

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

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



---

ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

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

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия F. Строительство. Прикладные науки

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

---

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

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

---

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

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

Подписано к печати 28.06.2017. Бумага офсетная 65 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 23,25. Уч.-изд. л. 28,03. Тираж 100 экз. Заказ 1391.

## АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.017.4

### АРХИТЕКТУРНАЯ КОЛОРИСТИКА В СТРУКТУРЕ РЕСТАВРАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

О.А. БОДЯКО, М.В. КАБАЕВА

(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

*Рассмотрена организационная структура административной и проектной деятельности по преобразованию исторически сложившихся городских пространств. Выявлены основные научные и технические приемы проведения работ по реконструкции и реставрации объектов архитектуры. Подчеркнуто влияние пространственной градостроительной формы на восприятие человеком архитектуры и цветовой среды. Описаны некоторые приемы цветовой реставрации зданий и зон городов при реконструкции исторической застройки. Представлены примеры отдельных этапов анализа существующей колористики Гомеля и приемы графического оформления натурных обследований цветовой среды.*

**Ключевые слова:** реконструкция, реставрация, колористическая стилизация и романская система.

**Введение.** Практическая деятельность по реконструкции и реставрации исторических зданий и городов требует глубокого теоретического осмысления обширных сведений по многим направлениям, поэтому в структуру реставрационной деятельности помимо проектной, исследовательской и строительно-технологической составляющих заложены юридические, методические, философские и морально-психологические основы. Юридические и методические факторы объединяют интересы государственных учреждений и творческие решения специалистов (реставраторов и архитекторов). Философские и морально-психологические составляющие отражают уровень общественного сознания общества, т.е. способность осмысления отдельных философско-эстетических вопросов, связанных с восстановлением подлинной архитектуры памятника. Академик Д.С. Лихачев в книге «Поэзия садов» отметил, что «...реставратор не возвращает реставрируемое произведение к определенному моменту его жизни, что практически невозможно, а продлевает его жизнь в культурном аспекте...». *Реконструкция* применительно к зданию или городу подразумевает коренное переустройство с целью улучшения, совершенствования, приведения в полное соответствие с современными технологическими и эстетическими требованиями. *Реставрация* – это восстановление утраченной или искаженной детали, части сооружения, градостроительного элемента в первоначальном или близком к нему виде.

**Основная часть.** В процессе восстановлении внешнего облика здания или реставрации крупного объекта архитектуры, в первую очередь, необходимо выявить его историческую полихромию путем использования современных методик и технологических приемов. Поиск первоначального цвета объекта осуществляется путем зондирования наружного отделочного слоя и выявления красочных слоев для их визуального, химического и спектрального анализа (рисунок 1).



*a*



*б*



*в*

*a* – страховочные конструкции для перераспределения нагрузки на стены от вибрации при внутренних работах; *б* – участок зондирования (на оси кадра), цвет материалов, конструктивные элементы (армированные бетонные стенки для укрепления фундамента, отверстие для ввода труб и коробов с инженерным оборудованием, низкокачественная кирпичная кладка стен); *в* – золотисто-охристый и белый цвета последней покраски всех зданий внутреннего двора. Фасад двухэтажного корпуса обработан специальной грунтовкой, 2007 г.

Рисунок 1. – Примеры фотофиксации при реставрации замка в Несвиже

В реставрации зданий существуют два архитектурно-художественных приема (метода) цветовой реставрации зданий – *колористическая стилизация* и *романская система* (рисунок 2).



*a* – колористическая стилизация; *б–г* – варианты цветовых решений в романской системе

**Рисунок 2. – Приемы цветовой реставрации здания**

Метод колористической стилизации заключается в восстановлении (воссоздании) изначального цвета реставрируемого объекта. Метод полихромной реставрации по романской системе основан на отказе от прешествующего цветового образа с целью создания нового внешнего вида объекта.

Особое место в колористике города занимает вопрос цветового согласования объектов современной архитектуры, вписываемых в существующую историческую среду, сформированную обликом разностилевых построек. При введении новой архитектуры в историческую ткань города или ансамбля используются различные композиционные приемы. Наиболее выразительны приемы, основанные на разных видах *контраста* и *нюанса* (рисунок 3).

*Контраст* позволяет находить оригинальные решения, в которых эстетические качества старых и новых зданий совместно создают в пространстве новую цветовую и композиционную реальность (рис. 3, *a*). В зависимости от утвержденной цветовой концепции города облик комплекса может быть решен на основе колористической стилизации или романской системы.

*Нюанс* применяется в случаях введения нового объекта в плотную историческую среду, созданную характерной образной формой и цветом старинных строительных материалов, так, чтобы новая архитектура подчинилась окружению и вписалась в существующий цветовой строй, не разрушая его (рис. 3, *б, в*).



*a* – сочетание двух 8-этажных жилых домов, построенных в разное время в стиле модери на улице Чернышевского в Санкт-Петербурге, 2015 г.;

*б* – нюанс по цвету, контраст по форме. Фрагмент проекта «Институт дизайна и архитектуры в Самаре». Архитектор А. Шерешевский, 2012;

*в* – архитектурное решение здания-вставки демонстрирует цветовое, образное и пластическое единство в композиции.

Проект многофункционального центра на проспекте Независимости в Минске.

Творческая мастерская А. Шоропа, 2006 г.

**Рисунок 3. – Примеры сочетаний разностилевых элементов в архитектурной композиции**

В *цветовой реставрации* городов сформировались два подхода:

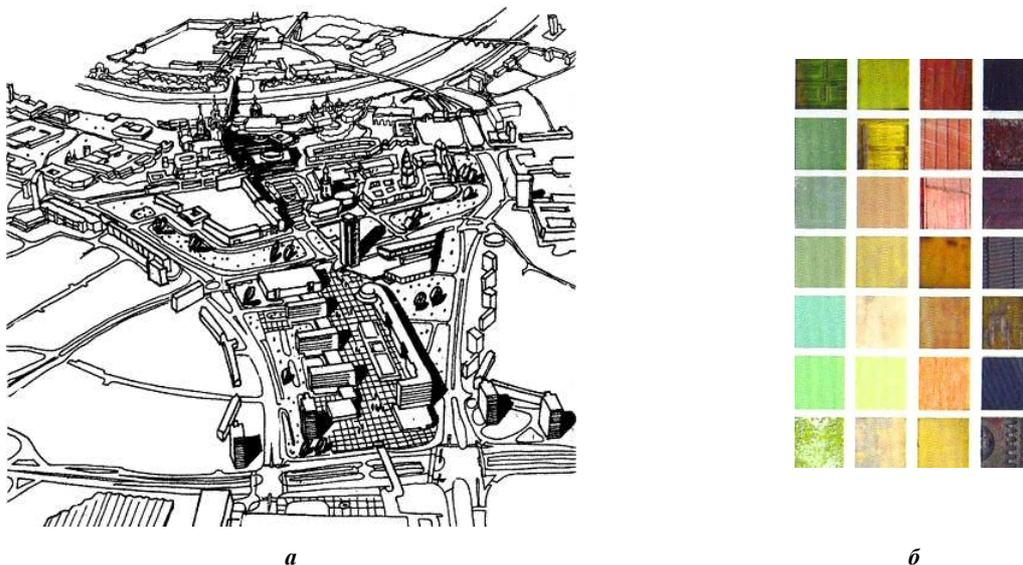
- простое восстановление подлинной исторической покраски всех зданий исторического квартала, центра, ансамбля;

- комплексное формирование полихромии объекта, когда создается целостный художественный образ фрагмента современного города.

Проектирование цветовой среды в реконструируемых зонах городов осуществляется по общей методике проектирования цветовой среды города.

При реставрации воспроизведение первоначальных цветов архитектуры в ансамбле считается важным, но современные подходы к формированию цветовой среды в урбанизированных пространствах позволяют (в определенных условиях) креативное использование и распределение документальных цве-

тов, полученных после исследований. Здесь вопрос восстановления исторической полихромии крупной городской единицы заключается в функциональном и композиционном определении границ использования документальных цветов в среде современного города (рисунок 4).



**а** – рисунок (вид с высоты птичьего полета) отражает планировочную структуру центра города, его функциональные связи, позволяет структурировать колористику городского пространства на основе сложившихся характерных признаков архитектурных стилей;  
**б** – цветовая палитра, построенная на колорите строительных материалов в зоне исторической застройки города

**Рисунок 4. – Исторический центр города Дрездена и его цветовая палитра, 1985 г.**

Разработка концепции цветовой реконструкции или реставрации проводится после тщательных натурных обследований и анализа пространственной и цветовой структуры как города в целом, так и его основных цветовых составляющих. Особо следует отметить, что при создании концепции цветовой реставрации района или зоны города все предпроектные исследования и проектирование должны проводиться творческим коллективом, объединяющим разных специалистов: архитекторов, художников, историков, философов, социологов и др. Введение цвета в существующую городскую среду должно происходить с учетом того, как архитектурные объемы воспринимаются в пространстве. Сознательное использование формообразующего действия цвета и его колористической активности расширяет возможности по управлению зрительным восприятием архитектурной формы. В архитектурной колористике термином «колористическая активность» определяется способность многоцветия преобразовывать пространственную среду или ее отдельные элементы. Эта способность объясняется величиной контраста между отдельными цветами по цветовому тону, светлоте, насыщенности и одновременно характером контраста очертаний цветowych пятен и других структурных членений формы.

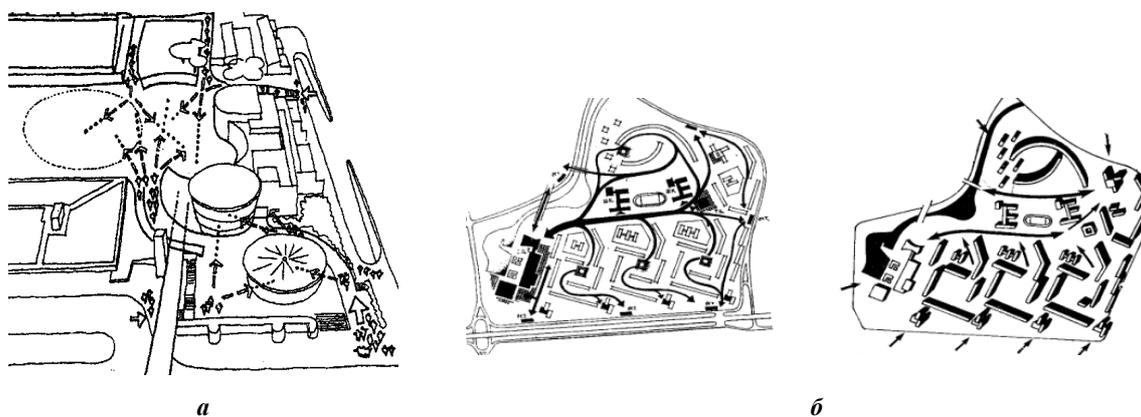
Примером смелого введения ярких и динамичных цветовых сочетаний в пространство города может служить реконструированный комплекс бумажной фабрики в Шклове (рисунок 5).



**Рисунок 5. – Современное решение колористики промышленного объекта. Шклов, 2013 г.**

Архитекторами института «Белпромпроект» найдено интересное и выразительное колористическое решение комплекса бумажной фабрики, основанное на контрастном сочетании темно-красного, белого и природного зеленого цветов. Здесь авторы композиционно – цветом и графически – объединили разноформатные объемы построек XIX–XX веков. В целом образ комплекса ассоциируется с национальными орнаментами в белорусском народном ткачестве и вышивке.

В городской среде *форма, масштаб и обширные пространства* воспринимаются и осознаются человеком как на уровне подсознания, так и на сознательном, в том числе эстетическом уровне, поэтому распределение цветов в проектируемом пространстве должно основываться на выявлении наиболее характерных и эстетически ценных панорам и видов и, соответственно, определении точек их восприятия. Точки восприятия располагаются по всему пространству глубинно-пространственной композиции, поля обзора могут быть плотными сгустками выразительных точек зрения или содержать их незначительное количество. Размещение цветовых масс в пространстве должно исходить из реального положения точек восприятия, поэтому цветовые массы также должны распределяться в пространстве с учетом его трехмерности. Различные по масштабу и функции архитектурные пространства требуют своего специфического колористического насыщения, которое должно соответствовать полям обзора (рисунок 6).



**а** – фиксация видовых точек и полей обзора; **б** – схемы к проекту цветовой среды микрорайона, отражающие внутренние и внешние пространственные зрительные связи, которые, в свою очередь, определяют принцип расположения цветовых масс и их колористическую активность относительно траектории движения человека

**Рисунок 6.** – Примеры графического выявления маршрутов и видовых точек

Явление хроматической стереоскопии и понятие «колористическая активность» используются при проектировании цветовой среды для пространственного цветового зонирования. Современное градостроительное проектирование осуществляется с учетом дифференциации городской среды, отражающей различные социальные процессы городского образа жизни. Дифференциация больше выражена в каркасе города, чем в его ткани, поэтому *полихромия центра всегда более динамична и насыщена, чем колористика периферийных зон* (рисунок 7).



**Рисунок 7.** – Выявление центра города архитектурными объемами и символическими цветами (желтый, голубой). Астана. Казахстан, 2016 г.

В настоящее время в градостроительстве развивается тенденция к применению в жилищном проектировании нового планировочного элемента «жилой модуль». Эта структурная единица площадью 15...20 га внедряется в сложившуюся структуру города и обеспечивает создание энергоэкономичных и экологичных бестранспортных внутренних пространств, архитектура которых предопределяет специфические подходы к проектированию их цветовой среды (рисунок 8).



*а* – сравнение жилых групп микрорайона с кварталом жилого модуля;  
*б* – крупный городской модуль; *в* – интерьер квартала

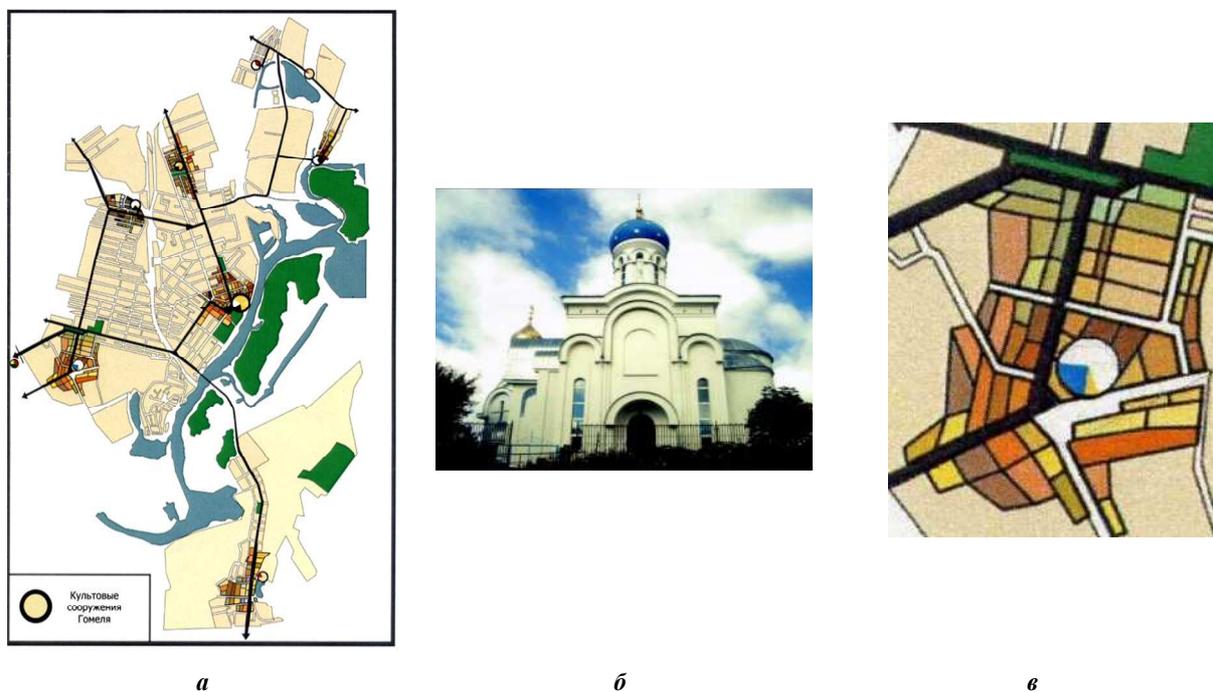
**Рисунок 8. – Жилой модуль как новая планировочная единица.  
 Архитекторы С. Ковырев, В. Свидунович, Н. Барабанова. Гомель, 2001 г.**

Вопросы архитектурной колористики входят в группу композиционно-художественных задач градостроительства, подчиненных принципам экологической целесообразности, обусловленности, комплексности и преемственности.

