетей по программному комплексу «Россия – Беларусь» методом исключения строк из матрицы коэффициентов параметрических уравнений поправок / В.И. Мицкевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 126 – 131.
3. Мицкевич, В.И. Обработка антирядов измерений одной величины при разных значениях количества неизвестных и разных характеристиках точности измерений с помощью программного комплекса «Россия – Беларусь» / В.И. Мицкевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 109 – 113.
4. Субботенко, П.В. Развитие многокритериального способа уравнивания / П.В. Субботенко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 90 – 94.
5. Будо, А.Ю. О применении обобщенных нетрадиционных методов уравнивания / А.Ю. Будо // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 136 – 141.
6. Мицкевич, В.И. Альтернативные методы проектирования и уравнивания геодезических сетей / В.И. Мицкевич, А.Ю. Будо, Е.В. Грищенко. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 280 с.
7. Усов, Д.В. Методика построения равнооточных нуль-свободных нивелирных и спутниковых геодезических сетей / Д.В. Усов, О.О. Усова // Земля Беларуси. – 2009. – № 1. – С. 38 – 40.
8. Усов, Д.В. Равнооточные геодезические нивелирные сети и их применение на геодезическом производстве / Д.В. Усов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 126 – 128.
9. Усов, Д.В. Повышение эффективности математической обработки результатов геодезического мониторинга осадок уникальных инженерных сооружений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Д.В. Усов. – Новополоцк, 2010. – 20 с.

Поступила 14.11.2013

**COMPARISON OF THE ACCURACY CHARACTERISTICS  
OF THE UNIFORMLY PRECISE LEVELLING GRID EQUALIZED  
BY THE METHOD OF THE LEAST SQUARES AND MULTICRITERIA METHODS**

**A. BUDO, V. MITSKEVICH, D. USOV, O. USOVA**

*It is shown that after adjustment of the uniformly precise leveling grid by the methods of multicriteria optimization the accuracy of altitude position in a weak place in the network remains close and independent of the version number when generating measurement errors. This conclusion is based on 10 options samples obtained with pseudorandom numbers sensor with a given standard of measurement. Processing of the uniformly precise leveling networks with the software complex "Russia – Belarus" has shown that the accuracy of the altitude position in a weak network after multicriteria adjustment under the software BUDO.exe was 3 times smaller than the original standard measurement. However multicriteria adjustment converts uniformly precise leveling network into quazi-uniformly precise formation. The conclusion about the appropriateness of uniformly precise geodetic leveling networks at work at a number of engineering structures, such as nuclear power plants.*

УДК 528.48

**АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИСТЕМ КООРДИНАТ  
МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ****д-р техн. наук, проф. В.П. ПОДШИВАЛОВ,  
В.А. КУЗЬМИЧ****(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

*В практике маркшейдерско-геодезического обеспечения предприятий горнодобывающей промышленности не всегда известны параметры связи различных систем координат. В данной работе представлены результаты применения метода наименьших квадратов для преобразования систем координат. Рассмотрено различное количество связующих пунктов, различное положение этих пунктов на координатной плоскости. Проанализированы разнообразные случаи вычисления предварительных значений параметров преобразования в зависимости от положения пар точек относительно друг друга и остальных пунктов. Алгоритм вычислений реализован на примерах, характеризующих рассматриваемые варианты. Результаты исследования представлены в виде таблиц. Приведена точность преобразований. Представлены предварительные выводы по применению метода наименьших квадратов для осуществления связи между системами координат.*

**Введение.** Преобразование систем координат является важным вопросом в горнодобывающем производстве. При создании маркшейдерско-геодезического обоснования необходимо привязываться к пунктам государственной геодезической сети (ГГС). Это необходимо для того, чтобы получить возможность вести с заданной точностью предстоящие маркшейдерско-геодезические работы в системе координат и отметок исходных опорных пунктов, а также осуществлять контроль и выдерживать необходимую точность выполняемых геодезических работ. От точности преобразованных координат пунктов зависит точность и, соответственно, правильность пространственного расположения построений на основе натуральных измерений.

Зачастую необходимо осуществлять связь между различными системами координат, описывающих пункты и реперы государственных, местных и разбивочных сетей.

В процессе строительства и деформации земной поверхности от ведения горных работ происходит утрата части знаков, следовательно, необходимо выполнять дополнительные работы по восстановлению маркшейдерско-геодезического обоснования.

Одним из наиболее широко применимых методов слежения за сохранностью пунктов является мониторинг их пространственного положения от стабильных пунктов Государственной геодезической сети (ГГС), который требует решать задачу связи систем координат, а также анализировать значимость имеющих место изменений пространственного положения центров пунктов маркшейдерско-геодезического обоснования.

Для решения данных задач предлагаем применение метода наименьших квадратов, так как он дает как количественные вероятнейшие значения, так и их интервальные оценки.

Исследования проведены с целью выработки рекомендации по практическому применению метода наименьших квадратов для осуществления связи между различными системами координат, что в свою очередь расширяет возможность практического использования современных технологий маркшейдерско-геодезического обеспечения для модернизации и поддержания на высоком техническом уровне маркшейдерско-геодезических работ горнодобывающей отрасли.

**Ход работы и результаты**

В основу анализа данных взята работа [1]. Координаты точек некоторой системы  $O'X'Y'$  преобразовывались в другую систему  $OXY$ . Для объективной оценки эффективности алгоритма преобразования систем координат исследования проводились на моделях, когда известны истинные значения координат и параметры связи. В ходе исследования произведен анализ влияния расположения пунктов, их число, расположение связующих точек на параметры преобразования и их точность. Рассмотрено разное количество пунктов в системе (8 пунктов, 16 пунктов и 50 пунктов), а также различное положение связующих точек относительно этих пунктов (табл. 1).

Все вычисления производились в программе Excel, фрагменты исходных данных и алгоритм преобразований представлены в таблицах 2 – 9.

Таблица 1

Расположение пунктов (обозначены мелкими точками) и связующих точек (обозначены крупными точками) относительно их в системе *OXY*

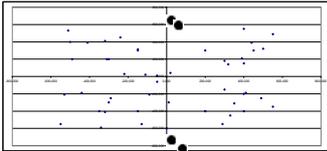
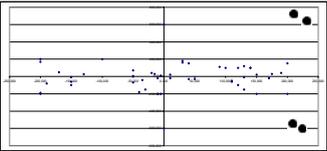
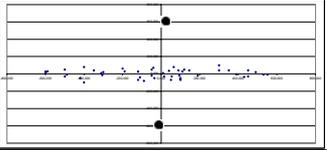
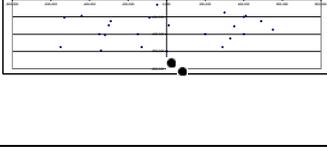
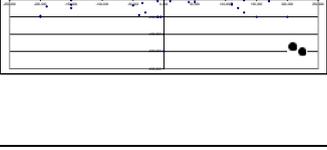
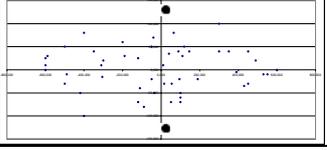
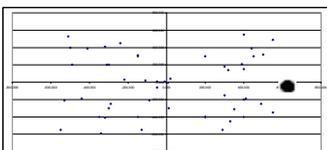
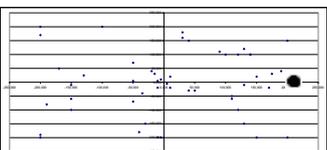
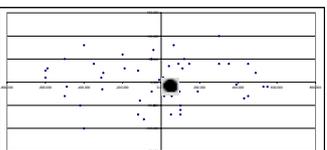
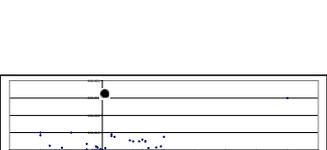
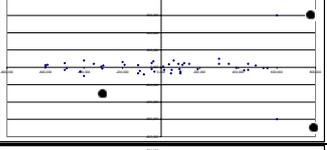
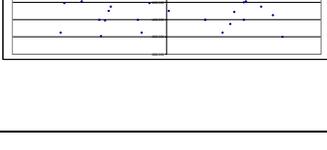
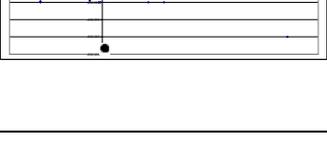
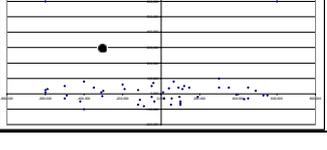
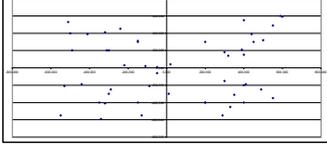
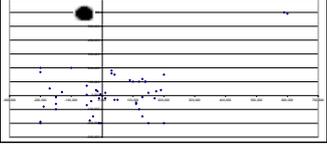
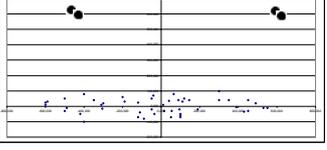
Варианты расположения связующих точек		Варианты расположения пунктов		
		рассредоточенное	сосредоточенное вдоль одной оси	сгруппированное
		1	2	3
далеко относительно друг друга, внутри относительно пунктов	а-1			
	а-2			
близко относительно друг друга, внутри относительно пунктов	б			
далеко относительно друг друга, снаружи относительно пунктов	в-1			
	в-2			
близко относительно друг друга, снаружи относительно пунктов	г			