По предложению ООО «Институт Гомельгражданпроект» с 2011 года творческим коллективом архитекторов Белорусского государственного университета транспорта проводились обследования цветовой среды отдельных зон города Гомеля, материалы которых используются при разработке новой цветовой концепции города.

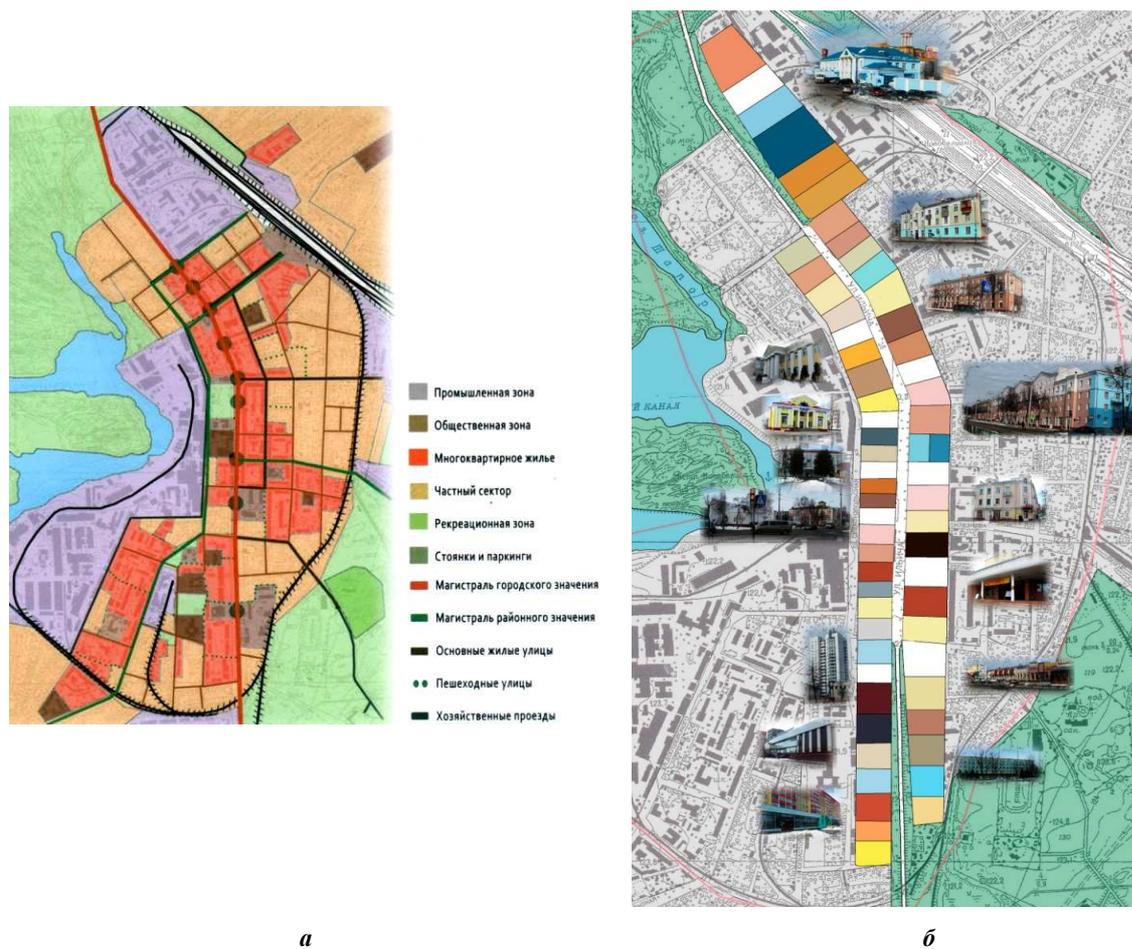
В выполненных работах проанализирован функционально-планировочный каркас города, определены зоны сосредоточения административных, производственных и историко-культурных объектов, выявлена их цветовая активность; в виде справочных документов, фотографий, чертежей, комплектов цветных палитр с разработкой цветowych гармоний систематизированы материалы, отражающие состояние различных объектов и их окружения на момент обследования.

Исследовательские работы имеют практическую ценность и могут служить примерами систематизации и оформления материалов, отражающих цветовую среду Гомеля (рисунки 9–11).



*а* – зоны размещения культурно-просветительских и культовых объектов в структуре города;  
*б* – церковь Иконы Божьей Матери;  
*в* – условный показ цветовых характеристик зданий в районе церкви

**Рисунок 9. – Примеры схем и фотофиксация**



**а** – схема планировочной структуры и функционального зонирования;  
**б** – схема размещения основных зданий-цветоносителей с показом их существующей покраски

**Рисунок 10. – Графические материалы обследования застройки центральной части Новобелицкого района города Гомеля по улице Ильича**



**Рисунок 11. – Планировочный и административный район Гомеля «Новобелица». Вид с севера. На переднем плане – зона промышленного предприятия**

**Заключение.** Процесс формирования цветовой среды урбанизированных пространств осуществляется одновременно с общим проектированием и руководствуется главными принципами градостроительства по обеспечению устойчивого развития общества. Один из этих принципов – *обязательное соблюдение экологической политики государства*, рассматривающей природу и общество в тесном взаимодействии и взаимообусловленности. Вопросы архитектурной колористики города входят в группу композиционно-художественных задач градостроительства, поэтому цветовое проектирование архитектурной среды осуществляется по принципам экологической целесообразности, обусловленности, комплексности и преемственности. Типы колористики города определяются пространственной типологией городской среды.

Создание проекта колористики реконструируемого архитектурного объекта происходит на основе комплекса проектно-аналитических действий, среди которых первоочередными проблемами считаются вопросы о роли объекта в структуре застройки и выборе метода цветовой реставрации.

*Романский метод цветовой реставрации* должен использоваться только на основании предварительно утвержденной цветовой концепции города.

Проектирование реконструкционных и реставрационных работ должно проводиться с применением методики и строительных технологий, используемых в современной практике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агранович-Пономарёва, Е.С. Архитектурная колористика : практикум / Е.С. Агранович-Пономарёва, А.А. Литвинова. – Минск : Технопринт, 2002. – 122 с.
2. Аникин, В.И. Жилой район крупного города / В.И. Аникин. – М. : Стройиздат, 1987. – 190 с.
3. Бодяко, О.А. Архитектурная колористика. Цветоведение : практ. пособие для студентов I курса спец. «Архитектура» / О.А. Бодяко, М.В. Кабаева. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 94 с.
4. Минск-сити – шаг к комфортному городу / Н.Н. Власюк [и др.] // Архитектура и строительство. – 2013. – № 6. – С. 44–53.
5. Ефимов, А.В. Формообразующее действие полихромии в архитектуре / А.В. Ефимов. – М. : Стройиздат, 1984. – 168 с.
6. Ефимов, А.В. Колористика города / А.В. Ефимов. – М. : Стройиздат, 1990. – 272 с.
7. Миронова, Л.Н. Цветоведение / Л.Н. Миронова. – Минск : Выш. шк., 1984. – 286 с.
8. Ополовников, А.В. Реставрация памятников народного зодчества / А.В. Ополовников. – М. : Стройиздат, 1974.
9. Урбах, А.И. Архитектура городских пешеходных пространств / А.И. Урбах, М.Т. Лин. – М. : Стройиздат, 1990. – 200 с.

Поступила 12.06.2017

#### ARCHITECTURAL COLORISTICS IN THE STRUCTURE OF RESTORATION ACTIVITY AND IN THE RECONSTRUCTION OF HISTORICAL DEVELOPMENT

*O. BODYAKO, M. KABAeva*

*The organizational structure of administrative and project activity on the transformation of historically developed urban spaces are considered. The main scientific and technical methods for reconstruction and restoration of architectural objects are detected. The influence of the spatial urban planning form on the perception of architecture and colour environment by the person is underlined. Some techniques of buildings and urban colour restoration areas during the reconstruction of historical buildings are described. Examples of the analysis of the existing colour environment of Gomel and the methods of graphical design of full-scale surveys of the colour medium are given.*

**Keywords:** reconstruction, restoration, coloristic stylization and the Romanesque system.

УДК 725[712+719+72.04]

**АДНАЎЛЕННЕ СЯДЗІБЫ РЭЙТАНАЎ У ГРУШАЎЦЫ  
(XVIII – ПАЧ. XX СТ.)****Ю.Т. ШЭСТАК***(Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск)*

*Разглядаецца прыклад рэканструкцыі жылых і грамадскіх будынкаў на падставе працы з комплексам помнікаў архітэктуры. Ахарактэрызаваны спецыфічныя задачы, якія вырашаліся ў ходзе даследавання, і дасягнутыя вынікі. Выяўлены патэнцыял пашырэння навучальных абсягаў пры працы з рэальнымі аб'ектамі з мэтай практычнай рэалізацыі праекта.*

**Ключавыя словы:** гісторыя архітэктуры, рэканструкцыя помнікаў архітэктуры, дэкаратыўныя элементы.

Вёска Грушаўка, якая сёння належыць да Ляхавіцкага раёна Брэсцкай вобласці, упершыню ўзгадваецца ў дакументах XVI стагоддзя. Да 1551 года яна належала княжне Барбары Радзівіл, якая падаравала маёнтак Міхалу Залескаму. У 1567 годзе Грушаўка была перададзена Жыгімонтам Аўгустам шляхціцу П. Шлягеру, затым зноў апынулася ў Радзівілаў. Прыкладна з сярэдзіны XVII стагоддзя і да пачатку XX стагоддзя Грушаўка робіцца галоўнай рэзідэнцыяй роду Рэйтанаў [1]. У другой палове XVIII стагоддзя маёнтак валодаў Тадэвуш Рэйтан (1741–1780 гг.), які лічыцца прыкладам патрыятызму і мужнасці, нацыянальным героем Беларусі і Польшчы. Да 1910 года Грушаўка належала Юзэфу Рэйтану, апошняму прадстаўніку гэтай галіны роду [2]. У цяперашні час шляхецкі родавы маёнтак Рэйтанаў, які знаходзіцца на балансе ў мясцовай калектыўнай гаспадаркі, ніякім чынам не эксплуатаецца і не ахоўваецца, што вядзе да паступовага разбурэння будынкаў і запусцення тэрыторыі.

Кафедрай “Архітэктура жылых і грамадскіх будынкаў” БНТУ (г. Мінск) у 2017 годзе сярод іншых аб'ектаў для рэканструкцыі быў прапанаваны комплекс будынкаў былой сядзібы Рэйтанаў у вёсцы Грушаўка, каб удыхнуць новае жыццё ў старажытныя будынкi і перадухіліць іх далейшае разбурэнне, а таксама з мэтай патэнцыйнай дапамогі захавання сядзібнага комплексу і папулярызацыі памяці Тадэвуша Рэйтана\*.

У пошуках вызначэння шляхоў развіцця сядзібнага комплексу, каб прадметна зацікавіць мясцовыя ўлады і патэнцыйных інвестараў, асноўнымі вынікамі праекта аднаўлення сядзібы былі:

- распрацоўка інтэграванай канцэпцыі аднаўлення сядзібнага комплексу;
- прапановы па рэканструкцыі і прыстасаванню асобных будынкаў, якія з'яўляюцца структурнымі складовымі часткамі сядзібнага комплексу;
- вырашэнне шэрагу лакальных задач, у той ці іншай ступені набліжаных да праблемаў рэальнага праектавання.

Першаснай задачай быў пошук інфармацыі, без якой нельга распачынаць працы з гістарычнымі аб'ектамі. Такім чынам, быў атрыманы досвед правядзення комплексных навуковых даследаванняў: з пісьмовых гістарычных крыніц, з іканаграфічных крыніц, з замежнай і айчынай навуковай літаратуры, на падставе натуральных даследаванняў.

Наступнай стадыяй пасля гістарычных і натуральных даследаванняў стала распрацоўка інтэграванай канцэпцыі аднаўлення сядзібнага комплексу, які прапануецца зрабіць аб'яднаным мемарыяльным і музейна-турыстычным гаспадарчым аб'ектамі.

Сёння на тэрыторыі, плошча якой складае каля 14 га, знаходзяцца: сядзібны дом, два флігеля, капліца, шэраг гаспадарчых пабудов рознага часу пабудовы і рознай ступені захаванасці, парк XIX стагоддзя, пладовы сад. Генеральны план распрацоўваўся на падставе даследаванняў А.Т. Федарука, гістарычных апісанняў, а таксама, у перспектыве, патрэбаў развіцця турыстычнай функцыі санітарных і пажарных нормаў Рэспублікі Беларусь. Абумоўленыя апошняй акалічнасцю праезды, пад'езды і стаянкі, якіх не было ў арыгінальнай планіровачнай структуры, прапануецца пакрываць газоннай пліткай “паркавальныя краткі”, што дазволіць зрабіць іх візуальна прыхаванымі. Паводле праекта, частцы асобных аб'ектаў вярталіся першасныя функцыя і выгляд, некаторым надавалася часткова змененая функцыя і арыгінальны выгляд, некаторым – цалкам змененая функцыя і першапачатковы выгляд. Для мэт аднаўлення аблічча ў большасці будынкаў патрабуецца замяніць шыфернае пакрыццё даху на першапачатковае

\* У праекце рэканструкцыі сядзібнага комплексу прымалі ўдзел студэнты архітэктурнага факультэта БНТУ, якія атрымалі ўяўленне пра працу з помнікамі архітэктуры, цягам якой патрабуецца прытрымлівацца прынцыпу, што аднаўленчыя працы з гістарычнымі будынкамі – гэта складанае мастацтва з высокай доляй адказнасці, дзе не так шмат месца для творчасці і самавыказвання, як у сітуацыі з новым будаўніцтвам.

гонтавае або бляшанае, а таксама рэканструкцыя з драўніны і металу аконных і дзвярных сталежных вырабаў і іх скабяных дэталей.

Кожны з асобных аб'ектаў з'яўляецца неад'емным паўнаважным структурным складнікам комплексу з асобным пад'ездам і падходам, рэжымам працы і функцыянальнай роляй. Два будынкі з комплексу – пахавальная капліца (пачатак XIX ст.) і афіцына “Мураванка” (XVIII ст.) – аб'екты, якія ўжо знаходзяцца ў працы праектнай арганізацыі – не разглядаліся для дэталёвай рэканструкцыі, але былі ўключаны ў агульную інтэграваную канцэпцыю аднаўлення. Згодна гэтай канцэпцыі, афіцына, у якой пражыў апошнія 7 год Тадэвуш Рэйтан, падлягае рэстаўрацыі з прыстасаваннем пад мемарыяльны музей.

Сядзібны дом (пачатак XIX–XX ст.) быў перабудаваны апошнім гаспадаром маёнтка Юзэфам Рэйтанам у драўляны з папярэдняга каменнага, ад якога застаўся толькі цокальны паверх. Будынак уяўляе сабой вялікі працакутны ў плане аб'ём, накрыты вальмавым дахам з мандсардамі. Галоўны ўваход вылучаны ганкам і тэрасай. Інтэр'еры былі ўпрыгожаны жывапісам па столі і роспісамі з імітацыяй насценных панэляў, разбой, кафлянымі печамі [3]. На сённяшні дзень сядзібны дом знаходзіцца ў незадавальняючым стане з разбурэннямі на фасадах і ў сярэдзіне. Аконныя і дзвярныя праёмы закалочаны, арыгінальныя сталежныя вырабы, якія вылучаліся асаблівай дэталёнасцю і складанасцю малюнка, страчаны.

Аб'ект прапанаваны да маштабнай рэстаўрацыі (малюнкi 1, 2) з прыстасаваннем пад функцыю раённага краязнаўчага музея, гістарычнага музея і адміністрацыі. На першым паверсе апроч музея прадугледжаны пакой для часовага пражывання гасцей. У праекце таксама быў вырашаны шэраг складаных пытанняў, звязаных з неабходнасцю арганізацыі доступу на ўсе паверхі для фізічна саслаблых асоб, а таксама з выкананнем патрабаванняў норм пажарнай бяспекі. Ідэя стварэння краязнаўчага музея сыходзіць наўпрост ад раённай адміністрацыі, таму што ў Ляхавічах на сённяшні дзень такога музея няма, як і падыходзячых для гэтай функцыі будынкаў. Падобны прыклад, калі раённы музей знаходзіцца не ў самім раённым цэнтры, а ў іншым населеным пункце, добра зарэкамендаваў сябе ў Пухавіцкім раёне (Мінская вобласць).



**Малюнак 1. – Галоўны фасад сядзібнага дома. Праект рэканструкцыі**



**Малюнак 2. – Дваравы фасад сядзібнага дома. Праект рэканструкцыі**

Левая афіцына (пачатак XIX ст.) пабудавана пазней за “Мураванку” Тадэвуша Рэйтана і адрозніваецца больш простымі формамі [4]. Аб'ект падлягае рэканструкцыі з прыстасаваннем пад размяшчэнне кватэр для персаналу. Такім чынам, часткова захоўваецца першапачатковая функцыя флігеля як службовай пабудовы для пражывання. Унутраная прастора падзяляецца на тры паўнаважныя кватэры, дзе ёсць усё неабходнае для пражывання сям'і. Плошча кожнай з кватэр складае 83, 69 і 43 м<sup>2</sup>.

У стайнях (пачатак XX ст.) Рэйтаны займаліся развядзеннем коней англійскай пароды, галандскіх і швейцарскіх кароў. Першая стайня знаходзіцца на паўднёвым ускрайку сядзібы і ўзведзеная ў формах прамысловай неаготыкі з буйнапамернай чырвонай цэгла. Складаецца з двухпавярховых карпусоў, аб'яднаных пасярэдзіне аднапавярховым аб'ёмам. Форма невялікіх аконных праёмаў вар'іруецца ад клінчатых і стрэльчатых да праэктных і лучковых [3]. Аб'ект на сёння страціў дах, падлягае рэканструкцыі з прыстасаваннем пад функцыю гатэля з кавярняй (малюнак 3).



**Малюнак 3. – Стайня. Праект рэканструкцыі**

Стайня (1909 г.) пабудавана на адной восі з першай стайняй у той самай тэхніцы. Мае П-падобны план. На франтонах выкладзены цэглай дата пабудовы і ініцыялы Юзэфа Рэйтана [4]. Часткова захаваліся фрагменты арыгінальных драўляных дзвярэй, каваныя завесы. Аб'ект знаходзіцца ў незадавальняючым стане і падлягае рэканструкцыі з прыстасаваннем пад функцыю невялікага кантактнага заапарку.

На беразе става – кузня, пабудаваная ў XX стагоддзі. Паводле агульнай канцэпцыі, было вырашана захаваць гэты капітальны аб'ём, таму што невядома, дзе дакладна стаяла ранейшая кузня. Для ўдакладнення інфармацыі павінны быць праведзены дадатковыя даследаванні. У савецкі час будынак выкарыстоўваўся як кузня і вазоўня. Функцыянальнае прызначэнне будынка захоўваецца арыгінальным з дадатковым развіццём. Унутраная прастора падзяляецца на тры функцыянальныя зоны: зона працы каваля і правядзення майстар-класаў, экспазіцыйная зона з выставай гатовых прац і продажам сувеніраў, службовая зона. Рэкамендуецца рэканструкцыя вонкавага выгляду будынка: разабраць цагляныя сцены і завершыць контур цалкам у дрэве з каменнымі ці бетоннымі калонамі (мал. 4).



**Малюнак 4. – Кузня. Праект рэканструкцыі**

Руіны бровара (XIX ст.). Будынак быў узведзены з бутавлага каменю і цэгла. Захаваўся контур, часткова мury, верхняя частка цалкам адсутнічае. Руіны падлягаюць кансервацыі і ўмацаванню. На прылеглай тэрыторыі арганізуецца падыход да бровара для агляду наведвальнікамі сядзібы.

Спіртоўня (XIX ст.) працавала як спіртапрыёмнік і спіртасховішча. Размяшчаецца ў цэнтры сядзібнага комплексу, за былой цэнтральнай клумбай [4]. Муры складзены з вялікіх камянеў з друзам на вапнавай рошчыне. Дзвярны праём і малыя вокны маюць лучковае завяршэнне. У аконных праемах захаваліся металічныя краты. Злева да будынку далучаецца цокальны паверх, складзены з каменю. Спіртоўня прыстасоўваецца пад бар з вулічнай тэрасай, якая арганізавана ў руіне цокальнага паверху (малюнак 5).



Малюнак 5. – Спіртоўня. Праект рэканструкцыі

Унутраная прастора падзяляецца на тры функцыянальныя зоны: зона для наведвальнікаў, зона для замоваў (бар), зона персаналу. У сярэдзіне будынку з дапамогай драўляных канструкцый арганізаваны другі паверх з столікамі для наведвальнікаў. Уваходныя дзверы прапанавана зрабіць дадаткова абабітымі металам і абсталяваць засавам – для падкрэслівання функцыі спіртоўні.

Ляднік (XIX ст.) складзены з валуноў з друзам на вапнавай рошчыне. Захаваўся контур будынка, часткова муры, верхняя частка адсутная. Пабудова падлягае рэканструкцыі і музейфікацыі першаснай функцыі.

Гумно (XIX ст.) – гэта адзін з унікальных прыкладаў драўлянага дойлідства для Беларусі ў цэлым. Вялікі гаспадарчы будынак, прызначаны для захоўвання збожжа, абмалоту, веяння і іншай апрацоўкі зерня, стаіць на ўскрайку сядзібы за вадаёмам з дамбай [4]. Будынак гумна прыстасоўваецца пад залу для мерапрыемстваў. Унутраная прастора падзяляецца на тры функцыянальныя зоны: уваходную, банкетную, зону сцэны і глядацкіх месцаў. Пры ўваходзе прадугледжваецца гардэробны пакой для наведвальнікаў, складское памяшканне (для захоўвання інвентару: крэслаў і г.д.). Фізічны стан будынка сёння недавальняючы. Аб'ект падлягае рэканструкцыі. Драўляныя сцены павінны быць адрэстаўраваны з аднаўленнем страчаных фрагментаў. Дадатковае ўцяпленне сцен, якое магло б змяніць арыгінальнае аблічча пабудовы, не патрабуецца, таму што выкарыстанне залы для мерапрыемстваў прадугледжваецца толькі ў цёплы час году. Патрэбна аднаўленне ўнутраных і вонкавых канструкцый, якія не толькі выконваюць функцыю нясурых, але і ствараюць непаўторную ўнікальнасць пабудовы (малюнак 6).



Малюнак 6. – Гумно. Праект рэканструкцыі

Падчас працы над праектам рэканструкцыі сядзібнага комплексу атрымана ўяўленне пра рэстаўрацыйную дзейнасць асносна помнікаў архітэктуры, цягам якой патрабуецца прытрымлівацца прынцыпу, што аднаўленчыя працы з гістарычнымі будынкамі – гэта складанае мастацтва з высокай доляй адказнасці, дзе не так многа месца для творчасці і самавыказвання, як у сітуацыі з новым будаўніцтвам. Адною з важных мэтай было не толькі ўдыхнуць у сядзібны комплекс новае жыццё, то бок надаць утылітарную складовую аб'ектам, якія сёння не выкарыстоўваюцца, але і па магчымасці аднавіць асяроддзе, якое склалася тут цягам мінулых стагоддзяў.

Такім чынам, апрача дасягнення асноўных мэт, атрымана ўяўленне пра неабходнасць і складанасць пошуку кампрамісу паміж патрабаваннямі новага часу і задачамі захавання гістарычнага аблічча будынка і ў цэлым комплексу. Асобная роля вылучалася гістарычным пошукам і натурным даследаванням. Вялікая ўвага надавалася рэканструкцыі арыгінальных дэталей і элементаў для аднаўлення дакладнага вонкавага выгляду будынкаў: агароджаў, карнізаў, ганкаў, аконных і дзвярных запаўненняў і абрамленняў, скабяных вырабаў. Запатрабавалася спецыяльная распрацоўка архітэктурных дэталей.

#### ЛІТАРАТУРА

1. Несцярчук, Л.М. Грушаўка / Л.М. Несцярчук // Замкі, палацы, паркі Берасцейшчыны Х–XX стагоддзяў (гісторыя, стан, перспектывы). – Мінск : БЕЛТА, 2002. – С. 219–220.
2. Aftanazy, R. Dzieje rezydencji na dawnych kresach Rzeczypospolitej / R. Aftanazy. – Tom 2. – Województwo bresko-litewskie, nowogródzkie / R. Aftanazy – Wrocław : Instytut Sztuki PAN, Zakład narodowy im. Ossolińskich, 1992. – 219 с.
3. Збор помнікаў гісторыі і культуры. Брэсцкая вобласць / АН БССР, Ін-т мастацтвазнаўства, этнаграфіі і фальклору ; рэд. кал.: С.В. Марцэлеў (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск : Беларус. Сав. Энцыклапедыя, 1984. – С. 282–283.
4. Федорук, А.Т. Старинные усадьбы Берестейщины / А.Т. Федорук. – Мінск : Беларус. Энцыкл імя Петруся Броўкі, 2004. – С. 424–429.

Паслухніць 07.06.2017

#### RESTORING FAMILY MANOR REITAN (XVIII – BEG. XX CENTURIES)

**Y. SHESTAK**

*The example of coursework on architectural designing in the field of reconstruction of residential and public buildings based on the outcome of the work with a complex of monuments of architecture are considered. The complex of specific tasks solved by a team of authors and the results achieved are characterized. The potential development of coursework on designing when working with real architectural objects are described.*

**Keywords:** history of architecture, reconstruction of architectural monuments, coursework on architectural designing, decorative elements.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 666.973.2

### ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОЧЕСОВ ВОЛОКНА ЛЬНА В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

*С.А. РОМАНОВСКИЙ; канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены результаты исследований по изучению микроструктуры очеса волокна льна с помощью светового микроскопа и льняного волокна с применением электронной микроскопии. Установлены морфометрические параметры льняного волокна очеса и элементарных волокон. Определено строение волокна льна, как структуры из плотно соединенных между собой пучков элементарных волокон размером поперечного сечения 50...70 мкм. При исследовании очеса волокна льна с использованием оптического микроскопа подтверждено наличие пустотного канала в элементарном волокне диаметром 4...6 мкм. Выявлены основные факторы, оказывающие положительное влияние на снижение коэффициента теплопроводности изоляционного материала из очесов льна. Возможность формирования сетчатой пространственной структуры из элементарных волокон диаметром 8...12 мкм обеспечивает предпосылки для получения высокоэффективного теплоизоляционного материала на основе очесов льна.*

**Ключевые слова:** световая и электронная микроскопия, очесы волокна льна, элементарные волокна.

**Введение.** Отрасль строительных материалов в настоящее время ориентируется на создание новых эффективных теплоизоляционных материалов, что обусловлено стратегией энергосбережения в условиях повышения цен на энергетические ресурсы. Современные утеплители не лишены эксплуатационных и стоимостных недостатков. При низкой цене материала потребитель получает низкокачественный продукт, а при высокой стоимости основная часть эксплуатационных показателей находится в пределах нормы, но вопросы экологичности и долговечности для большинства теплоизоляционных материалов остаются непроработанными. Современный уровень развития техники и технологий позволяет достичь комплексного сочетания достоинств утеплителей и отсутствия отрицательных качественных показателей материала. Таким образом, основываясь на указанных критериях, создание новых эффективных теплоизоляционных материалов на сырье растительного происхождения является весьма актуальным направлением в промышленности изоляционных материалов, а получение эффективного утеплителя на основе очесов волокна льна можно отнести к разряду перспективных инновационных решений в области экологического строительства.

Процесс выращивания льна и получения льняных очесов достаточно трудоемкий. После созревания лен теребят и расстилают на поле в виде лент для того, чтобы под воздействием естественной влаги на льне начали развиваться грибки, разрушающие пектиновые вещества, соединяющие волокно со стеблем [1]. В результате из льняной соломки получается треста, с облегченным отделением волокна от стебля. Волокна льна от древесины стебля отделяют сплошными лентами из лубяного слоя, представляющего собой техническое волокно. Лубяные волокна характеризуются высокой прочностью на разрыв и низкой упругостью. Полученное льняное сырье поступает на льнозаводы для первичной переработки льна. На мяльно-трепальных агрегатах в процессе мятья и трепания волокна приобретают вид длинных прядей. Часть волокон при этом обрывается и попадает в отходы трепания. Для дальнейшей переработки льноволокно обычно поступает на льнокомбинаты, где длинное трепаное волокно подвергают чесанию. В результате чесания трепаного льна получают от 45 до 55% чесаного льна, 40...50% очеса и 5% костры.

Льняные волокна используют для изготовления тонких и прочных ажурных кружев, тонких батистов, материи для постельного и нательного белья, декоративных тканей. Для производственных целей из льняного сырья изготавливают такие грубые и особо прочные изделия, как брезенты, парусину, рыболовные сети, пожарные рукава [2]. Белорусская компания ОАО «АКОТЕРМ ФЛАКС» предлагает теплоизоляционные плиты, изготавливаемые из льняного волокна (85%) и связующего компонента – бикомпонентного полиэфирного волокна (15%), равномерно распределенного по всему объему плиты [3]. Применяют материал в малоэтажном строительстве для утепления стен и перекрытий. Срок эксплуатации плит не менее 70 лет. Плиты «АКОТЕРМ ФЛАКС» имеют плотность 30 кг/м<sup>3</sup>, обеспечивают теплопроводность 0,038 Вт/(м·°С), звукопоглощение – 0,84 и паропроницаемость – 0,4 мг/(м·ч·Па).

Также в Беларуси производят «Льноватин» – материал, состоящий из коротких льняных волокон длиной менее 25 см [4]. Волокнистые остатки подвергают специальной обработке в чесальных машинах и формируют равномерное полотно. Полученный материал уплотняют с помощью пробивных игл, спутывающих волокна между собой. «Льноватин» характеризуется плотностью 72...100 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводностью 0,038 Вт/(м·°С).

Наиболее известны теплоизоляционные плиты «Экотеплин», производимые в России, содержащие в составе льняные волокна, являющиеся наполнителем [5]. В качестве связующего используют натуральный крахмал, а соли бора применяют как огне- и биозащиту. Технология производства утеплителя предусматривает получение плит без применения синтетических добавок. Плиты применяют как в малоэтажном строительстве, так и для утепления и звукоизоляции многоквартирных домов. Материал «Экотеплин» является гипоаллергенным и полностью безопасным для здоровья. При плотности 32 кг/м<sup>3</sup> утеплитель имеет коэффициент теплопроводности 0,038 Вт/(м·°С), коэффициент звукопоглощения – 0,98, коэффициент паропроницаемости – 0,4 мг/(м·ч·Па), группа горючести Г1. Регламентируемый срок службы материала составляет более 60 лет.