Таблица 11

Ошибки приближенных и вероятнейших значений параметров преобразования

Расположе- ние пунктов	Расположе- ние связующих точек	Ошибки параметров преобразования											
		8 пунктов				16 пунктов				50 пунктов			
		$\Delta a, м$	$\Delta b, м$	$\Delta \alpha$	$\Delta t$	$\Delta a, м$	$\Delta b, м$	$\Delta \alpha$	$\Delta t$	$\Delta a, м$	$\Delta b, м$	$\Delta \alpha$	$\Delta t$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	а	До обработки				До обработки				До обработки			
		0,003	0,012	0°02'16"	0,00042 1	0,003	0,012	0°02'16"	0,00042 1	0,191	0,07 7	0°00'28"	0,00025 9
		После обработки				После обработки				После обработки			
		0,024	0,001	0°00'44"	0,00001 7	0,037	0,013	0°02'10"	0,00004 2	0,005	0,00 6	0°00'07"	0,00009 4
	б	До обработки				До обработки				До обработки			
		0,049	0,107	2°40'20"	0,02201 3	0,049	0,107	2°40'20"	0,02201 3	0,185	0,12 5	0°05'15"	0,00231 3
		После обработки				После обработки				После обработки			
		0,000	0,007	0°03'35"	0,00088 4	2,800	0,720	2°33'54"	0,00093 4	0,005	0,00 5	0°00'00"	0,00010 3
	в	До обработки				До обработки				До обработки			
		0,251	0,451	0°02'16"	0,00084 2	0,251	0,451	0°02'16"	0,00084 2	0,347	0,00 3	0°00'28"	0,00025 9
		После обработки				После обработки				После обработки			
		0,022	0,026	0°00'34"	0,00001 5	0,039	0,035	0°02'09"	0,00003 5	0,006	0,00 4	0°00'05"	0,00007 1
г	До обработки				До обработки				До обработки				
	30,22 6	46,89 8	3°39'18"	0,01628 8	30,22 6	46,89 8	3°39'18"	0,01628 8	18,71 0	9,44 0	0°06'20"	0,00775 9	
	После обработки				После обработки				После обработки				
	0,018	0,020	0°03'41"	0,00191 8	0,971	3,289	3°27'06"	0,00193 1	0,005	0,00 2	0°00'27"	0,00022 6	
2	а	До обработки				До обработки				До обработки			
		0,003	0,012	0°02'16"	0,00042 1	0,003	0,012	0°02'16"	0,00042 1	0,191	0,07 7	0°00'28"	0,00025 9
		После обработки				После обработки				После обработки			
		0,013	0,008	0°02'11"	0,00021 0	0,002	0,010	0°02'15"	0,00023 7	0,004	0,00 1	0°00'35"	0,00003 7
	б	До обработки				До обработки				До обработки			
		0,049	0,107	2°40'20"	0,02201 3	0,049	0,107	2°40'20"	0,02201 3	0,185	0,12 5	0°05'15"	0,00231 3
		После обработки				После обработки				После обработки			
		0,010	0,005	0°05'32"	1,02201 3	0,357	0,427	2°29'36"	0,00107 1	0,003	0,00 0	0°00'57"	0,00027 2
	в	До обработки				До обработки				До обработки			
		0,251	0,451	0°02'16"	0,00084 2	0,251	0,451	0°02'16"	0,00084 2	0,347	0,00 3	0°00'28"	0,00025 9
		После обработки				После обработки				После обработки			
		0,009	0,072	0°01'26"	0,00013 5	0,011	0,055	0°02'07"	0,00016 6	0,001	0,00 0	0°00'19"	0,00005 4
г	До обработки				До обработки				До обработки				
	30,22 6	46,89 8	3°39'18"	0,01628 8	30,22 6	46,89 8	3°39'18"	0,01628 8	18,71 0	9,44 0	0°06'20"	0,00775 9	
	После обработки				После обработки				После обработки				
	0,005	0,040	0°04'08"	0,00196 5	3,697	4,130	2°59'29"	0,00203 4	0,007	0,00 0	0°00'04"	0,00043 8	

Окончание таблицы 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3	а-1	До обработки				До обработки				До обработки			
		0,003	0,012	0°02'16"	0,000421	0,003	0,012	0°02'16"	0,000421	0,191	0,077	0°00'28"	0,000259
		После обработки				После обработки				После обработки			
		0,010	0,004	0°01'36"	0,000123	0,002	0,005	0°01'15"	0,000062	0,000	0,005	0°00'16"	0,000103
		До обработки				До обработки				До обработки			
		0,003	0,012	0°01'27"	0,001316	0,003	0,012	0°01'27"	0,000658	0,191	0,077	0°00'53"	0,000134
	После обработки				После обработки				После обработки				
	0,015	0,012	0°00'11"	0,000238	0,000	0,000	0°00'12"	0,000129	0,000	0,006	0°00'26"	0,000088	
	До обработки				До обработки				До обработки				
	0,049	0,107	2°40'20"	0,022013	0,049	0,107	2°40'20"	0,022013	0,185	0,125	0°05'15"	0,002313	
	После обработки				После обработки				После обработки				
	0,001	0,002	0°04'29"	0,000915	0,005	0,008	0°15'17"	0,000923	0,001	0,007	0°00'13"	0,000106	
	До обработки				До обработки				До обработки				
	0,251	0,451	0°02'16"	0,000842	0,251	0,451	0°02'16"	0,000842	0,347	0,003	0°00'28"	0,000259	
	После обработки				После обработки				После обработки				
	0,004	0,050	0°01'08"	0,000085	0,006	0,018	0°01'00"	0,000051	0,003	0,003	0°00'11"	0,000056	
	До обработки				До обработки				До обработки				
	0,251	0,606	0°01'27"	0,001317	0,251	0,406	0°01'27"	0,000658	0,347	0,003	0°00'54"	0,000134	
	После обработки				После обработки				После обработки				
	0,041	0,048	0°00'53"	0,000292	0,024	0,012	0°00'50"	0,000192	0,000	0,005	0°00'19"	0,000032	
	До обработки				До обработки				До обработки				
	30,226	46,898	3°39'18"	0,016288	30,226	46,898	3°39'18"	0,016288	18,710	9,440	0°06'20"	0,007759	
	После обработки				После обработки				После обработки				
	0,003	0,035	0°04'02"	0,001959	0,031	0,026	0°14'59"	0,001981	0,000	0,005	0°00'17"	1,007759	

Таблица 12

## Точность вычисления параметров перехода

Рассматриваемые случаи		Точность параметров перехода											
		8 пунктов				16 пунктов				50 пунктов			
		$\sigma_\alpha$	$\sigma_m$	$\sigma_a$	$\sigma_b$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_m$	$\sigma_a$	$\sigma_b$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_m$	$\sigma_a$	$\sigma_b$
1	а	0,000186	0,000186	0,104	0,104	0,000040	0,000166	0,082	0,082	0,000075	0,000075	0,037	0,037
	б	0,007407	0,007570	3,604	3,604	0,001723	0,008693	3,869	3,903	0,000078	0,000075	0,037	0,037
	в	0,000176	0,000176	0,112	0,112	0,000042	0,000162	0,087	0,087	0,000074	0,000074	0,037	0,037
	г	0,013425	0,013644	8,668	8,668	0,003140	0,013408	7,222	7,190	0,000073	0,000074	0,037	0,037
2	а	0,000234	0,000234	0,086	0,086	0,000084	0,000222	0,061	0,064	0,000185	0,000185	0,038	0,038
	б	0,002294	0,002345	0,494	0,494	0,001928	0,007484	1,462	1,461	0,000228	0,000228	0,038	0,038
	в	0,000228	0,000228	0,108	0,108	0,000091	0,000205	0,073	0,072	0,000161	0,000161	0,038	0,038
	г	0,012442	0,012645	5,950	5,950	0,005303	0,012523	4,385	4,366	0,000160	0,000161	0,038	0,038
3	а-1	0,000213	0,000213	0,092	0,092	0,000171	0,000171	0,068	0,068	0,000111	0,000111	0,037	0,037
	а-2	0,000243	0,000242	0,105	0,105	0,000185	0,000185	0,074	0,074	0,000111	0,000111	0,037	0,037
	б	0,002405	0,002458	0,768	0,768	0,001081	0,001108	0,374	0,374	0,000119	0,000119	0,037	0,037
	в-1	0,000202	0,000202	0,107	0,107	0,000160	0,000160	0,072	0,072	0,000105	0,000105	0,037	0,037
	в-2	0,000194	0,000194	0,102	0,102	0,000158	0,000158	0,072	0,072	0,000105	0,000105	0,038	0,038
	г	0,011224	0,011407	5,979	5,979	0,006000	0,006110	2,750	2,750	0,000105	0,000105	0,038	0,038

Взяты истинные значения координат в системе  $OXY$  и параметров преобразования (табл. 2, 3); вычислены точные значения координат данных пунктов в системе  $O'X'Y'$  (табл. 4); с помощью генератора случайных чисел искажали эти значения (табл. 5).

Далее находили приближенные значения параметров преобразования по двум связующим точкам (так как неизвестных всего четыре:  $\alpha$  – угол разворота систем координат  $O'X'Y'$  и  $OXY$ ;  $a$  и  $b$  – координаты центра системы  $O'X'Y'$  в системе  $OXY$ ;  $m$  – масштаб преобразования) (табл. 6, 7).

Таблица 2

## Точные значения связующих пунктов

Координаты	Номера связующих пунктов и значения их координат									
	1	2	3	4	...	46	47	48	49	50
$x$	100,000	10,000	20,000	40,000	...	60,000	175,000	200,000	30,000	-20,000
$y$	200,000	30,000	60,000	80,000	...	26,000	300,000	40,000	20,000	-30,000

Таблица 3

## Точные значения параметров преобразования

$\alpha$	$a$	$b$	$m$
0,003489	1000,000	1500,000	1,000000

Таблица 4

Точные значения координат связующих пунктов в системе  $O'X'Y'$ 

Координаты	Номера связующих пунктов и значения их координат									
	1	2	3	4	...	46	47	48	49	50
$x$	1099,302	1009,895	1019,791	1039,721	...	1059,909	1173,952	1199,859	1029,930	980,105
$y$	1700,348	1530,035	1560,069	1580,139	...	1526,209	1800,609	1540,698	1520,105	1469,930

Таблица 5

Искаженные значения координат связующих пунктов в системе  $O'X'Y'$ 

Координаты	Номера связующих пунктов и значения их координат									
	1	2	3	4	...	46	47	48	49	50
$x$	1099,069	1010,157	1019,632	1039,924	...	1059,553	1174,070	1200,044	1029,736	979,749
$y$	1700,722	1529,637	1559,676	1580,207	...	1525,310	1800,524	1541,094	1519,711	1470,115

Таблица 6

Координаты двух связующих точек, относительно которых вычисляются приближенные значения параметров преобразования

Координаты	Номера связующих пунктов и значения координат	
	30	19
$x$	300,000	-200,000
$y$	150,000	-100,000
$x'$	1299,134	800,296
$y'$	1650,738	1399,071

Таблица 7

Приближенные значения параметров преобразования

$\alpha_0$	$a_0$	$b_0$	$m_0$
0,003600	999,831	1499,737	0,999481

Далее находили вероятнейшие значения параметров преобразования систем координат (табл. 8).

Таблица 8

Вероятнейшие значения параметров преобразования

$\alpha$	$a$	$b$	$m$
0,003530	1000,007	1500,004	0,999824

Затем вычисляли вероятнейшие поправки в координаты системы  $OXY$  (табл. 9).После введения этих поправок в искаженные значения координат в системе  $O'X'Y'$  получали вероятнейшие значения координат в системе  $O'X'Y'$  (табл. 10).