Из очесов льна длиной 5...10 см изготавливают материалы для производства широкого ассортимента тканей технического и бытового назначения: обивочных, тарных, портьерных, мебельных и пр. Также очесы льна применяют для получения основы под отделочные материалы и напольные покрытия. Очесы, не подвергнутые прядению, используют для уплотнения резьбовых соединений трубопроводов [6]. Таким образом, очесы льна имеют достаточно широкую область применения, однако *поиск путей максимального эффективного использования очесов для среды обитания человека на сегодняшний день остается открытым вопросом.*

Представляется, что наиболее актуальное решение поставленной задачи – получение эффективных утеплителей из очесов волокна льна с пониженной горючестью, обеспечивающих экологическую безопасность для человека и не содержащих в своих составах органических, синтетических связующих, а также полимерных компонентов наполнителей. На первоначальном этапе необходимо исследовать и проанализировать микроструктуру льняного очеса, а также волокна льна для установления параметров, позволяющих обеспечить высокие физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов.

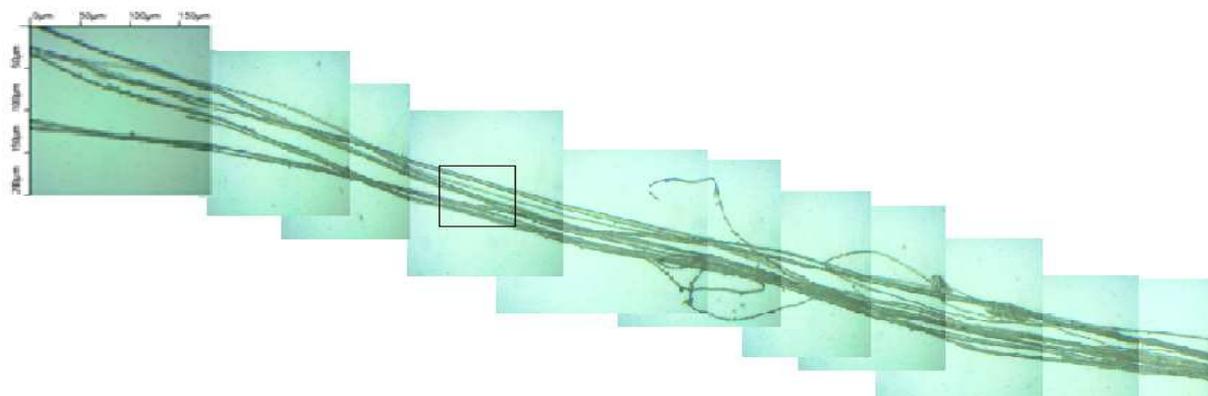
**Методика эксперимента.** Изучение микроструктуры очеса волокна льна проводили с помощью световой микроскопии на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ 5С», который позволяет получить изображения структуры поверхности исследуемых объектов. Данный микроскоп имеет специальный осветитель, установленный со стороны объектива, и построен по схеме отраженного света. Система призм и зеркал направляет свет на объект, далее свет отражается от непрозрачного объекта и направляется обратно в объектив. Образец помещали на предметный столик и фиксировали с помощью стеклянной пластинки толщиной 3 мм. Полученное изображение выводилось на экран монитора и записывалось на жесткий диск компьютера. Использование *компьютерной программы «Altami Stadio»* позволяет совмещать полученные последовательные фотоснимки фрагментов образцов для увеличения участка изображения исследуемого материала.

Сканирующая электронная микроскопия является чувствительным инструментом для изучения технических волокон различного назначения. Исследование морфологических особенностей льноволокна осуществляли с использованием сканирующего электронного микроскопа «JSM-5610 LV». Наличие низковакуумного режима работы микроскопа дает возможность исследовать непроводящие объекты без пробоподготовки и нанесения проводящих покрытий, т.е. получать изображение с реальной поверхности. Наличие двух типов детекторов позволяет получать изображения в режимах вторичных и обратно отраженных электронов. Все действия с микроскопом проводятся с помощью программного компьютера. Интерфейсная часть программного обеспечения микроскопа, состоящая из управляющей программы INCA Energy 450, запускается на персональном компьютере и служит для отображения, обработки и сохранения результатов измерений. Результаты измерений заносятся в протокол, генерируемый программой, и хранятся на жестком диске компьютера. Искажение данных при передаче через интерфейс связи исключается параметрами протокола.

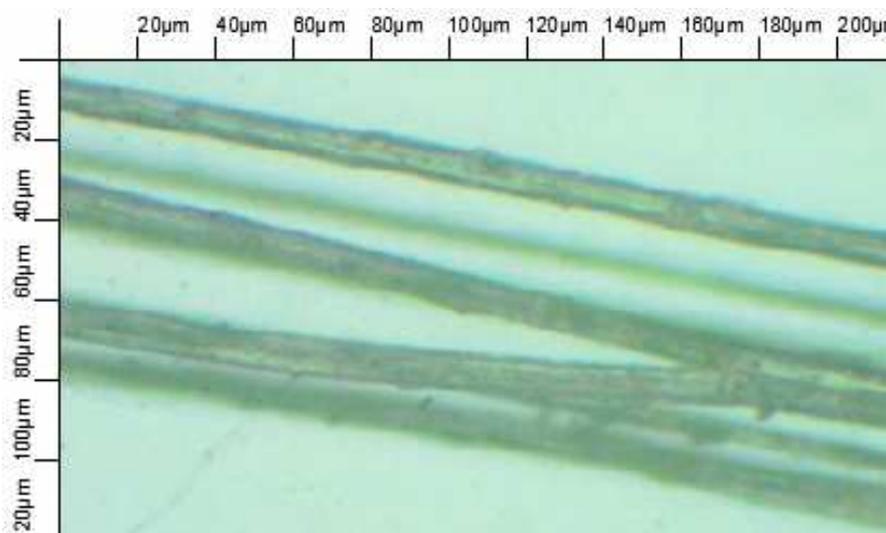
**Результаты и обсуждение.** С помощью световой микроскопии получены изображения внешнего вида очеса льна путем совмещения фотоснимков последовательно расположенных участков исследуемого образца. На рисунке 1, *а* представлено изображение льняного очеса длиной 6 см; на изображении очеса волокна льна рамкой выделен увеличенный фрагмент (рисунок 1, *б*).

Полученные данные свидетельствуют о том, что очес волокна льна состоит из растрепанных пучков элементарных волокон (см. рисунок 1, *а*). В очесе элементарные волокна периодически связываются друг с другом за счет хаотически расположенных контактных соединений. В результате формируется сетчатый волокнистый каркас, обеспечивающий прочное продольное соединение всей структуры очеса льна. Очесы связываются между собой благодаря боковым ответвлениям в виде элементарных волокон, образуя сетчатую пространственную волокнистую систему. Элементарное волокно представляет собой

растительную клетку веретенообразной формы. На микроснимке (см. рисунок 1, б) в элементарных волокнах отчетливо просматриваются узкие внутренние каналы диаметром 4...6 мкм. Длина элементарных волокон варьируется от 10 до 40 мм, при диаметре 8...12 мкм.



*a*



*б*

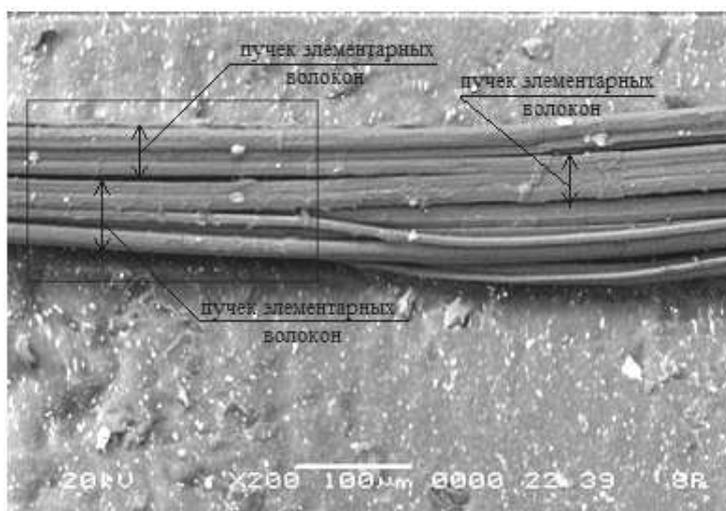
*a* – внешний вид очеса; *б* – элементарные волокна в очесе

**Рисунок 1. – Световая микроскопия очеса волокна льна**

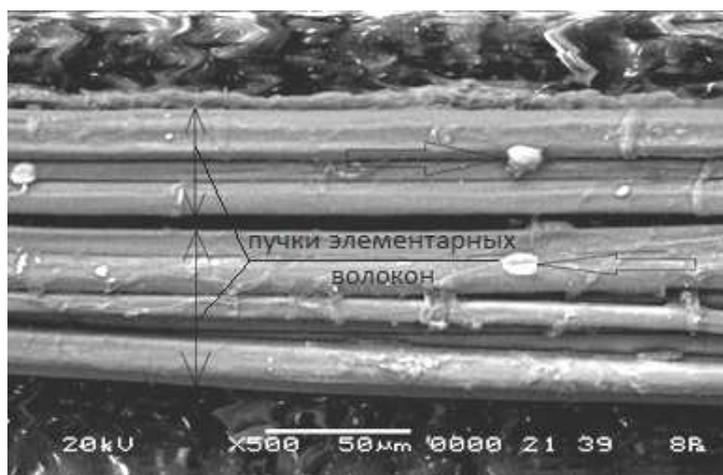
В структуре элементарного волокна различают несколько концентрически расположенных слоев, отличающихся различным светопреломлением [7]. Первая область оболочки является довольно тонкой и состоит в основном из пектиновых веществ, склеивающих клетки между собой. Состоящая из целлюлозы первичная стенка со значительным содержанием гемицеллюлозы, пектинов и часто лигнина образует следующую область. Вторичная стенка также структурирована из целлюлозы и характеризуется различными показателями светопреломления из-за меньшего количества примесей указанных веществ. В начале развития элементарные волокна представляют собой клетки округлой формы, заполненные плазменным содержимым. По мере роста соответствующей зоны данные клетки удлиняются, оболочка их сильно утолщается с внутренней стороны и достигает такой толщины, что внутренняя полость с плазменным содержимым становится заметной лишь в виде очень узкого канала. Таким образом, полученные результаты световой микроскопии по изучению строения волокна (см. рисунок 1, б) полностью подтверждают наличие пустотного канала в элементарном волокне.

Применение сканирующего электронного микроскопа позволило установить, что волокно льна состоит из пучков элементарных волокон (рисунок 2, а). На внешнем изображении волокна рамкой выделен увеличенный фрагмент (рисунок 2, б). Обозначенные стрелкой белые образования представляют собой микрофибриллы, обусловленные присутствием нецеллюлозных полисахаридов и пектина. Проведенный электронно-микроскопический анализ подтверждает морфометрические параметры элементарных воло-

кон, полученные при исследовании очеса волокна льна с помощью световой микроскопии, а также позволяет установить, что размеры пучков в диаметре составляют 50...70 мкм, при содержании в структуре от 10 до 20 элементарных волокон. Данные микроскопического анализа свидетельствуют, что из волокна льна формируется более «грубая» и менее эффективная теплоизоляционная сетчатая структура.



а



б

а – увеличение 200 крат; б – увеличение 500 крат

Рисунок 2. – Электронная микроскопия волокна льна

Теплоперенос в волокнистых материалах осуществляется за счет передачи тепла от одного волокна к другому, а также конвективным переносом воздуха, находящегося между волокнами. С уменьшением толщины волокон теплоперенос затрудняется, так как при передаче тепла от одного волокна к другому затрачивается тепловая энергия. Чем тоньше волокно, тем меньше площадь контакта между волокнами, что повышает сопротивление материала передаче тепла. Несмотря на то, что при наличии ультратонких волокон увеличивается количество контактов между ними, общая сумма площадей точек соприкосновения значительно меньше, чем площадь контактов в структуре из волокон льна. Таким образом, наилучшими теплотехническими показателями должны обладать утеплители на основе очесов волокна льна, характеризующиеся в 2...5 раз меньшей длиной и в 5...6 раз меньшим размером поперечного сечения по сравнению с волокном льна, состоящим из пучков элементарных волокон. При этом наибольшее положительное влияние на теплоизоляционные свойства льняного очеса оказывает малый диаметр элементарных волокон 8...12 мкм, сопоставимый по размерам с диаметром волокон минеральной ваты, равным 2...50 мкм [8].

Снижению теплопроводности также должно способствовать разнонаправленное в объеме расположение элементарных волокон в структуре утеплителя. Такое распределение волокон препятствует

конвективному переносу воздуха за счет уменьшения размеров тонких воздушных прослоек неправильной формы и их частичной локализации в виде отдельных замкнутых микропустот.

**Заключение.** По результатам световой микроскопии установлено, что очёсы льна представляют собой растрепанные пучки элементарных волокон, имеющих хаотически расположенные контактные соединения между собой. Такая структура обуславливает формирование сетчатого волокнистого каркаса в очесе льна. При контакте между собой очёсы образуют пространственную сетчатую тонковолокнистую систему, что создает предпосылки для получения высокоэффективного теплоизоляционного материала.

Низкая теплопроводность утеплителя будет обеспечиваться за счет отделенных друг от друга элементарных волокон, представляющих собой микротрубки диаметром 8...12 мкм с пустотным каналом диаметром 4...6 мкм, что сопоставимо с размерами полнотелых волокон минеральной ваты, обеспечивающих формирование эффективной изолирующей структуры.

На основании результатов проведенного исследования можно предположить, что существенное влияние на снижение коэффициента теплопроводности волокнистых утеплителей оказывают следующие факторы: присутствие волокон диаметром менее 20 мкм; наличие пустотных каналов в волокнах; хаотично-ориентированное в объеме расположение волокон, обеспечивающее формирование сетчатого структурного каркаса; снижение общей площади контактов волокон; уменьшение размеров и локализация микропустот в структуре утеплителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология производства [Электронный ресурс] / Сайт проекта «LinenMoscluster». – Режим доступа: [http://linen.moscluster.com/?page\\_id=43/](http://linen.moscluster.com/?page_id=43/). – Дата доступа: 01.05.2017.
2. Продукты изо льна [Электронный ресурс] / Сайт проекта «LinenMoscluster». – Режим доступа: [http://linen.moscluster.com/?page\\_id=54/](http://linen.moscluster.com/?page_id=54/). – Дата доступа: 01.05.2017.
3. ООО «АКОТЕРМ ФЛАКС» [Электронный ресурс] / Сайт компании ОАО «АкотермФлак». – Режим доступа: <http://akoterm-flaks.deal.by/>. – Дата доступа: 01.05.2017.
4. ЛЬНОВАТИН – СВОЙСТВА И СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ [Электронный ресурс] / Сайт «Тверской лен». – Режим доступа: <http://tverskoy-len.ru/lnovatin-1.shtml/>. – Дата доступа: 01.05.2017.
5. Обзор Экотеплина [Электронный ресурс] / Сайт «TutKnow.ru». – Режим доступа: <http://tutknow.ru/building/uteplenie/6610-obzor-ekoteplina.html/>. – Дата доступа: 01.05.2017.
6. Очёсы льняные из длинного льноволокна [Электронный ресурс] / Сайт компании «Flagma». – Режим доступа: <https://minsk.flagma.by/ochyosy-lyanyue-dlinnogo-lnovolokna-o1858990.html/>. – Дата доступа: 01.05.2017.
7. Рогаш, А.Р. Льноводство / А.Р. Рогаш, Н.Г. Абрамов, Я.А. Лебедев. – М. : Изд-во Колос, 1967. – 139 с.
8. Минвата. Виды и основные характеристики [Электронный ресурс] / Сайт проекта «ТеплоLiVam». – Режим доступа: <http://teplolivam.ru/yteplenie/teploizolyacionnye-materialyi/minvata-charakteristiki.html/>. – Дата доступа: 01.05.2017.