Таблица 9

Вероятнейшие поправки в координаты связующих пунктов

Номера пунктов	Поправки в координаты	
	$\Delta x_i$	$\Delta y_i$
1	0,213	-0,401
2	-0,257	0,397
3	0,159	0,388
4	-0,207	-0,077
5	0,146	-0,344
...		
45	0,401	-0,388
46	0,351	0,401
47	-0,154	0,043
48	-0,215	-0,391
49	0,195	0,395
50	0,367	-0,177

Таблица 10

Вероятнейшие значения координат связующих пунктов в системе ОХУ

Координаты	Номера связующих пунктов и значения их координат									
	1	2	3	4	...	46	47	48	49	50
$x$	1099,283	1009,899	1019,792	1039,717	...	1059,904	1173,916	1199,829	1029,931	980,116
$y$	1700,320	1530,034	1560,064	1580,130	...	1526,211	1800,567	1540,702	1520,106	1469,939

В заключение производили сравнение вычисленных приближенных и вероятнейших значений параметров преобразования и координат пунктов с точными.

Результаты исследования представлены в таблице 11.

Отклонение вероятнейших значений от истинных показывает, насколько эффективен метод при различных условиях. В таблице 12 показана точность вычисленных значений параметров связи.

В заключение проведенного исследования по применению алгоритма преобразования систем координат по методу наименьших квадратов можно сделать следующие **выводы**:

- применялся модельный способ, что позволяет объективно оценить отклонение вероятнейших значений исследуемых величин от их истинных значений;
- во всех случаях, рассмотренных в данной работе, имеет место эффект математической обработки по методу наименьших квадратов. Искаженные значения параметров преобразования и координат пунктов значительно приближаются к истинным;
- наибольший эффект заметен, когда имеется достаточно большое количество пунктов с известными координатами. Эти пункты должны быть сгруппированы как можно ближе друг к другу (хотя бы по одной из координат ( $x$  или  $y$ )), а связующие пункты, относительно которых вычисляются приближенные значения параметров преобразования, наоборот, должны быть разнесены как можно дальше;
- нет необходимости существенно увеличивать число избыточных значений координат связующих пунктов в двух системах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Подшивалов, В.П. Оценка параметров преобразования координат на плоскости методом наименьших квадратов / В.П. Подшивалов // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – М., 2010. – № 7. – С. 69 – 71.

Поступила 04.12.2013

**ANALYSIS OF THE ACCURACY OF COORDINATE SYSTEM TRANSFORMATION  
BY THE MEANS OF THE LEAST SQUARES METHOD**

***U. PADSHYVALOU, V. KUZMICH***

*In the practice of survey and geodesic support of mining ventures the characteristics of the connection of various coordinate systems are not always known. In the article the results of applying of least squares method for coordinate system transformation are presented. Various numbers of points and their different positions on the coordinate plane are reviewed. Various cases of calculation of tentative value of transformation characteristics depended on the position of the pairs of points respecting each other and the other points are analyzed. The algorithm of the calculation is realized on the examples, characterizing the variants under study. The results of the research are presented in the form of tables. The transformation accuracy is given. Preliminary conclusions about the further applying of the least squares method for connecting coordinate systems are drawn.*

УДК 551.24

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*д-р физ.-мат. наук, доц. В.Н. КОРОВКИН, А.Н. СОЛОВЬЕВ*  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлено математическое моделирование геодинамических процессов по результатам высокоточного повторного нивелирования, полученным в Полоцко-Курземской зоне тектонических разломов. Квазипериодический характер вертикальных движений реперов на исследуемом нивелирном профиле обусловил применение модели, основанной на тригонометрическом ряде Фурье. Наилучшие результаты, характеризующиеся максимальной согласованностью вычисленных скоростей движений реперов с их измеренными значениями, получены при заданном периоде.*

**Введение.** Современные движения земной коры представляют собой сложный физический процесс, связанный с геодинамикой, т.е. внутренним строением Земли и ее самого верхнего слоя, земной коры, тектоническими структурами и разломами. Поэтому принятая при составлении карты современных движений (деформации) земной коры (СДЗК) [4; 6] линейная модель распределения скоростей вертикальных движений земной коры на охватываемой ей площади может рассматриваться только в качестве первого приближения к описанию этого процесса, а значит, требуется выбор более сложных моделей.

Отметим, что классическое представление геодинамической модели территории Беларуси дано в работах [1; 7; 8], согласно которым Беларусь принадлежит к Восточно-Европейской древней платформе, состоящей из Балтийского и Украинского щитов, Русской и Волыно-Азовской плит. При этом почти вся площадь входит в состав Русской плиты со всеми структурными элементами запада этой плиты, и лишь на крайнем юге она включает самую северную часть Украинского щита и небольшой участок Волыно-Азовской плиты. Причем на территории Беларуси и смежных с ней областей развито большинство основных типов структур чехла древних платформ. Среди крупнейших структур выделяются изометричные (синеклизы и антеклизы) и линейные (авлакогены и системы перикратонных прогибов). Фундамент также характеризуется разнообразием типов структур, формаций и значительным возрастным диапазоном пород.

Как известно, структурные элементы земной коры различаются между собой не только по геолого-геоморфологическим и геофизическим признакам (составу пород, возрасту, намагниченности, гравитационным аномалиям и т.д.), но и тектонической подвижностью, максимально проявляющейся на стыках структур, как правило, обозначенных на местности тектоническими разломами различной глубины залегания. Тектонические разломы повсеместно наблюдаются и внутри структур. Подвижность тектонических структур в текущее геологическое время известна как современные движения (деформации) земной коры, которые распространены повсеместно.

Государственные нивелирные сети развиваются в виде полигонов и представляют собой площадные построения. Анализ результатов повторного нивелирования в этих сетях позволяет выйти на геодинамическую модель в виде карты скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) и установить взаимную подвижность тектонических структур для территории Беларуси. Однако оказалось, что существующие карты [4; 6] не согласуются между собой и несут противоречивую информацию о взаимном перемещении тектонических структур Беларуси (табл. 1) [5]. Это ставит под сомнение достоверность геодинамических моделей, использованных при составлении карт, и заставляет искать новые подходы и экспериментальные данные для их усовершенствования.

В развитие этого был проведен анализ моделей СДЗК территории Беларуси, созданных по космическим снимкам и геолого-геофизическим данным [2; 3].

В результате космогеологического картографирования территории Беларуси установлено, что суперрегиональные, региональные и локальные линейные структуры контролируют положение разнопорядковых неотектонических блоков, отличающихся своими геодинамическими параметрами и скоростями позднеолигоцен-четвертичных и современных вертикальных движений, что подтверждает качественную сторону карт СВДЗК, составленных по данным повторного нивелирования, но не может служить достоверным подтверждением количественных характеристик карт. Поэтому геодинамические модели, представляемые в виде карт СДЗК, должны быть составлены на основе комплексного анализа данных повторных геодезических измерений, результатов дешифрирования аэрокосмических снимков и серии карт геолого-геофизической, структурно-геоморфологической и геодезической изученности района. Кроме того, следует пересмотреть линейную модель распространения скоростей СВДЗК на исследуемой площади и при интерполировании значений этих скоростей между нивелирными реперами использовать более сложные математические подходы, максимально приближенные к описанию физических процессов.

Таблица 1

Сравнение скоростей СВДЗК по карте [6]  
и по карте Главного управления геодезии и картографии (ГУГК) [4]

Название структурных элементов платформенного чехла территории Беларуси	Скорости СВДЗК	
	Карта [6]	Карта [4]
1. Белорусская антеклиза	+ (4–5) мм/год	– (1–2) мм/год
2. Вилейский погребенный выступ	+ (1–6) мм/год (восточная часть = 0,5 от общей площади) – (1–2) мм/год	– (1–3) мм/год
3. Подляско-Брестская впадина	+ (5–7) мм/год	– (1–2) мм/год
4. Полесская седловина	+ (5–9) мм/год	– 1 мм/год
5. Припятский прогиб	+ (1–8) мм/год	– (1,4–3,6) мм/год
6. Брагино-Лоевская седловина	+ (2–3) мм/год	– (2–3) мм/год
7. Днепровско-Донецкий прогиб	+ (2–3) мм/год	– (2–3) мм/год
8. Жлобинская седловина	– (0–1) мм/год	– (1–2) мм/год
9. Оршанская впадина	– (0–2) мм/год + (2–6) мм/год (0,1 от общей площади)	– (0,2–2) мм/год + (0,2) мм/год (0,01 от общей площади)
10. Латвийская седловина	– (0–2) мм/год + (2–4) мм/год (западная часть = 0,25 от общей площади)	– 1,3 мм/год + (1–2) мм/год (западная часть = 0,15 от общей площади)
11. Воронежская антеклиза	– (1–2) мм/год	– (1,1) мм/год + 1,0 мм/год (0,05 от общей площади)

Следует отметить, что существует три группы функций, широко применяемых при интерполировании. Первая группа включает в себя степенные ряды типа  $(a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots)$ . Вторая группа образует функции  $\cos Aix$ ,  $\sin Aix$ . Эта группа или класс функций имеет отношение к рядам Фурье. Третья группа образуется функциями  $e^{-ax}$ , которые встречаются в реальных ситуациях.

Квазипериодический характер поведения нивелирных знаков по Полоцкому профилю [9] заставляет обратиться ко второй группе функций, основанных на рядах Фурье. Мы попытались детальнее исследовать этот подход с привлечением имеющихся экспериментальных нивелирных данных, подбирая по ним оптимальный период для условий профиля с тем, чтобы разработать методику интерполирования скоростей СВДЗК для Беларуси и сходных с ней регионов.

При решении прикладных задач часто возникает необходимость интерполяции – приближение одной функции (экспериментально) с помощью другой, заданной аналитически. При этом существует много видов, методов интерполирования и способов их применения. В инженерных расчетах часто используется особый вид интерполяции – тригонометрический. Причем на класс функций, при которых ее можно использовать, накладывается существенное ограничение – они должны быть периодическими. При этом можно осуществить разложение периодической функции в ряд по тригонометрическим функциям:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx). \quad (1)$$

Ряд вида (1) называется рядом Фурье.

Коэффициенты  $a_k$  и  $b_k$  находятся по формулам:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos kx dx, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin kx dx. \quad (2)$$

Если раскладываемая в ряд Фурье функция имеет период  $2l$ , то ряд Фурье для данной функции  $f(x)$  имеет вид

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n \left( a_k \cos \frac{k\pi x}{l} + b_k \sin \frac{k\pi x}{l} \right). \quad (3)$$

Коэффициенты этого ряда Фурье находятся по формулам:

$$a_k = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{k\pi x}{l} dx, \quad b_k = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \sin \frac{k\pi x}{l} dx. \quad (4)$$

Рассмотрим применение тригонометрической интерполяции на данных повторного нивелирования Полоцкого микрополигона.

Будем использовать для приближения следующий тригонометрический ряд:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos x_i + b_1 \sin x_i + a_2 \cos 2x_i + b_2 \sin 2x_i. \quad (5)$$

Для определения неизвестных коэффициентов  $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2$  в формуле (5) зададим экспериментальные данные в виде скоростей вертикальных движений нивелирных знаков по профилю, выраженных в миллиметрах в год (табл. 2).

Таблица 2

Исходные экспериментальные данные по профилю для определения коэффициентов ряда Фурье (вариант 1)

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$x$ , км	1,8	5,3	6,8	9,6	13,5
$f(x)$ , мм/год	0,21	-0,96	0,01	0,68	-0,09

По данным таблицы 2 и формуле (5) составляем систему из пяти линейных уравнений, в результате решения которой получаем искомые коэффициенты ряда Фурье:

$$a_0 = -0,1775; \quad a_1 = -0,44336; \quad b_1 = 0,62442;$$

$$a_2 = 0,50471; \quad b_2 = -0,096129.$$

По найденным коэффициентам вычисляем скорости вертикальных движений точек земной поверхности по профилю через 2 км (табл. 3).

Таблица 3

Вычисленные значения скоростей по данным таблицы 2 с использованием тригонометрического ряда Фурье без заданного периода (формула (5))

$x$ , км	1	3	5	7	9	11	13	15
$f(x)$ , мм/год	-0,10	0,95	-1,18	-0,04	0,98	-1,22	0,02	0,83

Для наглядности результаты выполненного решения представлены в виде графика, представленного на рисунке 1 (по вертикали – скорости, мм/год; по горизонтали – расстояние от начального, км).

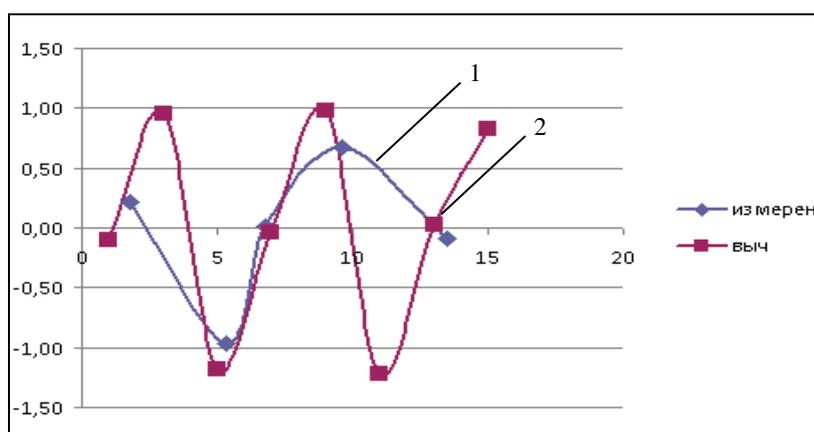


Рис. 1. Графики скоростей вертикальных движений точек земной поверхности по профилю, построенные по измеренным нивелирным данным (линия 1) и по вычисленным данным согласно тригонометрической формуле Фурье без заданного периода (линия 2)

Графики, показанные на рисунке 1, свидетельствуют, что без заданного периода вертикальные скорости движения точек земной поверхности по профилю, найденные по тригонометрической формуле Фурье, имеют существенные отличия от их измеренных значений. Поэтому для тех же эксперименталь-

ных данных таблицы 2 были проведены аналогичные вычисления с использованием тригонометрического ряда Фурье, но с заданным периодом  $l$ , согласно формуле (6):

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \frac{\pi x_i}{l} + b_1 \sin \frac{\pi x_i}{l} + a_2 \cos \frac{2\pi x_i}{l} + b_2 \sin \frac{2\pi x_i}{l}. \quad (6)$$

Результаты решения по экспериментальным данным профиля (табл. 2) и формуле (6) с периодом  $l = 5,6$  получились следующими:

$$a_0 = 0,04; \quad a_1 = 0,731; \quad b_1 = -0,5464; \quad a_2 = -0,0893; \quad b_2 = 0,2492.$$

Вычисленные значения скоростей (функции  $f(x)$ ) через 2 км по профилю для этого случая представлены в таблице 4 и на рисунке 2 (по вертикали – скорости, мм/год; по горизонтали – расстояние от начального, км).

Таблица 4

Вычисленные значения скоростей по данным таблицы 1 с использованием тригонометрического ряда Фурье с периодом  $l = 5,6$  (формула (6))

$x$ , км	1	3	5	7	9	11	13	15
$f(x)$ , мм/год	0,53	-0,57	-1,08	0,14	0,69	0,67	0,21	-1,01

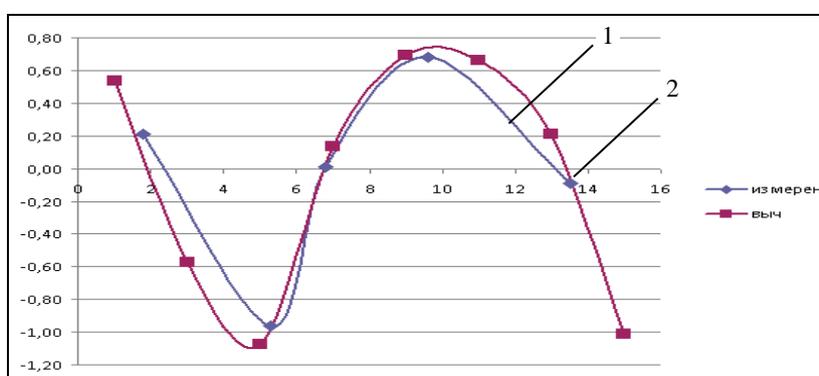


Рис. 2. Графики скоростей вертикальных движений точек земной поверхности по профилю, построенные по измеренным нивелирным данным (линия 1) и по вычисленным данным согласно тригонометрической формуле Фурье с заданным периодом  $l = 5,6$  (линия 2)

Из рисунка 2 следует, что сходимость вычисленных и измеренных значений скоростей вертикальных движений точек земной поверхности при заданном периоде существенно улучшилась по сравнению с предыдущим случаем. Однако дополнительное решение с заданным периодом  $l = 5,6$  для других реперов профиля (табл. 5) не привело к столь хорошему согласованию вычисленных скоростей с измеренными, как в предыдущем случае.

Таблица 5

Исходные экспериментальные данные по профилю для определения коэффициентов ряда Фурье (вариант 2)

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$x$ , км	2,8	6,1	7,3	17,7	13,5
$f(x)$ , мм/год	1,3	0,14	0,02	-0,56	-0,09

При втором варианте выбора экспериментальных данных по профилю решение системы пяти линейных уравнений, полученных из (6) с периодом  $l = 5,6$ , привело к следующим значениям коэффициентов ряда Фурье и результатам, представленным в таблице 6 и на рисунке 3 (по вертикали – скорости, мм/год; по горизонтали – расстояние от начального, км):

$$a_0 = 2,9588; \quad a_1 = -0,1751; \quad b_1 = -0,6724; \quad a_2 = -0,4969; \quad b_2 = -2,4022.$$

Таблица 6

Вычисленные значения скоростей по данным таблицы 5 с использованием тригонометрического ряда Фурье с периодом  $l = 5,6$  (формула (6))

$x$ , км	1	3	5	7	9	11	13	15
$f(x)$ , мм/год	-1,41	1,85	2,54	-0,33	3,94	1,45	-1,14	3,38

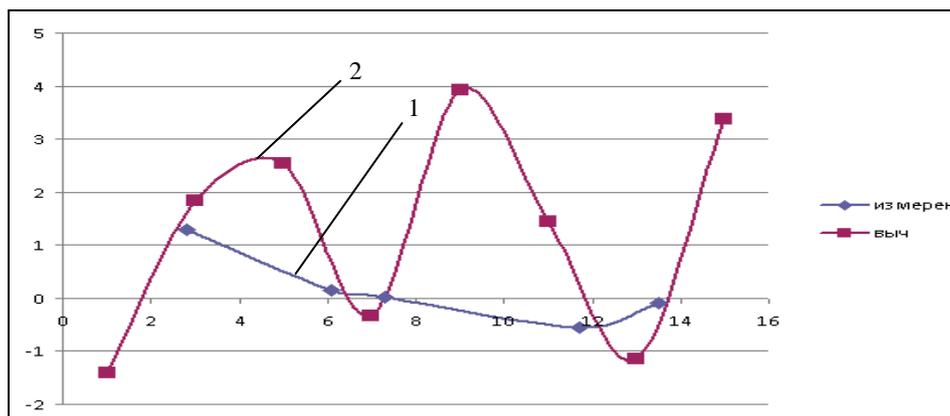


Рис. 3. Графики скоростей вертикальных движений точек земной поверхности по профилю, построенные по измеренным нивелирным данным (линия 1) и по вычисленным для варианта 2 данным согласно тригонометрической формуле Фурье с заданным периодом  $l = 5,6$  (линия 2)

**Заключение.** Представленные результаты четко показывают, что при использовании тригонометрического ряда Фурье для интерполяции могут получиться неоднозначные результаты. Поэтому главную роль играет выбор точек для вычисления коэффициентов ряда Фурье, а также насколько заданный период соответствует наилучшей аппроксимации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гарецкий, Р.Г. Глубинное строение и динамика земных недр территории Белоруссии / Р.Г. Гарецкий, Г.Е. Айзберг, А.М. Синичко. – Минск, 1991. – С. 228 – 257.
2. Губин, В.Н. Космогеологическая модель новейшего поля напряжений земной коры Беларуси / В.Н. Губин // Геотектонические и минеральные ресурсы Беларуси: материалы конф., Минск, 4 – 5 апр. 2008 г. / БГУ. – Минск, 2008.
3. Губин, В.Н. Геодинамика новейшего этапа развития земной коры территории Беларуси по космогеологическим данным / В.Н. Губин // Палеогеодинамика нефтегазоносных бассейнов Восточно-Европейской платформы. – Минск, 1994. – С. 88 – 99.
4. Карта современных вертикальных движений земной коры СССР. – М.: ГУГКСССР, 1988.
5. Коровкин, В.Н. Сравнительный анализ существующих карт современных вертикальных движений земной коры для территории Беларуси / В.Н. Коровкин, Г.А. Шароглазова, Е.Н. Вечерская // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2009. – № 12. – С. 142 – 145.
6. Схематическая карта современных вертикальных движений земной коры территории Беларуси и Прибалтики. – Минск: Ин-т геологических наук, 1991.
7. Тектоника Беларуси / под ред. Р.Г. Гарецкого. – Минск: Наука и техника, 1976. – 197 с.
8. Тэктанічная карта Беларусі. Нацыянальны атлас Беларусі. Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэсп. Беларусь. – Минск, 2002. – С. 46 – 47.
9. Недрa Беларусі 13: отчет о НИР ГПОФИ / Полоц. гос. ун-т; рук. темы Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2010. – 165 с.