Поступила 05.06.2017

#### APPLICATION OF THE MICROSCOPIC ANALYSIS FOR ASSESSMENT OF PROSPECT OF USE OF NOILS OF FIBRE OF THE FLAX IN PRODUCTIONS OF HEAT-INSULATING MATERIAL

S. ROMANOVSKIY, A. BAKATOVICH

*Results of researches on studying of a microstructure of noil of fiber of flax with the help of a light microscope and linen fiber with application of electronic microscopy are presented. Morphometric parameters of linen fiber of noil and elementary fibers are set. The flax fiber structure as structures from the bunches of elementary fibers of cross section in size of 50...70 microns which are densely connected among themselves is defined. At a flax fiber noil research with use of an optical microscope existence of the hollow channel in elementary fiber with a diameter of 4...6 microns is confirmed. The major factors exerting positive impact on decrease in coefficient of heat conductivity of insulating material from flax noils are revealed. The possibility of formation of mesh spatial structure from elementary fibers with a diameter of 8...12 microns provides prerequisites for receiving highly effective heat-insulating material on the basis of flax noils.*

**Keywords:** light and scanning electronic microscopy, flax fiber noils, elementary fibers.

УДК 624.01+691.26

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ БЕЛАРУСИ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

*канд. техн. наук Д.В. МИХАЛЬКОВ; канд. техн. наук, доц. В.С. МИХАЛЬКОВ  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

*Рассматривается создание энергоэффективных и недорогостоящих строительных конструкций как одна из задач строительной отрасли Беларуси для строительства энергоэффективных жилых зданий, в которых низкое потребление энергии сочетается с хорошим микроклиматом. В качестве основы для получения теплоизоляционных материалов предлагается белорусский трепел. Дана краткая характеристика его месторождения, минеральный и химический составы, изучены физико-механические свойства. Проанализирована оптимизация процесса измельчения трепела, описаны конструктивные параметры дробильной установки ударного действия в технологической цепочке. Получены необходимые условия отсутствия реактивных ударных импульсов на ее вертикальный вал в соответствии с решенной математической моделью движения ударного элемента дробильной установки. Предлагаются конструкции стеновых панелей и утепления по перекрытию для использования в малоэтажном домостроении.*

**Ключевые слова:** малоэтажное домостроение, строительные конструкции, энергоэффективность, теплоизоляционные материалы, трепел, дробильная установка.

Разработка и использование энергоэффективных ограждающих конструкций для малоэтажного и крупнопанельного домостроения высокой заводской готовности – одно из направлений деятельности ученых России по новым строительным технологиям. В ЦНИИСК (Москва) разработана и запатентована технологическая линия производства пеностеклокерамики строительного и теплоизоляционного назначения на основе доступного, имеющегося практически во всех регионах России кремнийсодержащего сырья (трепела, диатомита и др.). Такой полиминерал имеется и в Республике Беларусь (Могилевская обл., г.п. Хотимск, месторождение «Стальное»).

Проблему создания массового производства материалов и конструкций нового поколения: особо легких конструкционно-теплоизоляционных бетонов, теплоизоляционных бетонов на вяжущих гидравлических или воздушного твердения, эффективного засыпного утеплителя, высокоэффективного заполнителя в тампонажных растворах для нефтяной и газовой промышленности для изготовления особо легких теплоизоляционных, штукатурных смесей и облегченных выравнивающих смесей для пола и других – можно решить, используя пеностеклокерамику.

**Краткая характеристика месторождения.** Месторождение известковых трепелов «Стальное» расположено в Хотимском районе Могилевской области. Северо-восточной частью площадь месторождения примыкает к государственной границе Российской Федерации. Общие запасы на месторождении по категориям В+С<sub>1</sub>+С<sub>2</sub> составляют 48157 тыс. м<sup>3</sup> (78015 тыс. т).

**Минеральный состав.** Трепелы месторождения «Стальное» являются сложным полиминеральным образованием, состоящим из 5-ти тонко перемешанных фаз: опал-кристобалита, рентгеноаморфного опала, цеолитов, кальцита и монтмориллонита.

Опал-кристобалит (SiO<sub>2</sub> с примесью H<sub>2</sub>O в опаловой части) – один из основных породообразующих минералов, представляющий собой структурно неупорядоченную форму низкотемпературного кристобалита. Морфологический опал-кристобалит наблюдается в виде шарообразных образований (глобулей) размером 0,001...0,005 мм, поверхность которых осложнена полиобразными отростками, размеры которых в 20...40 раз меньше размеров глобулей. Распределение опал-кристобалита в породе неравномерно и по данным рентгеновского количественного анализа составляет в среднем 25...40%. По разрезу опал-кристобалит присутствует постоянно в количестве 15...20% с небольшими (+5%) частыми колебаниями.

Рентгеноаморфный опал (SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O) дополняет опал-кристобалит в кремнеземной составляющей породы. Содержание его определялось рентгенодифрактометрическим методом (находится в пределах от 10 до 24,2%), уменьшаясь при увеличении содержания опал-кристобалита. Размеры глобулей опала составили 1...8 микрон. Суммарное содержание кремнеземных минералов в породе изменяется от 23 до 53%.

Цеолиты являются постоянной составляющей пород месторождения, их содержание колеблется от 12,4 до 20,2% при преобладающем содержании 15...19% и распределяются в породе достаточно равномерно (коэффициент вариации содержания цеолитов равен 12%).

Рентгеноструктурным анализом установлены цеолиты группы термостойкого клиноптилолита, химическая формула которого (Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Ca)<sub>3</sub>Al<sub>6</sub>Si<sub>30</sub>O<sub>72</sub>·22H<sub>2</sub>O, и гейландита Ca<sub>4</sub>Al<sub>8</sub>Si<sub>28</sub>O<sub>72</sub>·24H<sub>2</sub>O. Гейландит, в отличие от клиноптилолита, разрушается при нагревании порошка до 400 °С.

Кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ) представлен мельчайшими кристалликами неправильной, реже псевдопризматической, формы и их микроагрегатными скоплениями размером 1...20 мк, которые достаточно равномерно распределены в породе. Основная часть зерен кальцита – обломки и остатки скелетов известкового нанопланктона. Кальцит в породе присутствует постоянно, содержание его изменяется от 15 до 34% и имеет обратную зависимость от содержания опал-кристобалита.

Глинистые минералы представлены монтмориллонитом с примесью хлорита. Монтмориллонит концентрируется в самой тонкой гранулометрической фракции (менее 0,001 мм), содержание его до 20%.

Терригенный материал представлен в основном чешуйками слюды (мусковита, глауконита) – около 5%, зернами кварца и полевого шпата алевритовой размерности.

Учитывая изложенное, полезное ископаемое представляет собой композиционную смесь из 4-х кристаллических компонентов – опал-кристобалита, кальцита, клиноптилолита и монтмориллонита. Рентгеноаморфный опал распределен по всем вышеперечисленным составляющим с размером кристаллов менее 200 Å, а также определяется присутствием реального аморфного (биогенного) кремнезема. Наличие терригенного материала из-за незначительного количества не влияет на технологические свойства сырья.

Из-за сравнительно высокого содержания кальцита, трепела месторождения «Стальное» отнесены к известковым трепелам. Кроме того, они характеризуются повышенным содержанием цеолитов.

По этим признакам полезное ископаемое отличается от большинства промышленных месторождений опок и трепелов. Высокое содержание карбонатов отрицательно сказывается на возможности использования трепелов в некоторых областях их традиционного применения.

**Химический состав.** Содержание основных окислов изменяется в значительных пределах. Отмечается обратная зависимость содержания  $\text{CaO}$  от содержания  $\text{SiO}_2$ : участкам с наибольшим содержанием  $\text{SiO}_2$  соответствует наименьшее содержание  $\text{CaO}$  и наоборот. Учитывая, что участкам с максимальной величиной  $\text{SiO}_2$  и минимальными значениями  $\text{CaO}$  соответствуют наименьшие мощности полезного ископаемого, можно предположить вынос части карбонатного материала в результате карстообразующих процессов.

Количество  $\text{SiO}_2$  определяется суммой кремнезема опал-кристобалита, кремнезема рентгеноаморфного, кремнезема тонкодисперсного терригенного материала, а также кремнезема цеолитов.

От общего количества  $\text{SiO}_2$  основную часть составляет реакционно-способный  $\text{SiO}_2$ , определяющий технологические свойства известковых трепелов как активной минеральной добавки к цементу.

Сравнение химического состава наиболее чистых литологических разновидностей трепелов и опок показало его существенное различие по степени известковистости и кремнеземистости. Так, содержание  $\text{SiO}_2$  в опоках на 15% выше, чем в трепелах, а содержание  $\text{CaO}$ , наоборот, на 5...10% ниже.

Содержание  $\text{CaO}$  определяется содержанием кальцита и является нежелательным элементом в традиционных областях применения трепелов. С содержанием кальцита тесно связаны потери при прокаливании (улетучивается в основном  $\text{CO}_2$ ). В известковых трепелах среднее значение потерь при прокаливании составило 19,2%, и эта величина использовалась при пересчете количества окислов на сухое вещество по части химических анализов, проведенных на прокаленное вещество.

Величина  $\text{Al}_2\text{O}_3$  зависит главным образом от количества глинистого материала и цеолитов;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  содержится в количестве около 2%.

Трепелы характеризуются сравнительно высокими силикатными и глиноземными модулями и вне зависимости от гидравлической активности являются полезными в качестве высокосиликатной корректирующей добавки для регулирования модулей и минералогического состава клинкера.

Микроэлементы имеют фоновые значения, характерные для этой группы пород. Вредные примеси As, Cd не обнаружены, содержание фтора (F) 0,03...0,07%, свинца (Pb) – 0,0005...0,0007%, в одной пробе – 0,005%. Содержание ртути по данным атомно-адсорбционного определения в пяти пробах колеблется от 16,94 до 21,36%·10<sup>-7</sup>.

**Физико-механические свойства.** Полезное ископаемое месторождения в природном состоянии представляет собой пластичную глинистую породу с угловатыми включениями сравнительно крепкой опоки размером 2...7 см (твердость опоки по шкале Мооса – 3, трепела – 1). Естественная влажность трепела 20,7...74,1%, средняя – 56,5%. Естественная влажность в основном увеличивается с глубиной, наибольшие колебания влажности отмечаются в очень пористой и трещиноватой породе. Верхний предел пластичности трепелов – 26...84, нижний – 18...64, число пластичности 8...22. Консистенция трепелов изменяется от полутвердой до текучепластичной. Преобладающей фракцией в трепелах являются частицы менее 0,005 мм, причем содержание ее, как и других фракций, довольно выдержанное и с глубиной становится господствующим.

При высыхании известковый трепел становится полускальной породой низкой прочности. Сопротивление одноосному сжатию сухой породы в среднем 30,0 кг/см<sup>2</sup>. Средняя объемная плотность при естественной влажности 56,5% составляет 1,62 т/м<sup>3</sup>. Объемная плотность в сухом состоянии – от 0,85. Объемная масса трепела в порошке, в рыхлом состоянии, – 0,56 т/м<sup>3</sup>. Пористость трепела – 45...60%.

Коэффициент размолосопособности, определенный применительно к карбонатным породам, равен 1,2...1,3, удельные энергозатраты на помол в 2,5...3 раза ниже, чем для клинкеров цементных заводов Республики Беларусь.

#### Получение исходного продукта

Массовость применения гранулированных материалов в качестве засыпки либо легкого заполнителя для бетонов и растворов в строительстве зависит, прежде всего, от себестоимости сырья и технологических энергозатрат. В данной работе мы остановимся на особенностях измельчения трепела *в дробильной установке ударного действия в технологической цепочке*.

В таблице 1 показаны конструктивные параметры дробилок ударного действия при измельчении различных материалов.

Таблица 1. – Конструктивные параметры дробилок ударного действия

Диаметр камеры дробления, м	Диаметр ротора дробилки, м	Высота камеры дробления, м	Число ярусов ударных элементов	Число ударных элементов на ярусе	Измельчаемый материал
0,4	0,15	0,5	4	6	Гранит
		0,6	3	6	Фосфориты
		0,6	3	6	Сера
0,7	0,3	0,9	3	4	Гранит
		1,1	2	4	Известняк
		1,2	3	4	Шамот
1,0	0,4	1,2	3	4	Гранит
		1,3	2	4	Известняк
		1,2	3	4	Ванадиевый шлак

Основная задача при проектировании дробильных установок – определение рациональных параметров и количества ударных элементов, установление рациональной частоты вращения ротора дробильной установки и выбор необходимой мощности двигателя для обеспечения требуемой производительности, размеров и качества готового продукта. При этом необходимо рациональное сочетание целого ряда показателей [1].

Анализ опыта работы дробильных установок ударного действия с различными материалами, рекомендации исследований ведущих фирм-производителей из всего многообразия эксплуатируемых установок и изучение параметров данных дробильных установок показывают, что наиболее целесообразно принимать следующие основные конструктивные параметры:

- отношение диаметра камеры дробления дробилки к ее высоте 0,6...0,8;
- отношение диаметра ротора к диаметру камеры дробления 0,3...0,5;
- расстояние между соседними ярусами рабочих элементов 0,15...0,2 м;
- число рабочих элементов на каждом ярусе – четное (4, 6, 8);
- расстояние от центра вращения ротора до внутренней стенки камеры дробилки (с учетом гарантированного зазора между внутренней стенкой камеры дробилки и концом вращающегося ударного элемента) – 90% от половины диаметра камеры дробления [1, с. 128–130];
- длины всех рабочих элементов и их звеньев, масса и форма ударных элементов в пределах одного яруса назначаются одинаковыми;
- длины звеньев будут находиться в определенном соотношении с центром масс системы;
- толщина ударного элемента определяется из соображений минимального удельного износа и условиями прочности.

Горизонтальная ось плоскости рабочей поверхности ударного элемента должна проходить через центр масс системы каждого яруса дробильной установки, чтобы обеспечивать, во-первых, прямой удар, а во-вторых, снизить нагрузки на опорные подшипники вертикального вала дробильной установки. В результате постоянного контакта передней кромки ударного элемента с частицами материала происходит интенсивный ее износ и постепенное закругление, что сказывается на качестве конечного продукта. Длина ударного элемента зависит от размеров дробимого материала. Ширина ударного элемента определяется по конструктивным соображениям. Выяснено, что в процессе дробления материал в рабочей камере располагается в форме полого цилиндра. При этом коэффициент отношения внутреннего диаметра полого цилиндра к диаметру рабочей камеры постояен для всех типоразмеров дробилок при данном типе материала [2, с. 54]; определяется зависимостью как отношением зоны, в которой отсутствует материал, к диаметру дробилки.

Для определения оптимального расположения ударных элементов с целью снижения ударных нагрузок (расстояния от оси вращения дробилки до точки приложения внешнего ударного импульса) рассмотрим динамику работы роторных дробилок ударного действия с вертикальным расположением вала.

При вращении вала с ударными элементами (билами) с некоторой угловой скоростью  $\omega$  в результате столкновения бил с кусками щебня происходит удар, который вызывает в опорных точках ударные реакции, и опоры ротора испытывают ударные давления. Действие ударных сил на опоры может привести к их повреждению.

Определим условия, при которых опоры вращающегося вала с ударными элементами, соударяющимися с кусками щебня, не испытывают действия ударных сил, либо их действие незначительно.

Выбираем правую декартову систему координат  $XYZ$ : ось  $Z$  направляем по оси вращения ротора в сторону угловой скорости  $\omega$ , плоскость  $YOZ$  проводим через ось вращения и центр масс ударной системы – ротор плюс ударные элементы, т.е.  $X_C = 0$ ;  $Y_C = d \neq 0$ ;  $Z_C \neq 0$  (рисунок 1) [1, с. 45–50].

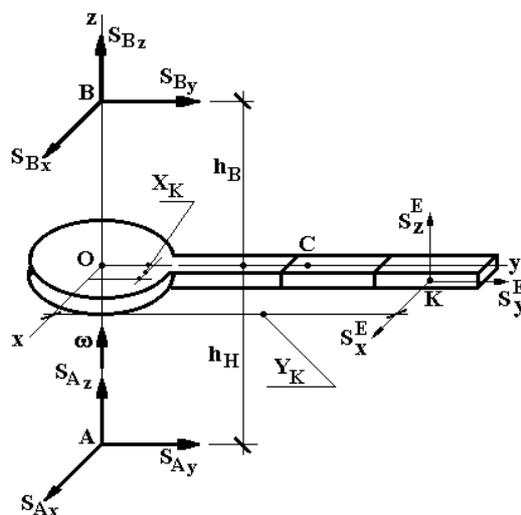


Рисунок 1. – Схема к расчету дробильной установки с вертикальным валом

Принятую систему осей, связанную с вращающейся ударной системой, считаем неподвижной, так как перемещением ударного элемента за время удара ввиду его незначительности пренебрегаем.

Действующий на ударный элемент в точке  $K$  с координатами  $(X_K; Y_K; Z_K)$  ударный импульс  $\vec{S}$  раскладываем на составляющие:  $\vec{S}_x, \vec{S}_y, \vec{S}_z$  [3; 4]. Обозначаем расстояние от опор  $A$  и  $B$  до плоскости  $XOY$  через  $h_H$  и  $h_B$ . Разложим на составляющие ударные импульсы  $\vec{S}_A$  и  $\vec{S}_B$ , приложенные к системе в опорных точках  $A$  и  $B$ :  $\vec{S}_{Ax}, \vec{S}_{Ay}, \vec{S}_{Az}$  и  $\vec{S}_{Bx}, \vec{S}_{By}$ . Результатом соударения ударного элемента с частицей материала является изменение скорости центра масс ударной системы и изменение ее кинетического момента.

Изменение скорости центра масс ударной системы определяем системой трех уравнений:

$$\begin{cases} m \cdot u_{Cx} - m \cdot v_{Cx} = \sum S_{ix}^E; \\ m \cdot u_{Cy} - m \cdot v_{Cy} = \sum S_{iy}^E; \\ m \cdot u_{Cz} - m \cdot v_{Cz} = \sum S_{iz}^E, \end{cases} \quad (1)$$

а изменение кинетического момента относительно неподвижной точки  $O$  опишем системой уравнений:

$$\begin{cases} L_x - L_x^{(O)} = \sum M_x (\vec{S}_i^E); \\ L_y - L_y^{(O)} = \sum M_y (\vec{S}_i^E); \\ L_z - L_z^{(O)} = \sum M_z (\vec{S}_i^E). \end{cases} \quad (2)$$

Угловая скорость за время удара изменится от  $\omega_o$  до  $\omega$ .

Вращательная скорость центра масс ударной системы (точка  $C$ ) параллельна оси  $X$  и направлена противоположно направлению этой оси: до удара ее значение  $V_c = \omega_o \cdot d$ ; после удара  $u_c = \omega \cdot d$  ( $d$  – расстояние до центра масс системы).

Проекции вектора угловой скорости ударной системы на оси координат:

- до удара  $\omega_{OX} = 0; \omega_{OY} = 0; \omega_{OZ} = \omega_0$ ;

- после удара:  $\omega_x = 0; \omega_y = 0; \omega_z = \omega$ .

Кинетические моменты ударной системы относительно координатных осей определяем по формулам:

$$\begin{cases} L_x^{(0)} = -I_{ZX} \cdot \omega_0; L_y^{(0)} = -I_{YZ} \cdot \omega_0; L_z^{(0)} = I_z \cdot \omega_0; \\ L_x = -I_{ZX} \cdot \omega; L_y = -I_{YZ} \cdot \omega; L_z = I_z \cdot \omega, \end{cases} \quad (3)$$

где  $I_z$  – момент инерции ударной системы относительно оси  $Z$ ;  $I_{ZX}$ ,  $I_{YZ}$  – центробежные моменты инерции системы относительно осей  $Z, X$  и осей  $Y, Z$ .

Подставим значения проекций скорости центра масс ударной системы (точка  $C$ ) и кинетических моментов ударной системы в левые части уравнений (1) и (2), а в правые части этих уравнений – проекции всех внешних ударных импульсов. После преобразования получим:

$$\begin{cases} -m \cdot d \cdot (\omega - \omega_0) = S_x^E + S_{AX} + S_{BX}; \\ 0 = S_y^E + S_{AY} + S_{BY}; \\ 0 = S_z^E + S_{AZ} + S_{BZ}; \\ -I_{ZX} \cdot (\omega - \omega_0) = S_z^E \cdot Y_K - S_y^E \cdot Z_K - S_{AY} \cdot h_H - S_{BY} \cdot h_B; \\ -I_{YZ} \cdot (\omega - \omega_0) = S_x^E \cdot Z_K - S_z^E \cdot X_K - S_{AX} \cdot h_H + S_{BX} \cdot h_B; \\ I_z \cdot (\omega - \omega_0) = S_y^E \cdot X_K - S_y^E \cdot Y_K. \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы уравнений (4) позволяет определить изменение угловой скорости ударной системы при ударе  $(\omega - \omega_0)$ , четыре проекции на оси координат реактивных ударных импульсов:  $S_{AX}$ ,  $S_{AY}$ ,  $S_{BX}$ ,  $S_{BY}$  и сумму проекций реактивных импульсов на ось вращения  $Z$ :  $S_{AZ} + S_{BZ}$ . Определим, при каких условиях эти проекции, а также ударные импульсы  $\vec{S}_A$  и  $\vec{S}_B$  равны нулю, т.е. условия, при которых удар не передавался бы на опоры. Для этого приравняем нулю все проекции реактивных импульсов  $\vec{S}_A$  и  $\vec{S}_B$  в системе уравнений (4):

$$\begin{cases} -m \cdot d \cdot (\omega - \omega_0) = S_x^E; \\ 0 = S_y^E; \\ 0 = S_z^E; \\ -I_{ZX} \cdot (\omega - \omega_0) = S_z^E \cdot Y_K - S_y^E \cdot Z_K; \\ -I_{YZ} \cdot (\omega - \omega_0) = S_x^E \cdot Z_K - S_z^E \cdot X_K; \\ I_z \cdot (\omega - \omega_0) = S_y^E \cdot X_K - S_x^E \cdot Y_K. \end{cases} \quad (5)$$

Из второго и третьего уравнений системы (5) следует, что для того, чтобы ударные реактивные импульсы на опорах были равны нулю, необходимо внешний ударный импульс направить параллельно оси  $X$ , или то же, что внешний ударный импульс должен быть направлен перпендикулярно к плоскости  $ZOY$ , проведенной через центр тяжести системы и ось вращения. При  $S_y^E = S_z^E = 0$  первое, четвертое, пятое и шестое уравнения системы уравнений (5) принимают вид

$$\begin{cases} -m \cdot d \cdot (\omega - \omega_0) = S_x^E; \\ -I_{ZX} \cdot (\omega - \omega_0) = 0; \\ -I_{YZ} \cdot (\omega - \omega_0) = S_x^E \cdot Z_K; \\ I_z \cdot (\omega - \omega_0) = -S_x^E \cdot Y_K. \end{cases} \quad (6)$$

Из четвертого уравнения системы (5) определяем, что  $I_{ZX} = 0$ .

Изменение угловой скорости ударной системы при соударении с частицей материала определим из первого уравнения системы уравнений (6):

$$\omega - \omega_o = -\frac{S_x^E}{m \cdot d}. \quad (7)$$

Из третьего и четвертого уравнений системы уравнений (6) определим координаты точки  $K$ , в которой прилагается ударный импульс  $\vec{S}^E$ :

$$\begin{cases} Z_K = -\frac{I_{YZ} \cdot (\omega - \omega_o)}{S_x^E} = -\frac{I_{YZ}}{S_x^E} \cdot \left(-\frac{S_x^E}{m \cdot d}\right) = \frac{I_{YZ}}{m \cdot d}; \\ Y_K = -\frac{I_Z \cdot (\omega - \omega_o)}{S_x^E} = -\frac{I_Z}{S_x^E} \cdot \left(-\frac{S_x^E}{m \cdot d}\right) = \frac{I_Z}{m \cdot d}. \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом, координаты точки соударения могут быть следующие: координата  $X_K$  может иметь любую величину (горизонтальные размеры била не влияют на повышение нагрузки на опоры), координаты  $Y_K$  и  $Z_K$  должны иметь следующие значения:

$$Y_K = \frac{I_Z}{m \cdot d}; \quad Z_K = \frac{I_{YZ}}{m \cdot d}. \quad (9)$$

Из совокупности параллельных осей ось, проходящая через центр масс тела, характеризуется наименьшим моментом инерции (теорема Штайнера о зависимости моментов инерции тела относительно параллельных осей, одна из которых проходит через центр тяжести), можно записать  $I_Z = I_{CZ} + m \cdot d^2$ , поэтому выражение для  $Y_K$  из (9) можно переписать следующим образом:

$$Y_K = \frac{I_{CZ}}{m \cdot d} + d, \quad (10)$$

соответственно,  $Y_K > d$ .

Это значит, что проекция точки  $K$  (точки приложения внешнего ударного импульса) на плоскость  $YOZ$  должна находиться от оси вращения дальше, чем центр масс  $C$  ударной системы.

Таким образом, мы получили необходимые условия отсутствия реактивных ударных импульсов на ось вращения, а именно:

- внешний ударный импульс должен быть направлен перпендикулярно к плоскости, проведенной через центр тяжести и ось вращения  $Oz$  ( $S_y = S_z = 0$ );

- центробежный момент инерции вращающегося тела относительно оси вращения и оси, проходящей через ось вращения тела и его центр тяжести, должен быть равен нулю ( $I_{yz} = 0$ );

- две координаты точки приложения внешнего ударного импульса определяются формулами:

$$Y_K = \frac{I_{Cz}}{m \cdot d} + d; \quad Z_K = \frac{I_{YZ}}{m \cdot d};$$

- третья координата может быть взята произвольно.

Если выбрать начало координат так, чтобы  $Z_K = 0$ , тогда из формулы  $Z_K = \frac{I_{YZ}}{m \cdot d}$  следует, что  $I_{yz} = 0$  и ее координата определяется по формуле (10).

Если известен радиус инерции тела  $\rho$  относительно оси вращения, момент инерции  $I_{yz}$  может быть представлен как  $I_{yz} = m \cdot \rho^2$ , тогда положение точки приложения ударного импульса определится координатой  $Y_K = \frac{\rho^2}{d}$ . Точка  $K$ , через которую проходит линия ударного импульса, не вызывающего ударных реактивных импульсов в подшипниках вертикального вала, и есть центр удара.

На производительность дробилки существенно влияют условия подачи исходного материала и его крупность. Наибольшая производительность дробильной установки достигается при такой нагрузке, когда в зону работы ударных элементов постоянно подается исходный материал. Однако при этом в загрузочном окне может накапливаться исходный материал, что приводит к неритмичной работе дробилки. Крупность исходного материала не должна превышать значений, при которых происходит затрудненное перемещение материала в камере, возможно заклинивание камней и образование свода.

Чаще всего производительность дробильных установок ударного действия определяют либо экспериментальным путем, либо аналитическим. Эмпирические зависимости учитывают влияние выбранных параметров, но не отражают физической сути происходящих процессов. Из-за сложности определения степени влияния каждого параметра, число выбранных параметров не превышает трех. Данные формулы дают приемлемый результат для ряда машин, у которых степень влияния на производительность не учитываемых в формуле параметров приблизительно равна, т.е. их применение требует соблюдения определенных условий. Более точный результат дают аналитические формулы, которые учитывают не только влияющие параметры и степень их влияния, но и их взаимосвязь. Влияние большого количества факторов, не позволяющих инженерными методами определить производительность, учитывают поправочными коэффициентами, которые получают экспериментально.

Производительность дробилки определяется рядом последовательных операций разрушения и перемещения материала к разгрузочному окну. Максимальная производительность наблюдается, когда после первого контакта ударного элемента с частицей материала, последняя полностью удаляется из камеры дробления. В этом процессе участвуют и вертикальные отражательно-просеивающие решетки. Но при этом всегда существует вероятность, что частица материала не проникнет или недостаточно глубоко проникнет в рабочую зону ударных элементов, поэтому некоторая доля частиц материала не будет раздроблена. Это увеличивает долю недоизмельченного материала, который приходится дополнительно перерабатывать. На стадии предварительного расчета производительность можно определить по формуле

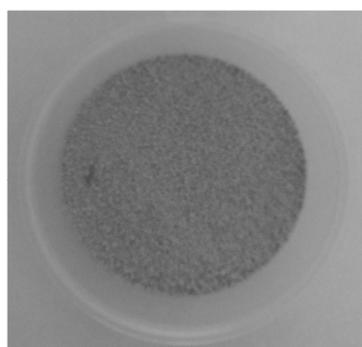
$$Q = 3600 \cdot \gamma_m \cdot A \cdot V \cdot K_m \cdot K_k, \quad (11)$$

где  $\gamma_m$  – плотность материала, т/м<sup>3</sup>;  $A = \frac{\pi \cdot (D-d)^2}{4}$  – площадь истечения материала в камере дробления, м<sup>2</sup>;

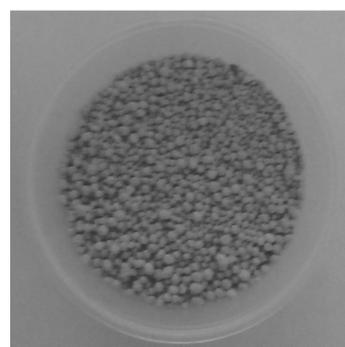
$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{120} \cdot (1 + K_1)$  – линейная скорость ударных элементов, м/с;

**Внешний вид пеностеклокерамики на основе белорусского трепела.** Последовательность технологических операций по производству изложена в монографии Б.К. Демидовича [5] и в целом не изменилась до настоящего времени. Глубокая химическая переработка описана в [6], поэтому в представляемой нами работе подробно рассматриваться эти вопросы не будут.

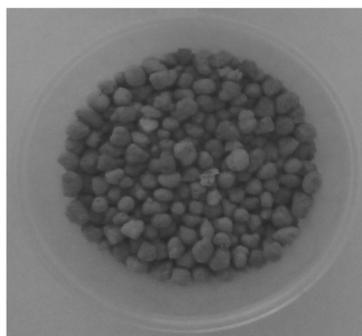
Разработана «сухая» технология получения гранулированной пеностеклокерамики различного фракционного состава, внешний вид которого показан на рисунке 2.