Поступила 05.12.2013

#### MATHEMATICAL MODELLING OF GEODYNAMIC PROCESSES

V. KOROVKIN, A. SOLOVJEV

*Mathematical modelling of geodynamic processes by results of the high-precision repeated levelling, received in Polotsko-Kurzemskaj zone of tectonic breaks, is presented. Quasiperiodic character of vertical movements of bench marks on investigated level profile has caused application of the model based on Fourier trigonometric sequence. The best results, characterised by the maximum coordination of calculated speeds of movements of bench marks with their measured values, are received at the set period.*

УДК 528.063

**О ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «РОССИЯ – БЕЛАРУСЬ»,  
РАЗРАБОТАННОМ И ОТЛАЖЕННОМ  
В ПОЛОЦКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**д-р техн. наук, проф. В.И. МИЦКЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Демонстрируются сведения о программном комплексе «Россия – Беларусь», предназначенном для решения различных систем линейных алгебраических уравнений. Показана сфера его применения – обработка результатов эксперимента в любой области знаний по методу наименьших квадратов или по методу многокритериальной оптимизации с оценкой точности конечных результатов. Комплекс позволяет решать различные системы линейных алгебраических уравнений с использованием произвольной квадратной корреляционной матрицы. Несмотря на то, что по программам комплекса может быть решена любая задача с применением взвешенных систем линейных уравнений параметрическим способом, возможна также обработка информации, когда неизвестные параметры  $\delta X$ , количество которых  $T$ , могут определяться из одного параметрического уравнения.*

**Введение.** Наиболее важным вопросом, получившим универсальное решение, является метод численного обоснования различных новых способов решения систем уравнений программными продуктами комплекса «Россия – Беларусь». В результате нет необходимости предварительно определять закон распределения погрешностей измерений с тем, чтобы применять «нужный» метод решения данной практической задачи для получения состоятельных, эффективных и несмещенных оценок, поскольку в программном комплексе используются многокритериальные самонастраивающиеся методы, не требующие никаких априорных сведений о законах распределения ошибок наблюдений. Это «восстанавливает» известное изречение Эйнштейна «Учитывать вероятность при обработке измерений некорректно – «Бог не играет в кости».

**1. Сведения о технологии работы с программным комплексом «Россия – Беларусь»:**

Пользователь заранее записывает в файл MIZ, в бесформатном виде, подряд (все числа реальные с двойной точностью) массив REAL\*8 R(200000), который программы GAUSS.EXE (МНК необобщенный), MIZKEVICH2.EXE (МК необобщенный), TIXONOV2.EXE (МК обобщенный), MIXONOV.EXE (МНК обобщенный), BUDO2.EXE (МК обобщенный), LINNIK.EXE (поиск ошибок в исходной информации), PROVOROV.EXE (генератор ошибок в измерении) внутри себя читают.

После составления информации обращаемся к работе программ комплекса, которые обрабатывают информацию, высвечивая при счете сведения о процессе приближений, и по окончании вычислений записывают сведения бесформатно подряд в некоторые файлы.

**2. Основные программы комплекса «Россия – Беларусь»:**

1. Программа GAUSS

Решает любые системы линейных алгебраических уравнений по методу наименьших квадратов (МНК), не использует заданную корреляционную матрицу  $K_0$ .

2. Программа MIZKEVICH

Предназначена для решения различных систем линейных алгебраических уравнений многокритериальным методом (не использует заданную корреляционную матрицу  $K_0$ ). Исходная информация к программам, которые читают исходные данные, а также сведения о точностных характеристиках измерений (любую квадратную корреляционную матрицу) составляются однотипно.

3. Программа TIXONOV

Реализует обработку наблюдений по обобщенному МК, методом регуляризации (использует любую квадратную корреляционную матрицу).

4. Обработка независимых результатов измерений по МНК по программе MIXONOV (Мицкевич – Тихонов) с наивысшей точностью решения (использует любую квадратную корреляционную матрицу).

5. Программа BUDO

Реализует обработку наблюдений обобщенным многокритериальным способом (использует любую квадратную корреляционную матрицу).

6. Программа LINNIK

Находит грубые ошибки в измерениях и позволяет при наличии избыточных измерений диагностировать точность ранее выполненных наблюдений.

7. Программа PROVOROV

Применяется для генерации ошибок измерений по закону распределения, близкому к нормальному, по любому номеру варианта и в полном соответствии со стандартами измерений, указанными в исходной информации.

#### 8. Программа VVODINF

Читает исходные данные, расшифровывает их и записывает по особым правилам в файл MIZ в том же порядке их расположения, в котором требует инструкция для работы указанных выше программ.

### 3. Программы подмножества GEODEZIJA

Рассмотрим программы подмножества GEODEZIJA, обрабатывающие содержимое матриц  $A$ ,  $S$  и  $L$ , возникающих при обработке геодезических сетей (эти сведения будут храниться в файле MIZ для последующей работы программного комплекса «Россия – Беларусь»).

#### 1. PLOSKOST

Проектирование и уравнивание геодезических сетей на плоскости. Исходные данные задают по определенным правилам, сообщая сведения о геометрии сети, точности проектируемых измерений и о координатах исходных и определяемых пунктов.

#### 2. PROSTRANSTVO

Проектирование и уравнивание наземных пространственных геодезических сетей. Использует данные о составе измерений и о координатах исходных или определяемых пунктов, снятых с карты, схемы или взятые из каталога координат.

#### 3. VISOTKA

Проектирование и уравнивание нивелирных сетей геометрического, геодезического, барометрического и другого нивелирования.

### 4. Работы по созданию подмножества программ DEFORMAZIJA

Комплекс используется для определения, моделирования и корректировки моделей при изучении различных явлений и деформаций по единому системному подходу для различных областей знаний.

Над созданием программ GEODINAMIKA работы начаты под руководством Б.Ф. Азарова (Барнаул), ученика К.Л. Проворова.

Мы полагаем, что в случае отказа в работе одной из программ комплекса другие программы будут служить для контроля и подстраховки при эксплуатации комплекса.

Программы MIZKEVICH и BUDO также дают близкие результаты при многокритериальном методе уравнивания, если  $K_0 = E$ .

Обоснование МНК дал Гаусс, а обоснование МК-метода выполнить универсально невозможно (все зависит от содержимого матриц  $A$ ,  $S$ ,  $L$ ,  $K_0$ , задаваемых в исходной информации).

Предлагаем общий подход к обоснованию МК и любого другого метода на ЭВМ:

- генерируем  $L$  по программе PROVOROV;

- записываем после работы каждой программы одно число, характеризующее максимальное отклонение результатов от «истины». Числа, которые выдают программы GAUSS, MIZKEVICH, BUDO, можно увидеть на мониторе в процессе вычислений, а программа PROVOROV генерирует вектор  $L$  так, что из обработки системы параметрических уравнений становится известна «истина»:  $\sum_{i=1}^T \delta X_i = 0$ , следова-

тельно, известно отклонение от «истины»;

- обрабатываем 10 – 20 необходимых вариантов по программам PROVOROV, MIZKEVICH, TIXONOV, BUDO комплекса «Россия – Беларусь» и делаем вывод по дальнейшему применению того МК-метода, который дает большее количество вариантов с наименьшими отклонениями конечных результатов от «истины»;

- решаем установленным с помощью ЭВМ методом исходную систему уравнений, используя исходный (не сгенерированный по программе PROVOROV) вектор  $L$ .

Отметим, что изменять целевые функции в программах MIZKEVICH, BUDO и увеличивать размеры матриц достаточно легко.

### 5. Наибольший объем исходной информации

Матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок  $A$  может быть размером  $300 \times 300$ .

Вектор стандартов  $S$ , характеризующий индивидуальную точность каждого измерения, – 300.

Вектор свободных членов  $L$  – 300.

Корреляционная матрица измерений (или единичная матрица, заменяющая корреляционную) –  $300 \times 300$ .

Количество строк информации, записанной в редакторе FAR, не более 200.

Общее количество чисел, набираемых в файле для программы READ1, не более 200000. Все программы написаны на языке Fortran-IV и работают в операционных системах WindowsXP и Windows7.

Исходная информация набирается начиная с 1 до 80 позиции. Данные набирают последовательно, осуществляя произвольный переход от одной строки к другой. Например, начало числа может быть в од-

ной строке, а его продолжение – на следующей, можно начинать набор данных не с 1, а с произвольной позиции, и набирать строку не полностью, однако следует стремиться к простоте изображения информации.

Пробелы в строках информации программой игнорируются.

Для удобства набора данных программой разрешены символы 0 + - \* ,

Если исходные данные набраны с незамеченными и неисправленными ошибками, программа автоматически сообщит, где находится ошибка, и укажет точное положение ошибки в строке информации, где допущен промах. Поэтому выполнять распечатку исходной информации перед счетом по программе и тем более считывать ее с исходным материалом не следует.

#### 6. Теоретические «отличия» программного комплекса «Россия – Беларусь»

##### Основные формулы программы GAUSS

$$\delta X = -FL, \quad (1)$$

$$F = QA^T P, \quad (2)$$

$$Q = A^+ (A^+)^T, \quad (3)$$

$$A^+ = Q_{\max} A^T P^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$A^+ = Q_{\min} A^T P^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

##### Метод регуляризации, предложенный академиком А.Н. Тихоновым (программа TIXONOV)

$$Q_{\max} = (R_{\text{нов}}^2 + \alpha E)^{-1} R_{\text{нов}}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – параметр регуляризации.

Параметрический способ

$$R_{\text{исх}} = A^T P A. \quad (7)$$

Коррелятный способ

$$R_{\text{исх}} = B P^{-1} B^T. \quad (8)$$

Масштабирование  $R_{\text{исх}}$

$$R_{\text{нов}} = R_{\text{исх}} \times K, \quad (9)$$

$$K = \left( \left( \sum_{i=1}^T r_{ii} \right) / T \right)^{-1}, \quad (10)$$

$$Q = Q_{\text{нов}} \times K. \quad (11)$$

Благодаря масштабированию коэффициентов матриц нормальных уравнений снята проблема поиска  $\alpha$  при обработке любых систем уравнений. Параметр регуляризации, который нами вычисляется итеративным способом, для различных случаев отыскивается по единому алгоритму с применением метода релаксации, известному ещё со времен Гаусса.

##### Формулы для программы MIXONOV (вычисление $Q_{\min}$ )

Согласно формуле Тихонова (6) имеем

$$Q = Q^* R, \quad (12)$$

далее по методу Шермана – Моррисона

$$Q_i^* = Q_{i-1}^* - Z_i^T Z_i / g_i, \quad (13)$$

$$Z_i^T = Q_{i-1}^* r_i^T, \quad (14)$$

где  $r_i$  – строка матрицы нормальных уравнений  $R$ ;

$$g_i = 1 + r_i Z_i^T, \quad i = 1, \dots, T. \quad (15)$$

Начальное значение

$$Q_0^* = 10^m E; m = \frac{S}{2} - \lg(\max r_{ii}), \quad (16)$$

где  $S$  – количество значащих цифр в разрядной сетке ЭВМ.

### О программе LINNIK по поиску грубых ошибок в информации о матрицах $L(V)$

Вычисление матрицы коэффициентов условных уравнений  $B$  по матрице коэффициентов параметрических уравнений поправок  $A$  можно выполнить, опираясь на известные формулы академика Ю.В. Линника:

$$B = E - AF, \quad (17)$$

$$F = QA^T P, \quad (18)$$

$$v_{\text{доп}} = t \sqrt{\sum_{i=1}^N b_i^2 \sigma_i^2}. \quad (19)$$

По формуле (19) вычисляют допуск на величину поправки, полученной из уравнивания по МНК, на первом этапе которого исключены грубые промахи из информации, следуя известным теоретическим разработкам Ю.В. Линника и В.А. Коугия.

Формулы (17), (18) и (19) справедливы и для обобщенного метода уравнивания, заменяя  $P$  на  $K^{-1}$ .

Не перепутайте равенство (19) с известной формулой Гаусса, которую он применил в классическом коррелятном способе уравнивания:

$$W_{\text{доп}} = t \sqrt{\sum_{i=1}^N b_i^2 \sigma_i^2}. \quad (20)$$

По формуле (20) вычисляют допуск на величину свободного члена условного уравнения.

### Обобщенные методы уравнивания по МНК (программы TIXONOV и MIXONOV)

$$F = QA^T K_n^{-1}, \quad (21)$$

$$Q = (A^T K_n^{-1} A)^{-1}, \quad (22)$$

$$K_n = P^{-\frac{n}{2}} K_o P^{-\frac{n}{2}}, \quad (23)$$

$$K_n^{-1} = P^{\frac{n}{2}} K_o^{-1} P^{\frac{n}{2}}, \quad (24)$$

$$K_o = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1N} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{N1} & r_{N2} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (25)$$

### Многокритериальные методы уравнивания (программы MIZKEVICH и BUDO) целевые функции

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^N P_{n_i} |L_i(X)|^{m_i}, \quad (26)$$

$$L(X) = U^{\text{выч}} - U^{\text{изм}}, \quad (27)$$

$$\Phi(X) = \left( |L(X)|^{\frac{n}{2}} \right)^T K_n^{-1} |L(X)|^{\frac{n}{2}}. \quad (28)$$

Дополнительные критериальные функции

$$\Phi_1(n_i, X) = \max M, \quad (29)$$

$$\Phi_2(n_i, X) = \max \mu M, \quad (30)$$

где  $M$  – ошибка положения:

- в одномерном случае

$$M_i = \mu \sqrt{Q_{ii}};$$

- в двухмерном случае  $M_k = \mu \sqrt{Q_{ii} + Q_{i+1,i+1}}$ ,  
 - и т.д.

$$Q = FP_n^{-1}F^T, \quad (31)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{V_n^T P_n V_n}{N - T}}, \quad (32)$$

где  $N$  – количество уравнений;  $T$  – число параметров;

$$P_{ni} = \frac{1}{\sigma_i^n}, \quad (33)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{V_n^T K_n^{-1} V_n}{N - T}}. \quad (34)$$

Исследования показали, что программы МК-метода дают решения, близкие к «истине» и лучшие, чем метод наименьших квадратов (МНК) и чем показатели оценки точности результатов уравнивания в 94,6 % случаев [1 – 5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Решение примера академика А.Н. Тихонова по обработке нивелирных сетей по программному комплексу «Россия – Беларусь» методом исключения строк из матрицы коэффициентов параметрических уравнений поправок / В.И. Мицкевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 126 – 131.
2. Обработка антирядов измерений одной величины при разных значениях количества неизвестных и разных характеристиках точности измерений с помощью программного комплекса «Россия – Беларусь» / В.И. Мицкевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 109 – 113.
3. Субботенко, П.В. Развитие многокритериального способа уравнивания / П.В. Субботенко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 90 – 94.
4. Будо, А.Ю. О применении обобщенных нетрадиционных методов уравнивания / А.Ю. Будо // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 136 – 141.
5. Мицкевич, В.И. Альтернативные методы проектирования и уравнивания геодезических сетей / В.И. Мицкевич, А.Ю. Будо, Е.В. Грищенко. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 280 с.

Поступила 19.11.2013

#### ABOUT SOFTWARE SYSTEM “RUSSIA – BELARUS”, DEVELOPPED AND DEBUGGED AT POLOTSK STATE UNIVERSITY

V. MITSKEVICH

*The paper gives the information about the software system “Russia – Belarus”, designed for different systems of linear algebraic equations. The scope of its use, namely the processing of the experimental results in any field of knowledge by the least squares method or method of multicriteria optimization with estimation precision of the final results, is shown. The system allows to solve various systems of linear algebraic equations using an arbitrary square of the correlation matrix. Despite the fact that the system’s software can solve any problem using weighted linear equation systems in parametric manner, the data processing is also possible, when unknown parameters  $\delta H$ , the number of which is  $T$  may be determined from a parametric equation.*

УДК 528.854

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

О.А. КУЦАЕВА

(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки);

д-р техн. наук, проф. А.С. ЯРМОЛЕНКО

(Институт экономики и управления Новгородского государственного университета им. Я. Мудрого)

*Представлены разработка и исследование устойчивых методов классификации образов, основанных на методе наименьших квадратов и методе наименьших модулей. В результате эксперимента установлено, что решение по методу наименьших квадратов ошибочно в 6 случаях из 10, а по методу наименьших модулей – в 4 случаях из 10. Также разработан метод классификации образов, основанный на корреляционной связи оцениваемого образа и образа, хранящегося в памяти. При этом принадлежность образа к определенному классу определялась по трем значениям: максимальному значению из ковариационных моментов вектора, максимальному весу, значению выходного сигнала. Исследование этого алгоритма показало, что лишь при 6 и более ошибочных пикселах алгоритм теряет способность к классификации.*

**Введение.** Современное использование пространственной информации, в особенности по данным дистанционного зондирования Земли, принимает значительные масштабы, что в значительной мере требует развития методов и способов их обработки. Нейросетевые алгоритмы распознавания образов даже при отсутствии шумов входных сигналов могут приводить к неверным значениям выходных сигналов [1, с. 114], что в частности отражено в [2]. Существующие нейросетевые алгоритмы при наличии незначительно зашумленных входных сигналов классифицируются неудовлетворительно [3, с. 182; 4, с. 202]; эксперименты же с ограниченными шумами в 0,2 пиксела подтверждают пренебрегаемо малое повышение точности лишь на 4 %, кроме того, они не существенны, так как не учитывают шумы в +1 пиксел. Оптимизация существующих методов классификации образов, разработка и реализация новых подходов к анализу данных дистанционного зондирования Земли является актуальной задачей в современном развивающемся мире. В связи с этим возникает проблема не только совершенствования существующих алгоритмов классификации образов, но и создания новых, которые были бы устойчивы к значительным шумам входных сигналов.

Целью настоящей работы является разработка нейроаналитического алгоритма распознавания образов.

В соответствии с поставленной целью нами решаются следующие задачи:

- разработка и исследование устойчивого метода классификации образов, основанного на методе наименьших квадратов (МНК) и методе наименьших модулей (МНМ);
- разработка и исследование устойчивого метода классификации образов, основанного на корреляционной связи оцениваемого образа и образа, хранящегося в памяти.

### **Разработка и исследование робастного алгоритма классификации**

О возможности повышения устойчивости классификации по отношению к значительным шумам указывается в [5, с. 452]. Однако к настоящему времени такие устойчивые алгоритмы еще не разработаны. Поэтому в данном случае и ставится задача разработки одного из них.

Согласно [6], для достижения устойчивых к грубым ошибкам оценок оценочная функция  $\psi$  должна быть непрерывной и ограниченной. Согласно решению метода наименьших квадратов в соответствии с работой [7, формулы (14) – (15)] можно записать

$$\psi = h^T = B^T \cdot (B \cdot B^T)^{-1} \cdot X. \quad (1)$$

Данная функция является непрерывной, но не ограниченной. Таким образом получить устойчивые к грубым ошибкам значения весов в виде вектора  $h^T$  невозможно. Ограниченностью может обладать функция

$$\psi = h^T \text{diag}(|h_i|^{-1}), \quad (2)$$

где  $\text{diag}(|h_i|^{-1})$  – диагональная матрица обратных абсолютных значений весов  $h_i$ .

Функция  $h$  зависит от вектора измерений  $l$ .

Ее зависимость от одного из них представим как

$$h = h(l). \quad (3)$$

Тогда оценочная функция на основе (2) будет

$$\psi = \frac{h(l)}{|h(l)|}. \quad (4)$$

Влияние величины измерения на оценку параметра определяется функцией влияния, введенной в [8]

$$IF(\psi, l) = \psi / M[\psi'], \quad (5)$$

где  $M[\psi']$  – математическое ожидание производной  $\psi'$  оценочной функции по измерению.

Для функции (4) настоящая производная равна нулю, поэтому вместо  $M[\psi']$  можно взять величину  $M[\psi^2]$  [9].

Поскольку

$$\psi = \text{sign } h(l), \quad (6)$$

то для любой функции распределения измерений  $l$  при (6) будет

$$M[\psi^2] = 1. \quad (7)$$

Тогда функция влияния будет равна

$$IF(\psi, l) = \text{sign } h(l). \quad (8)$$

Функция (8) является дельта-функцией, обладающей прерывностью, но ограниченностью. Разрыв она терпит лишь в точке 0. На всем пространстве вещественных чисел, кроме этой точки, она непрерывна. При необходимости в точке 0 разрыв можно искусственно устранить подбором регулярной функции (рис. 1).