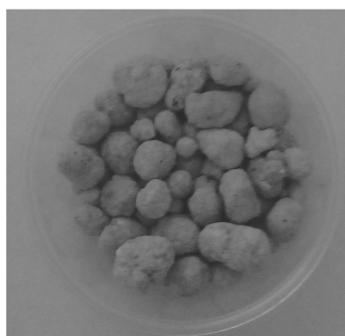
фракция 0,25...1,0 мм,  
плотность 400 кг/м<sup>3</sup>



фракция 1,0...2,5 мм,  
плотность 300 кг/м<sup>3</sup>



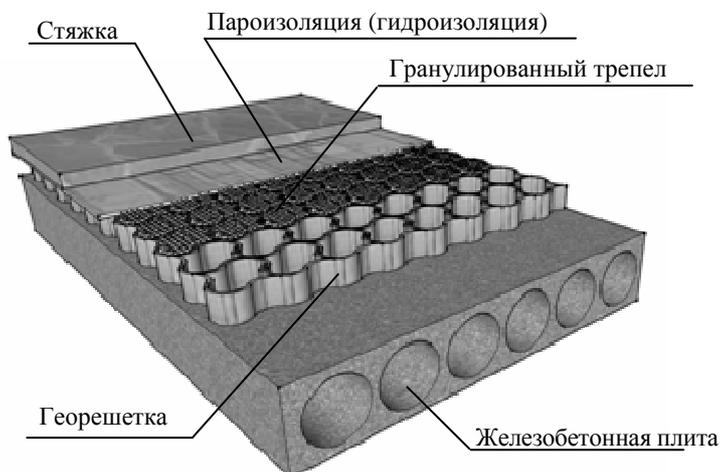
фракция 2,5...5,0 мм,  
плотность 260 кг/м<sup>3</sup>



фракция 5,0...15,0 мм,  
плотность 180 кг/м<sup>3</sup>

**Рисунок 2. – Пеностеклокерамика на основе белорусского трепела**

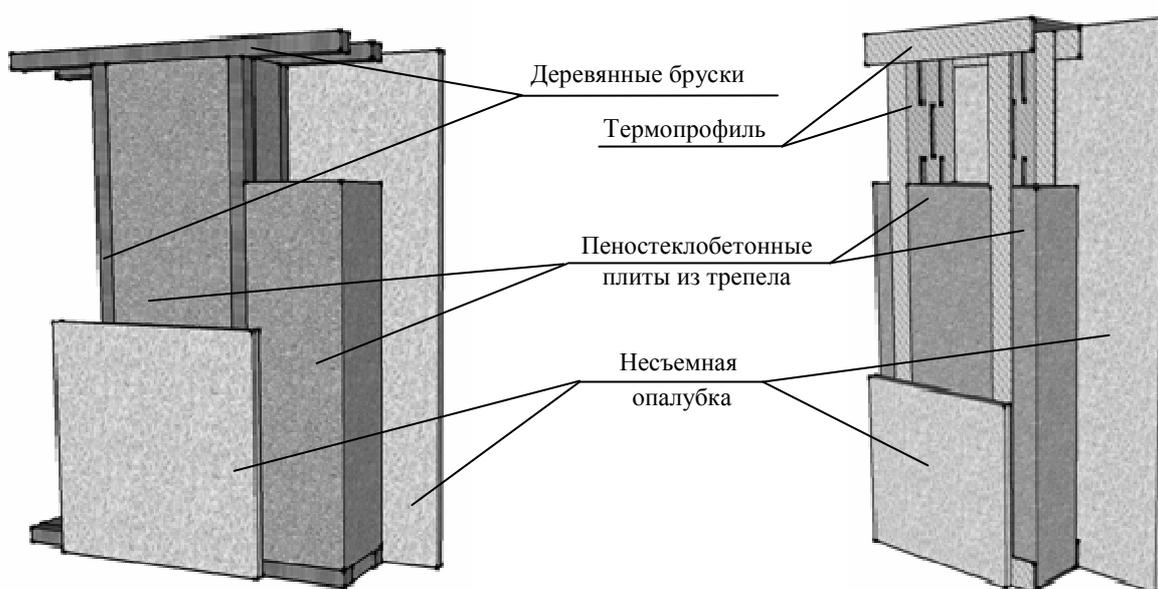
**Область применения.** На рисунке 3 показан конструктивный вариант применения гранулированного трепела при утеплении перекрытий над подвалом и чердачных неотапливаемых перекрытий. На нагружаемый пол, основанием которого служит плита перекрытия, укладывается георешетка, в ячейки которой укладывается гранулированный трепел, на него внахлест укладывается пленка, которая будет служить гидроизолятором. Поверх пленки делается стяжка. Стяжка плавающего пола отделяется от стен тонким слоем утеплителя (демпфером). Сухую стяжку укрывают пароизолятором и стелют основание для чистового пола.



**Рисунок 3. – Конструкция системы утепления перекрытия по железобетонным плитам**

Гранулированный трепел в качестве теплоизоляционного материала может применяться при утеплении перекрытия по деревянным балкам с подшивкой досками или ориентированной стружечной плитой.

Конструкция стеновых панелей с утеплителем из пеностеклобетонных плит на основе трепела представлена на рисунке 4. Основным элементом является унифицированная панель из гранулированного трепела месторождения «Стальное». Каждая панель имеет несущий каркас, выполненный из оцинкованного металлического профиля либо деревянных брусков. Жесткость в каркасе дополнительно обеспечивается применением ограждающих панелей несъемной опалубки. Стеновая панель имеет размеры: 600 и 1200 мм по ширине; 2400, 2700, 3000 мм по высоте, что позволяет оптимизировать ее применение в соответствии со строительной модульной системой. Удельный вес панелей составляет 700...800 кг/м<sup>3</sup>.



**Рисунок 4. – Принципиальные конструкции стеновых панелей с эффективным утеплителем для малоэтажного домостроения**

**Заключение**

В настоящее время исследование и оптимизация составов гранулированной и блочной пеностеклокерамики продолжаются. Завершено строительство промышленной линии по производству трепела. Ведется подбор и оптимизация параметров технологического оборудования.

Получены следующие характеристики пеностеклокерамики:

- фракционный состав вспененного гранулята – 0,25...15 мм с возможностью регулирования преобладающей фракции;

- насыпная плотность – 180...400 кг/м<sup>3</sup>;

- прочность на сжатие в цилиндре – 0,5...2,5 МПа;

- объемное водопоглощение – не более 2%;

- экологичность и пожарная безопасность конечного продукта.

Гранулированная пеностеклокерамика на основе трепела – один из наиболее эффективных, долговечных и безопасных насыпных теплоизоляционных материалов. Расчетная себестоимость 1 м<sup>3</sup> материала может быть уменьшена не менее чем на 20...30% за счет удешевления сырьевой составляющей, сокращения числа и оптимизации технологических операций, оптимального подбора технологического, в первую очередь дробильного оборудования.

Все указанное выше создает предпосылки для массового применения белорусской пеностеклокерамики в строительстве.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Михальков, Д.В. Обоснование параметров дробилки ударного действия для получения материалов узкофракционного гранулометрического состава : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Д.В. Михальков. – Минск, 2003. – 186 с.
2. Абушкевич, А.А. Энергосберегающий помольный комплекс для цементного клинкера на основе роторно-цепного предизмельчителя и трубной мельницы : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / А.А. Абушкевич. – Белгород, 2000. – 142 с.
3. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики : учеб. для вузов / А.А. Яблонский. – изд. 5-е, испр. – М. : Высш. шк., 1977. – Ч. II : Динамика. – 532 с.
4. Никитин, Н.Н. Курс теоретической механики : учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец вузов / Н.Н. Никитин. – 5-е изд, перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 607 с.
5. Демидович, Б.К. Производство и применение пеностекла / Б.К. Демидович. – Минск : Наука и техника, 1972. – 304 с.
6. Мелконян, Р.Г. Аморфные горные породы и стекловарение / Р.Г. Мелконян. – М. : НИИ Природа, 2002. – 266 с.

Поступила 29.03.2017

**ANALYSIS OF POSSIBILITY OF USE OF RAW MATERIALS  
OF BELARUS FOR OBTAINING ENERGY-EFFICIENT BUILDING DESIGN**

**D. MIKHALKOV, V. MIKHALKOV**

*Creating energy efficient and inexpensive building constructions is one of the tasks of the construction industry of Belarus for the construction of energy-efficient homes, where low power consumption is combined with a good climate is considered. As a basis for thermal insulation materials the Belarusian tripoli is proposed. A brief description of the field, the mineral and chemical composition, studied the physical and mechanical properties is given. The optimization process of grinding and tripoli design parameters described crusher impact in the processing chain is considered. The necessary conditions for the absence of reactive shock pulses in the vertical shaft crusher in accordance with the decision of the mathematical model of movement of the impactor crusher. Construction of wall panels and insulation to cut off for use in low-rise housing construction are proposed.*

**Keywords:** low rise building construction, building construction, energy efficiency, thermal insulation materials, tripoli, impactor crusher.

УДК 691.327

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПОРОВОЙ СРЕДЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ «ВНУТРЕННЕГО УВЛАЖНЕНИЯ»****В.В. КРАВЧЕНКО***(Брестский государственный технический университет)*

*Рассматриваются основные положения по моделированию основных параметров состояния поровой среды цементного камня в процессе твердения, учитывая применение метода «внутреннего увлажнения» структуры цементного камня, с использованием предварительно насыщенного пористого заполнителя. Показаны результаты моделирования по указанной проблематике, такие как изменение радиуса капиллярных пор с мениском, относительной влажности в поровой среде, порового давления в процессе твердения.*

**Ключевые слова:** цементный камень, самовысыхание, внутреннее увлажнение, пористый заполнитель, относительная влажность, поровое давление.

**Введение.** В настоящее время механизмы аутогенной усадки изучены недостаточно, в научном сообществе существует только общее согласие о взаимосвязи между аутогенной усадкой и изменением относительной влажности в поровой среде цементного камня, которое базируется на феноменологических представлениях. По данным [1], аутогенная усадка развивается в изолированных изотермических цементных системах, поэтому она практически не проявляется в традиционных бетонах или, по крайней мере, она весьма незначительна по сравнению с физической усадкой. Вместе с тем ее влияние ощутимо в высококачественных бетонах, имеющих плотную структуру с низкой проницаемостью. Особенно это заметно в высококачественных бетонах, применяемых для изготовления сталетрубобетонных элементов, в которых контакт бетонного ядра с окружающей средой практически отсутствует.

В изолированной цементной системе аутогенная усадка является следствием развития химической усадки, возникающей в процессе гидратации цемента, поскольку большая часть химической усадки преобразуется в полые поры внутри структуры твердеющего цементного камня, пространство которых заполнено газообразной фазой – смесью водяного пара и воздуха. Появление газообразной фазы в поровой среде цементного камня приводит к формированию менисков на поверхности раздела жидкой и газообразной фаз, что, в свою очередь, приводит к возникновению в поровой среде капиллярного давления, рассматриваемого в качестве основной причины возникновения аутогенной усадки. Процесс химической усадки сопровождается постепенным уменьшением относительной влажности в поровой структуре цементного камня, так называемым процессом «самовысыхания» структуры цементного камня (англ. – self-desiccation) [1; 2]. Для предотвращения процесса «самовысыхания» и связанного с ним проявления аутогенной усадки в течение нескольких десятков лет успешно развивается и имеет опыт практического применения метод «внутреннего увлажнения» структуры бетона (англ. – internal curing). Основная суть метода «внутреннего увлажнения» заключается во введении в твердеющую структуру цементного камня специальных резервуаров дополнительной воды, не являющейся частью воды затворения, которая затем в процессе гидратации мигрирует в поровую среду цементного камня и заполняет его обезвоженные поры, предотвращая тем самым процесс «самовысыхания».

В данной работе рассматриваются положения предлагаемой модели, позволяющей прогнозировать основные параметры состояния поровой среды цементного камня в процессе твердения, с учетом применения метода «внутреннего увлажнения», где в качестве резервуаров дополнительной воды используется предварительно насыщенный водой пористый заполнитель.

**Геометрическая модель поровой структуры цементного камня.** В основе принятой геометрической модели пор лежат положения о строении поровой структуры цементного камня, представленные в работах К. Маекава и других [3; 4].

Согласно модели К. Маекава и других авторов, общая пористость цементного камня рассматривается как сумма объемов капиллярных пор, пор геля и межслоевых пор геля, которая в виде математической зависимости определяется следующим образом:

$$\phi_t = \phi_c + \phi_g + \phi_{lr}, \quad (1)$$

где  $\phi_t$ ,  $\phi_c$ ,  $\phi_g$ ,  $\phi_{lr}$  – соответственно относительный объем общей, капиллярной, гелевой и межслоевой пористости в цементной матрице.

Поскольку свойства материала, обусловленные его пористостью, зависят не только от общего объема пор, но и от строения порового пространства, модель поровой структуры должна отражать характер распределения пор по размерам.

Распределение пор по размерам для капиллярных и гелевых пор в модели К. Маекава и других предложено аппроксимировать по упрощенным функциям распределения Raleigh – Ritz (рисунок 1):

$$V_i = 1 - \exp[-B_i \cdot r]; \quad (2)$$

$$dV_i = B_i \cdot r \cdot \exp[-B_i \cdot r] \cdot d \ln r, \quad (3)$$

где  $V_i$  – объемная доля пористости, ограниченная заданным размером пор [-];  $B_i$  – параметр распределения пористости;  $r$  – размер (радиус) пор.

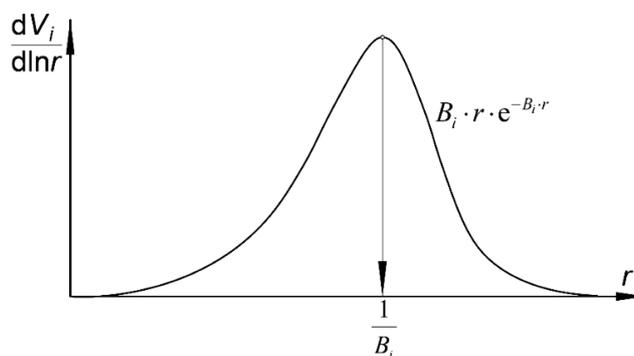


Рисунок 1. – Вид функции дифференциального распределения пор в модели К. Маекава и других авторов

Параметр распределения  $B_i$  характеризует расположение (координату) пика (экстремума) дифференциальной кривой на логарифмической шкале радиусов пор.

Параметр распределения  $B_i$  определяется по методике, указанной в [3; 4].

**Водный баланс в твердеющей структуре цементного камня.** В гидратирующей цементной системе вода может быть разделена на три состояния:

- химически связанная вода;
- физически связанная (адсорбированная) вода;
- свободная (капиллярная) вода.

В твердеющей цементной системе количество химически связанной воды зависит от вида и механизма химических реакций, наиболее характерных для основных клинкерных минералов цементных систем, а также степени гидратации и первоначального объема каждого клинкерного минерала.

На основании стехиометрических расчетов зависимость для определения химически связанной воды в произвольный момент времени имеет следующий вид:

$$V_{w,ne} = \sum_{j=1}^{n_c} \left( \frac{n_w}{n_{cl,n}} \cdot \frac{M_w}{M_{cl,n}} \cdot \frac{\rho_{cl,n}}{\rho_w} \cdot V_{cl,n}^0 \cdot \alpha_{cl,n} \right)_j, \quad (4)$$

где  $V_{w,ne}$  – относительный объем химически связанной воды в цементной матрице;  $M_w$  – молярная масса воды;  $M_{cl,n}$  – молярная масса  $n$ -го клинкерного минерала ( $n \in \{C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, CA\}$ );  $\rho_{cl,n}$  – плотность  $n$ -го клинкерного минерала;  $\rho_w$  – плотность воды;  $\frac{n_w}{n_{cl,n}}$  – соотношение стехиометрических коэффициентов воды и  $n$ -го клинкерного минерала;  $V_{cl,n}^0$  – начальный относительный объем  $n$ -го клинкерного минерала в цементной матрице;  $\alpha_{cl,n}$  – степень гидратации  $n$ -го клинкерного минерала;  $n_r$  – количество химических реакций, описывающих процесс гидратации цементной системы.

Другой подход к определению химически связанной воды основан на экспериментальных данных, полученных в процессе гидратации цемента различными исследователями.

Так, по данным Т. Powers и Т. Brownyard [5], количество химически связанной воды в полностью прогидратировавшей цементной системе составляет примерно 0,23 г/г количества прореагировавшего цемента. Для прогнозирования степени гидратации отдельного портландцементного клинкерного минерала используется модель, предложенная L. Parrot и D. Killoh [6; 7]. Для прогнозирования степени гидратации клинкерного минерала СА используется модель, предложенная N. Ukrainczyk и др. [8].

Начальный относительный объем  $n$ -го клинкерного минерала в цементе определяется по следующей зависимости:

$$V_{cl,n}^0 = \left[ \frac{m_{cl,n}}{\rho_{cl,n}} \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{4(5)} m_{cl,j}} \right] \cdot V_{c,0}, \quad (5)$$

где  $V_{c,0}$  – начальный относительный объем цемента в цементной матрице;  $m_{cl,n}$  – массовая доля отдельного  $n$ -го клинкерного минерала в цементе.

Массовые доли клинкерных минералов определяются исходя из минералогического состава используемого цемента, либо исходя из химического состава, используя одну из существующих моделей расчета минералогического состава, например, самую распространенную модель R. Vague [9].