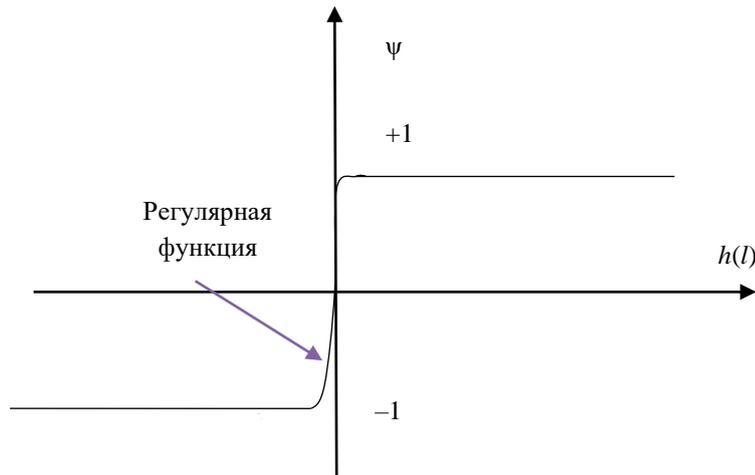


Рис. 1. Регуляризация разрыва функции

Оценочная функция (9) является производной от  $|h(l)|$  – модуля функции  $h(l)$ , поэтому для решения задачи будем минимизировать следующую функцию:

$$\phi = |h| \cdot I + 2K^T (B \cdot h^T + X_0) = \min, \quad (9)$$

где

$$|h| = (|h_1| |h_2| |h_3| \dots |h_n|), \quad (10)$$

$$I = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}_{n \times 1}, \quad (11)$$

или

$$\phi = h \text{diag}(|h_i|^{-1}) h' + 2K^T (B \cdot h^T + X_0) = \min. \quad (12)$$

Решением задачи в соответствии с (9) или (12) является решение методом наименьших модулей. Дифференцирование (12) по вектору  $h^T$  и равенство производной нулю приводит к решению

$$h^T = \text{diag}(h_i) B^T N^{-1} X_0, \quad (13)$$

где

$$N = B \text{diag}(h_i) B^T. \quad (14)$$

Тогда код распознанного образа будет

$$X = X_0^T \cdot N^{-1} \cdot B \text{diag}(h_i) l. \quad (15)$$

Вычисление по формуле (13) выполняется методом приближений до достижения заданной точности по алгоритму

$$h_m^T = \text{diag}(h_i)_{m-1} B^T N_{m-1}^{-1} X_0. \quad (16)$$

В (16) через  $m$  и  $m-1$  обозначены последующее и предыдущее приближения, в которых получены соответствующие элементы.

В качестве реализации алгоритма (16) рассмотрим пример без наличия ошибок сигналов, которые представлены в работе [7]. За нулевое приближение примем решение  $h$  по методу наименьших квадратов. Значения элементов этого вектора являются диагональными элементами матрицы  $\text{diag}(h_i)_0$  в нулевом приближении.

В таблице 1 приведены веса, полученные по методу наименьших квадратов и по методу наименьших модулей после трех приближений.

Таблица 1

Сравнение решений методом наименьших квадратов и методом наименьших модулей

№ пикселей	Веса полученные		Истинные значения выходных сигналов	Значения выходных сигналов и их истинные ошибки из решения			
	МНК	МНМ		МНК (методом наименьших квадратов)		МНМ (методом наименьших модулей)	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,338028	0,00506	0	0,88	-1	0,61	-1
2	5,00000	5,00000	1	1,37	0	1,19	0
3	-4,40141	-4,5317	2	1,62	0	1,80	0
4	2,535211	2,70581	3	3,88	+1	3,61	+1
5	-2,34507	-2,337	4	3,66	0	4,99	+1
6	-1,26056	-0,801	5	4,62	0	4,80	0
7	-1,79577	-1,5068	6	4,36	+2	5,00	-1
8	5,338028	5,66723	7	6,27	-1	6,80	0
9	-0,8662	-0,8259	8	7,01	-1	8,00	0
10	1,598592	1,46827	9	8,01	-1	9,00	0
11	-2,34507	-2,337					
12	3,464789	3,29419					
13	-0,61268	0,1922					
14	-4,64789	-4,9932					
15	-0,35211	-0,0068					

Из таблицы 1 следует, что веса пикселей 1, 6, 13, 15 значительно понижены. При этом веса пикселей 1, 15 практически нулевые. Эти пиксели вообще не чувствительны к помехам. Для сравнения с истинными значениями выходных сигналов вычисленные округлялись до целых значений по общим правилам округления чисел. В результате эксперимента установлено, что решение по методу наименьших квадратов ошибочно в 6 случаях из 10, а по методу наименьших модулей – в 4 случаях из 10. При отсутствии шума в пикселе 6 решение МНМ вообще безошибочно.

## 2. Устойчивый метод классификации, основанный на корреляционной связи оцениваемого образа и образа, хранящегося в памяти

Классификацию можно осуществлять по корреляционной связи оцениваемого образа и образов, хранящихся в памяти. При этом оцениваемый образ относят к тому классу, с которым у него самая большая корреляции. Коэффициент корреляции определяется по известной формуле

$$r = \frac{k}{m_x m_y}, \quad (17)$$

где  $k$  – ковариационный момент, вычисляемый по следующей формуле:

$$k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp}), \quad (18)$$

$m_x$  и  $m_y$  – средние квадратические отклонения;  $x_{cp}$  и  $y_{cp}$  – средние значения выходных сигналов.

Исследуем величину (18). При этом сигнал  $y_i$  будем считать идеальным, т.е. неподверженным влиянию шумов, а  $x_i$  – реальный сигнал оцениваемого объекта, подверженный шумам.

Оценивание влияния шума на величину  $k$  произведем вычислением производной по изменению  $x_i$ .

$$\frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{1}{n} \left[ \left( 1 - \frac{1}{n} \right) (y_i - y_{cp}) - \frac{1}{n} (y_2 - y_{cp}) - \dots - \frac{1}{n} (y_n - y_{cp}) \right]. \quad (19)$$

Так как

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y_{cp}) = 0, \quad (20)$$

то (19) можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{1}{n} (y_i - y_{cp}). \quad (21)$$

Поскольку  $(y_i - y_{cp})$  постоянная величина, то можно определить, что изменение ковариационного момента в зависимости от изменения сигнала (наличия шума) постоянно и не зависит от величины самого шума. Кроме того, можно так нормировать значения сигналов, чтобы выполнялось неравенство

$$(y_i - y_{cp}) < 1. \quad (22)$$

Это свойство позволяет использовать ковариационный момент для устойчивой к ошибкам классификации. Так как величины (21) здесь будут весами, меньшими единицы и обладающими при этом свойством гасить ошибки входных сигналов, задачу сформулируем так: пусть известен вектор истинных выходных сигналов

$$X_0 = \begin{pmatrix} X_{01} \\ X_{02} \\ L \\ X_{0n} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Коллокационная матрица его составляющих (формальный аналог ковариационной) равна  $K_{X_0}$ . Подаваемый отягощенный шумами реальный входной сигнал в виде вектора  $l$  имеет коллокационные связи с составляющими вектора  $X_0$  в виде вектора  $K_{lX_0}$ .

Необходимо определить значение выходного сигнала и классифицировать соответствующий ему образ с помощью выражения

$$X = hX_0, \quad (24)$$

где  $h$  – определяемый вектор весов.

Для решения задачи запишем полную ковариационную матрицу выходного вектора идеальных образов  $X_0$  и входного вектора  $l$ .

$$K = \begin{pmatrix} K_{X_0} & K_{X_0 l} \\ K_{l X_0} & K_l \end{pmatrix}, \quad (25)$$

где  $K_l$  – дисперсия составляющих вектора  $l$ .

В реальности (24) тождественно выполняться не будет, и будет иметь место разность

$$V = hX_0 - X, \quad (26)$$

или

$$V = (h-1) \begin{pmatrix} X_0 \\ X \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Дисперсия будет иметь следующий вид:

$$K_V = (h-1)K \begin{pmatrix} h \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

или

$$K_V = hK_{X_0}h^T - K_{lX_0} - K_{X_0l} + K_{Xl} = \min. \quad (29)$$

Дифференцированием (29) по  $h^T$  составляем уравнение и находим

$$h = K_{lX_0} K_{X_0}^{-1}. \quad (30)$$

Подставим (30) в (24) и получим

$$X = K_{lX_0} K_{X_0}^{-1} X_0. \quad (31)$$

Положим реализацию (31) в обозначениях нашей работы. Вычисление коллокационной матрицы  $K_{X_0}$  осуществляется по формуле

$$K_{X_0} = B_u B_u^T, \quad (32)$$

где  $B_u$  – матрица, полученная из центрированных строк матрицы  $B$ .

Под центрированием понимается вычитание из элементов строки их среднего значения. Вектор  $K_{lX_0}$  вычисляется по формуле

$$K_{lX_0} = l_u B_u^T, \quad (33)$$

где  $l_u$  – центрированный вектор  $l$ .

Принадлежность образа к определенному классу будем оценивать по трем значениям:

- максимальному значению из ковариационных моментов вектора (33);
- максимальному весу (30);
- значению выходного сигнала (31).

В рассматриваемом примере матрица  $B_u$

$$B_u = \begin{pmatrix} 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 & -0,8 & 0,2 & 0,2 & -0,8 & 0,2 & 0,2 & -0,8 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ -0,3 & 1 & -0,3 & -0 & 0,67 & -0,33 & -0,33 & 0,67 & -0,33 & -0,33 & 0,67 & -0,33 & -0,33 & 0,67 & -0,33 \\ 0,4 & 0 & 0,4 & -1 & -0,6 & 0,4 & -0,6 & 0,4 & -0,6 & 0,4 & -0,6 & -0,6 & 0,4 & 0,4 & 0,4 \\ 0,33 & 0 & 0,3 & -1 & -0,7 & 0,333 & -0,67 & 0,33 & 0,333 & -0,67 & -0,7 & 0,333 & 0,33 & 0,33 & 0,333 \\ 0,4 & -1 & 0,4 & 0,4 & -0,6 & 0,4 & 0,4 & 0,4 & 0,4 & -0,6 & -0,6 & 0,4 & -0,6 & -0,6 & 0,4 \\ 0,27 & 0 & 0,3 & 0,3 & -0,7 & -0,73 & 0,267 & 0,27 & 0,267 & -0,73 & -0,7 & 0,267 & 0,27 & 0,27 & 0,267 \\ 0,33 & -1 & -0,7 & 0,3 & -0,7 & -0,67 & 0,333 & 0,33 & 0,333 & 0,333 & -0,7 & 0,333 & 0,33 & 0,33 & 0,333 \\ 0,53 & 1 & 0,5 & -0 & -0,5 & 0,533 & -0,47 & 0,53 & -0,47 & 0,533 & -0,5 & -0,47 & 0,53 & -0,5 & -0,47 \\ 0,27 & 0 & 0,3 & 0,3 & -0,7 & 0,267 & -0,73 & 0,27 & -0,73 & 0,267 & -0,7 & 0,267 & 0,27 & 0,27 & 0,267 \\ 0,33 & 0 & 0,3 & 0,3 & -0,7 & 0,333 & 0,333 & 0,33 & 0,333 & -0,67 & -0,7 & 0,333 & -0,67 & -0,7 & 0,333 \end{pmatrix}, \quad (34)$$

обратная ковариационной матрице, будет иметь значения, представленные в (35).

$$K_{x_0}^{-1} = \begin{pmatrix} 3,112 & 2,61 & -0,9 & -0 & 2,72 & -0,4 & 0,013 & 1,12 & -0,31 & -2,11 \\ 2,612 & 2,78 & -0,9 & -0 & 2,72 & -0,4 & 0,179 & 1,12 & -0,15 & -1,95 \\ -0,9 & -0,9 & 1,7 & -0 & -0,8 & 0,2 & -0,1 & -1 & -0,5 & 0,9 \\ -0,2 & -0,2 & -0,4 & 0,8 & -0,4 & -0,4 & 0,2 & 0 & -0 & 0,2 \\ 2,725 & 2,72 & -0,8 & -0 & 4,45 & 0,2 & -0,47 & 1,25 & -0,12 & -3,72 \\ -0,4 & -0,4 & 0,2 & -0 & 0,2 & 1,2 & -0,6 & 0 & -0 & -0,6 \\ 0,012 & 0,18 & -0,1 & 0,2 & -0,5 & -0,6 & 0,779 & 0,13 & -0,15 & 0,654 \\ 1,125 & 1,12 & -1 & 0 & 1,25 & 1E-15 & 0,125 & 1,25 & -0,13 & -1,12 \\ -0,31 & -0,15 & -0,5 & -0 & -0,1 & 1E-16 & -0,15 & -0,1 & 0,979 & -0,02 \\ -2,11 & -1,95 & 0,9 & 0,2 & -3,7 & -0,6 & 0,654 & -1,1 & -0,02 & 3,779 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Для данной модели памяти матрица  $K_{x_0}^{-1}$  будет постоянна всегда. Изменяться будет лишь вектор ковариаций классифицируемого объекта с опорными векторами, по которым осуществлялось обучение алгоритма распознавания.

В таблице 2 приведены данные по моделированию процесса классификации объекта – начертания цифры 2 – при отсутствии шумов и с их наличием включительно до пяти случайно выбранных неверных пикселей (рис. 2).

Таблица 2

## Исследование эффективности классификации

Отсутствие шумов				2 неверных пиксела				5 неверных пикселей			
$B_x$ вектор		$K_{Ix_0}$	$h$	$B_x$ вектор		$K_{Ix_0}$	$h$	$B_x$ вектор		$K_{Ix_0}$	$h$
$l$	$l_y$			$l$	$l_y$			$l$	$l_y$		
1	0,4	0,8	0	0	-0,47	0,4	-0,13	0	-0,53	-0,4	-0,05
1	0,4	0	0	0	-0,47	-0,33	-0,13	0	-0,53	0,33	0,28
1	0,4	<b>3,6</b>	1	1	0,53	2,8	<b>1</b>	1	0,467	<b>1,2</b>	0,4
0	-0,6	2,0	0	0	-0,47	1,33	0	0	-0,53	0,67	0,2
0	-0,6	-0,4	0	0	-0,47	-0,2	0,75	0	-0,53	0,2	0,9
1	0,4	0,4	0	1	0,53	-0,13	0	1	0,467	-0,87	-0,6
0	-0,6	0	0	0	-0,47	0,33	-0,12	0	-0,53	-0,33	-0,12
1	0,4	2,8	0	1	0,53	1,73	-0,25	1	0,467	0,27	-0,5
0	-0,6	2,4	0	0	-0,47	1,87	0,13	0	-0,53	1,13	0,58
1	0,4	0	0	1	0,53	-0,67	-0,87	1	0,467	-0,33	-0,62
0	-0,6			0	-0,47			1	0,467		
0	-0,6			0	-0,47			1	0,467		
1	0,4			1	0,53			0	-0,53		
1	0,4			1	0,53			1	0,467		
1	0,4			1	0,53			1	0,467		

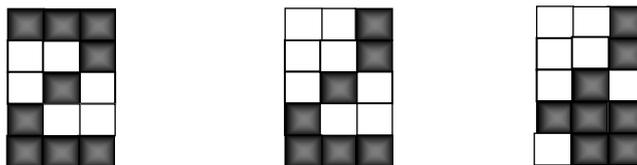


Рис. 2. Растровое изображение цифры два без шумов и с двумя и пятью случайно выбранными неверными пикселями

Максимальные ковариационные моменты в данном примере сохраняются для образца с начертанием 2, что соответствует правильности классификации. Лишь при 6 и более ошибочных пикселях алгоритм теряет способность к классификации.

**Заключение.** В настоящей работе авторами предложен ряд устойчивых нейроаналитических алгоритмов распознавания образов.

Исследование предложенных алгоритмов показало, что наиболее эффективным является алгоритм распознавания образов, основанный на корреляционной связи оцениваемого образа и образа, хранящегося в памяти.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан; пер. с англ. – М.: Издат. Дом «Вильямс», 2001. – 288 с.
2. Ярмоленко, А.С. Применение теории нейронных сетей в геоинформатике / А.С. Ярмоленко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 2. – С. 33 – 44.
3. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
4. Медведев, В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин; под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
5. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. испр.; пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
6. Хьюбер, П. Робастность в статистике / П. Хьюбер. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
7. Ярмоленко, А.С. Нейроаналитический метод классификации образов / А.С. Ярмоленко, О.А. Куцаева // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2012. – № 16. – С. 141 – 147.
8. Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions / F.R. Hampel [et al.]. – Wiley, 1986. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
9. Боровков, А.Я. Математическая статистика / А.Я. Боровков. – М.: Изд-во «Наука», 1984. – 472 с.

Поступила 02.10.2013

#### DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE SUSTAINABLE ALGORITHMS OF THE IMAGE RECOGNITION

**O. KUTSAEVA, A. YARMOLENKO**

*Development and research of sustainable methods of image classification based on the least squares method and on the least modules method is considered. As a result of experiment it is established that the decision on a method of the least squares is incorrect in 6 cases of 10, and on a method of the least squares – in 4 cases of 10. The method of classification of the images, based on correlation communication of an estimated image and an image which is storing in memory is developed as well. Thus belonging of an image to a certain class was determined by three values: to the maximum value from the covariance moments of a vector, to the maximum weight, value of an output signal. Research of these algorithms showed that only at 6 and more incorrect pixels the algorithm loses its ability to classification.*

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Кремнева Е.Г., Бакатович А.А.</i> Подготовка научных работников высшей квалификации в области строительства и архитектуры в Полоцком государственном университете .....	2
--	---

### АРХИТЕКТУРА

<i>Захаркина Г.И., Кабаева М.В., Пузеев А.А.</i> Развитие объемно-пространственных и планировочных структур в исторических городах Беларуси .....	8
<i>Арабей В.Г.</i> Вобразна-стылістычныя рашэнні сучасных прыходскіх храмаў Беларускай Праваслаўнай Царквы (вопыт 1991 – 2013 гадоў) .....	16
<i>Ожешиковская И.Н.</i> Стилистические особенности Богоявленской церкви в Витебске конца XVIII – начала XIX века .....	23
<i>Радзевич И.Р.</i> Каменные алтари XVII века на территории современной Беларуси .....	28

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

<i>Лазовский Е.Д., Глухов Д.О.</i> Предпосылки, методика и программа для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов .....	33
<i>Авласко Е.В.</i> Влияние кручения в многопустотных железобетонных плитах безопалубочного формования .....	40
<i>Лазовский А.Д.</i> Особенности работы многопустотных плит перекрытий безопалубочного формования с платформенными стыками .....	45
<i>Лазовский Е.Д.</i> Экспериментально-теоретические исследования прочности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры .....	51

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Бакатович А.А., Вишнякова Ю.В., Колтунов А.И.</i> К вопросу о применении мелкодисперсного наполнителя в штукатурных растворах .....	61
<i>Парфенова Л.М.</i> Применение зол тепловых электростанций в бетонах .....	68
<i>Зеленкевич Д.С., Ягубкин А.Н., Бозылев В.В.</i> Использование полимерно-минеральных добавок для повышения водонепроницаемости и морозостойкости бетона .....	73
<i>Бозылев В.В., Драгель А.А.</i> К вопросу о повышении прочностных показателей изделий из пенобетона неавтоклавного твердения .....	77

### ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

<i>Липский В.К., Воронин А.Н.</i> Применение процессного подхода при выявлении опасностей в магистральном трубопроводном транспорте на различных стадиях жизненного цикла .....	84
<i>Спириденко Л.М., Бондарчук А.И.</i> Техническое состояние резервуарных парков Беларуси .....	93
<i>Янушонок А.Н., Снарский А.С.</i> Обеспечение надежности магистральных трубопроводов, находящихся в длительной эксплуатации .....	98

### ГЕОДЕЗИЯ

<i>Будо А.Ю., Мицкевич В.И., Усов Д.В., Усова О.О.</i> Сравнение точностных характеристик равноточных нивелирных сетей, уравненных по методу наименьших квадратов и многокритериальными методами .....	104
<i>Подшивалов В.П., Кузьмич В.А.</i> Анализ точности преобразования систем координат методом наименьших квадратов .....	109
<i>Коровкин В.Н., Соловьев А.Н.</i> Математическое моделирование геодинамических процессов .....	117
<i>Мицкевич В.И.</i> О программном комплексе «Россия – Беларусь», разработанном и отлаженном в Полоцком государственном университете .....	122
<i>Куцаева О.А., Ярмоленко А.С.</i> Разработка и исследование устойчивых алгоритмов распознавания образов .....	127