Начальный относительный объем цемента в цементной матрице определяется исходя из суммарного объема цемента и воды затворения, содержащихся в цементной системе:

$$V_{c,0} + V_{w,0} = V_{c,0} \cdot \left( 1 + \frac{V_{w,0}}{V_{c,0}} \right) = 1; \quad (6)$$

$$V_{c,0} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_w} \cdot \frac{B}{C}}, \quad (7)$$

где  $V_{w,0}$  – начальный относительный объем воды в цементной матрице;  $\rho_c$  – плотность цемента;  $\frac{B}{C}$  – водоцементное отношение.

Количество воды цементного геля определяется из предположения, что вода заполняет весь объем пор частиц цементного геля, т.е. фактически объем воды цементного геля равен объему гелевой пористости:

$$V_{w,g} = V_{CSH}^{LD} \cdot \phi_{CSH}^{LD} + V_{CSH}^{HD} \cdot \phi_{CSH}^{HD}, \quad (8)$$

где  $V_{w,g}$  – относительный объем воды цементного геля в цементной матрице;  $V_{CSH}^{LD}$  – относительный объем цементного геля низкой плотности в цементной матрице;  $V_{CSH}^{HD}$  – относительный объем цементного геля высокой плотности в цементной матрице;  $\phi_{CSH}^{LD}$  – пористость геля низкой плотности;  $\phi_{CSH}^{HD}$  – пористость геля высокой плотности.

Относительный объем цементного геля низкой и высокой плотности определяется на основании стехиометрических расчетов по уравнениям химических реакций в принятой модели гидратации цемента.

По данным [10], пористость цементного геля низкой плотности составляет 37,3%, высокой плотности 23,7%.

Количество адсорбированной воды зависит от значения относительной влажности в поровой среде цементного камня.

Относительная влажность поровой среды – отношение равновесного давления пара в поровой среде к давлению насыщенного пара:

$$RH = \frac{p_g}{p_{g,s}}, \quad (9)$$

где  $RH$  – относительная влажность поровой среды цементного камня;  $p_g$  – равновесное давление пара в поровой среде;  $p_{g,s}$  – давление насыщенного пара.

Количество адсорбированной воды можно определить по следующей зависимости:

$$V_{w,ads} = \delta_{ads} \cdot A_{ads}, \quad (10)$$

где  $V_{w,ads}$  – относительный объем адсорбированной воды в цементной матрице;  $\delta_{ads}$  – толщина слоя адсорбированной воды;  $A_{ads}$  – относительная площадь поверхности адсорбирующих пор.

Для определения толщины слоя адсорбированной воды как функции относительной влажности поровой среды принята зависимость (11), предложенная в работе [11], которая выведена на основе положений теории полимолекулярной адсорбции (англ. Brunauer – Emmett – Teller theory).

$$\delta_{ads} = \frac{5,25 \cdot 10^{-9} \cdot RH}{\left(1 - \frac{RH}{RH_{S_{w,p}=1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{RH}{RH_{S_{w,p}=1}} + 15 \cdot RH\right)}, \quad (11)$$

где  $RH_{S_{w,p}=1}$  – относительная влажность, соответствующая полностью насыщенным влагой порам.

В практических расчетах величину относительной влажности, соответствующей полностью насыщенным влагой порам, можно принять равной 100%. Толщина адсорбционного слоя воды, полученная по результатам испытаний, проведенных в работе [12], составляет примерно  $3\text{ \AA}$  при  $RH = 20\%$  и  $18\text{ \AA}$  при  $RH = 100\%$ , исходя из чего можно сделать вывод, что толщина адсорбированного слоя воды уменьшается с уменьшением значения относительной влажности.

Свободная вода – вода, заключенная в капиллярах и ограниченная менисками, за исключением очень тонкого слоя воды, адсорбционно связанного со стенками капилляра. В произвольный момент времени количество свободной воды можно определить исходя из баланса объемов воды, находящихся в твердеющей цементной системе:

$$V_{w,c} = V_{w,0} - V_{w,ne} - V_{w,g} - V_{w,ads}, \quad (12)$$

где  $V_{w,0}$  – начальный относительный объем воды в цементной матрице;  $V_{w,c}$  – относительный объем свободной воды в цементной матрице.

Начальное объемное содержание воды в цементной системе определяется по следующей зависимости:

$$V_{w,0} = 1 - V_{c,0}. \quad (13)$$

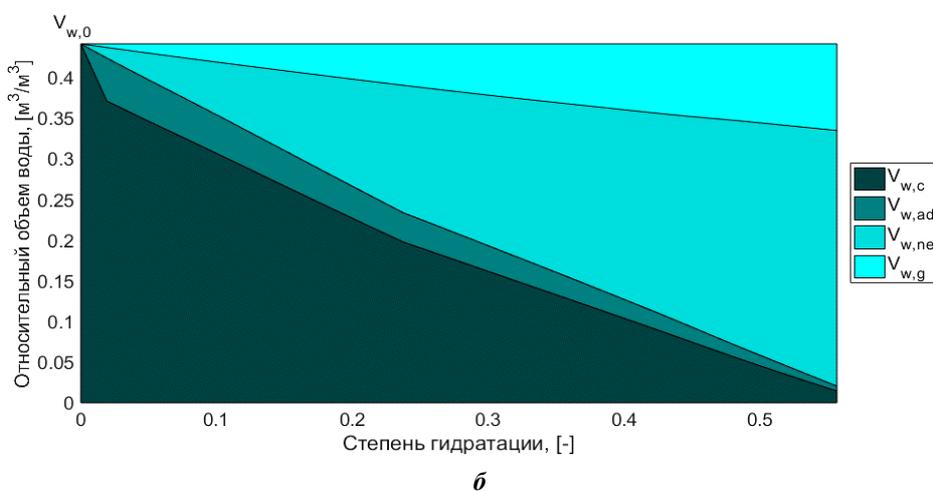
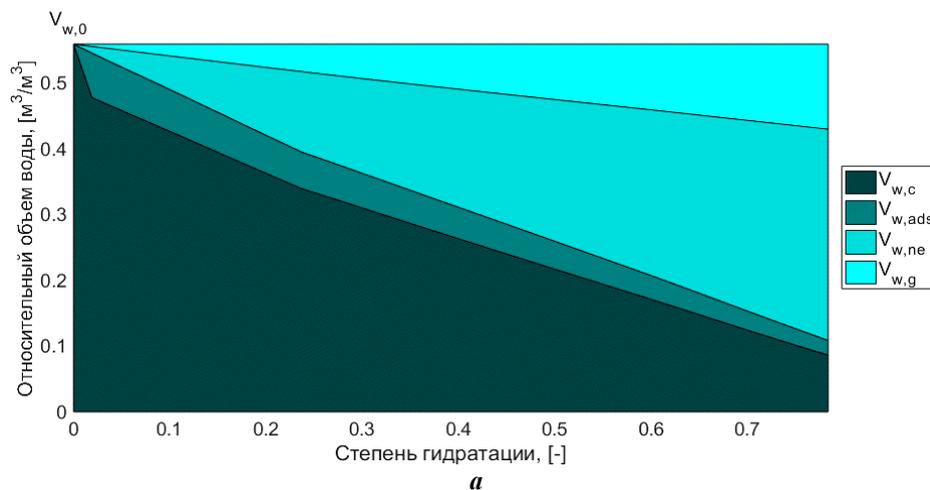


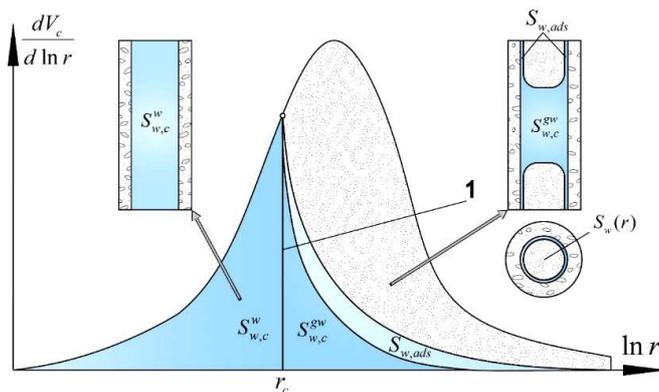
Рисунок 2. – Изменение объемного содержания воды в цементном камне при В/Ц = 0,4 (а) и В/Ц = 0,25 (б) (время твердения 0...100 сут, определено по исходным данным [13])

### Моделирование параметров термодинамического состояния поровой среды цементного камня.

Основными параметрами термодинамического состояния в поровой среде цементного камня являются: относительная влажность, размер (радиус) капилляра с мениском и толщина слоя адсорбированной воды.

Для выполнения условия термодинамического равновесия в поровой структуре цементного камня в произвольный момент времени все поры размером (радиусом) меньше, чем  $r_c$ , будут полностью заполнены свободной водой, остальная часть объема пор будет заполнена свободной, адсорбированной водой и газом [3; 4] (рисунок 3).

С увеличением степени гидратации координата раздела фаз будет смещаться в сторону уменьшения значения  $r_c$ .



1 – граница раздела фаз «жидкость – газ»

Рисунок 3. – Распределение воды в поровом пространстве цементного камня

Степень насыщения капиллярных пор влагой исходя из условия термодинамического равновесия в поровой структуре определяется по следующей зависимости:

$$S_{w,p} = S_{w,c}^w + S_{w,c}^{g,w} + S_{w,ads}, \quad (14)$$

где  $S_{w,c}^w$  – объемная доля поровой влаги, полностью заполняющей капиллярные поры;  $S_{w,c}^{g,w}$  – объемная доля поровой влаги, частично заполняющей капиллярные поры;  $S_{w,ads}$  – объемная доля поровой влаги, адсорбированной на стенках капилляров.

Объемную долю поровой влаги, полностью заполняющей капиллярные поры, можно определить исходя из дифференциальной функции распределения капиллярной пористости [3; 4]:

$$S_{w,c}^w = \int_0^{r_c} \frac{dV_c}{d \ln r} \cdot d \ln r = \int_0^{r_c} dV_c, \quad (15)$$

где  $r_c$  – радиус капилляра с мениском;  $\frac{dV_c}{d \ln r}$  – дифференциальная функция распределения капиллярной пористости.

Объемная доля поровой влаги, частично заполняющей капиллярные поры, по данным [3; 4], может быть определена в зависимости от объемной доли, полностью заполняющей капиллярные поры:

$$S_{w,c}^{g,w} = -S_{w,c}^w \cdot \ln(S_{w,c}^w). \quad (16)$$

В свою очередь, объемная доля поровой влаги, адсорбированной на стенках капилляров, по данным [3; 4] определяется в зависимости по степени заполнения влагой обезвоженных пор:

$$S_{w,ads} = \int_{r_c}^{\infty} S_w(r) \cdot dV_c, \quad (17)$$

где  $S_w(r)$  – степень заполнения влагой пор размером (радиусом)  $r$ .

Степень заполнения влагой обезвоженных капиллярных пор определяется по зависимости [3; 4]:

$$S_w(r) = 1 - \left( \frac{r - \delta_{ads}}{r} \right)^2 \approx \frac{2 \cdot \delta_{ads}}{r}, \quad (18)$$

где  $r$  – радиус единичной обезвоженной поры.

После подстановки (18) в (17) зависимость для определения значения  $S_{w,ads}$  примет следующий вид:

$$S_{w,ads} = 2 \cdot \delta_{ads} \cdot \int_{r_c}^{\infty} \frac{dV_c}{r}. \quad (19)$$

Исходя из баланса фаз, заполняющих поровое пространство цементной матрицы, степень насыщения капиллярных пор влагой – это отношение количества жидкой фазы, находящейся в поровом пространстве (свободной и адсорбированной воды, а также дополнительной воды, полученной в результате внутреннего увлажнения) к общему объему пор:

$$S_{w,p} = \frac{(V_{w,c} + V_{w,ads}) + V_{w,ic}}{\phi_c}, \quad (20)$$

где  $V_{w,ic}$  – относительный объем дополнительной воды.

В произвольный момент времени относительный объем капиллярной пористости также можно определить исходя из объемов фаз, заполняющих поровую структуру цементного камня – свободной, адсорбированной воды и газа (см. рисунок 3):

$$\phi_c = V_{w,c} + V_{w,ads} + V_g, \quad (21)$$

где  $V_g$  – относительный объем газообразной фазы в цементной матрице.

В начальный момент времени (в момент затворения водой) объем капиллярной пористости равен начальному относительному объему воды в цементной системе.

В произвольный момент времени суммарный объем свободной и адсорбированной воды можно определить исходя из уравнения баланса объемов воды (12):

$$V_{w,c} + V_{w,ads} = V_{w,0} - V_{w,ne} - V_{w,g}. \quad (22)$$

Принимая объем газообразной фазы, заполняющей обезвоженные поры, равным объему химической усадки, получаем окончательную зависимость для определения объема капиллярной пористости:

$$\phi_c = (V_{w,0} - V_{w,ne} - V_{w,g}) + \epsilon_{ch}, \quad (23)$$

где  $\epsilon_{ch}$  – относительный объем химической усадки в цементной матрице.

Относительный объем химической усадки в цементной матрице определяется как

$$\epsilon_{ch} = \sum_{n=1}^{4(5)} \epsilon_{ch,n} \cdot V_{cl,n}^0 \cdot \alpha_{cl,n}, \quad (24)$$

где  $\epsilon_{ch,n}$  – величина химической усадки  $n$ -го клинкерного минерала.

Величина химической усадки  $n$ -го клинкерного минерала – отношение разности молярных объемов реагентов и продуктов гидратации к молярному объему клинкерного минерала, с учетом стехиометрических коэффициентов, определенных из соответствующей химической реакции, в которой участвует данный клинкерный минерал.

Поскольку в поровой среде цементного камня находится не вода, а фактически водный раствор различных солей, то фактическая относительная влажность в поровой среде цементного камня будет отличаться от относительной влажности, определяемой на основании классического уравнения закона Кельвина.

На основании положений классической теории термодинамики, используя физические законы Рауля и Кельвина, можно получить зависимость для определения фактической относительной влажности в поровой среде [2; 14]:

$$\ln \left( \frac{RH}{a_w} \right) = - \frac{2 \cdot \gamma_{12}(T) \cdot M_w}{r_m \cdot \rho_w \cdot R \cdot T}; \quad (25)$$

$$r_m = r_c - \delta_{ads}, \quad (26)$$

где  $\gamma_{12}$  – поверхностное натяжение воды на границе раздела фаз «жидкость – газ»;  $r_m$  – радиус мениска;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – фактическая температура окружающей среды;  $a_w$  – активность воды в растворе.

При низких концентрациях ионов в растворе активность воды может быть определена по следующей зависимости:

$$a_w = \frac{C_w}{C_w + \sum_i C_i}, \quad (27)$$

где  $C_w$  – молярная концентрация воды;  $C_i$  – молярная концентрация  $i$ -го растворенного иона.

Молярные концентрации основных ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , содержащихся в поровой жидкости, можно определить по методике, указанной в [15].

Для определения поверхностного натяжения воды на границе раздела фаз «жидкость – газ» принята следующая зависимость [16]:

$$\gamma_{12}(T) = 235,8 \cdot \left(1 - \frac{T}{647,096}\right)^{1,256} \cdot \left(1 - 0,625 \cdot \left(1 - \frac{T}{647,096}\right)\right) \cdot 10^{-3}. \quad (28)$$

Поочередно подставляем (15) в (16), затем (15), (16), (17) в (14), после чего из (21) и (23) получаем выражение  $V_{w,c} + V_{w,ads} = \phi_c - \varepsilon_{ch}$ , которое подставляем в (20) и окончательно получим следующее уравнение термодинамического равновесия в поровой среде цементного камня:

$$\left(\int_0^{r_c} dV_c\right) \cdot \left(1 - \ln\left(\int_0^{r_c} dV_c\right)\right) + 2 \cdot \delta_{ads} \cdot \int_{r_c}^{\infty} \frac{dV_c}{r} = 1 - \frac{\varepsilon_{ch} - V_{w,ic}}{\phi_c}. \quad (29)$$

Уравнение (29) совместно с зависимостями (11) и (25) образуют систему уравнений для определения необходимых параметров термодинамического состояния в поровой среде цементного камня (рисунок 4).

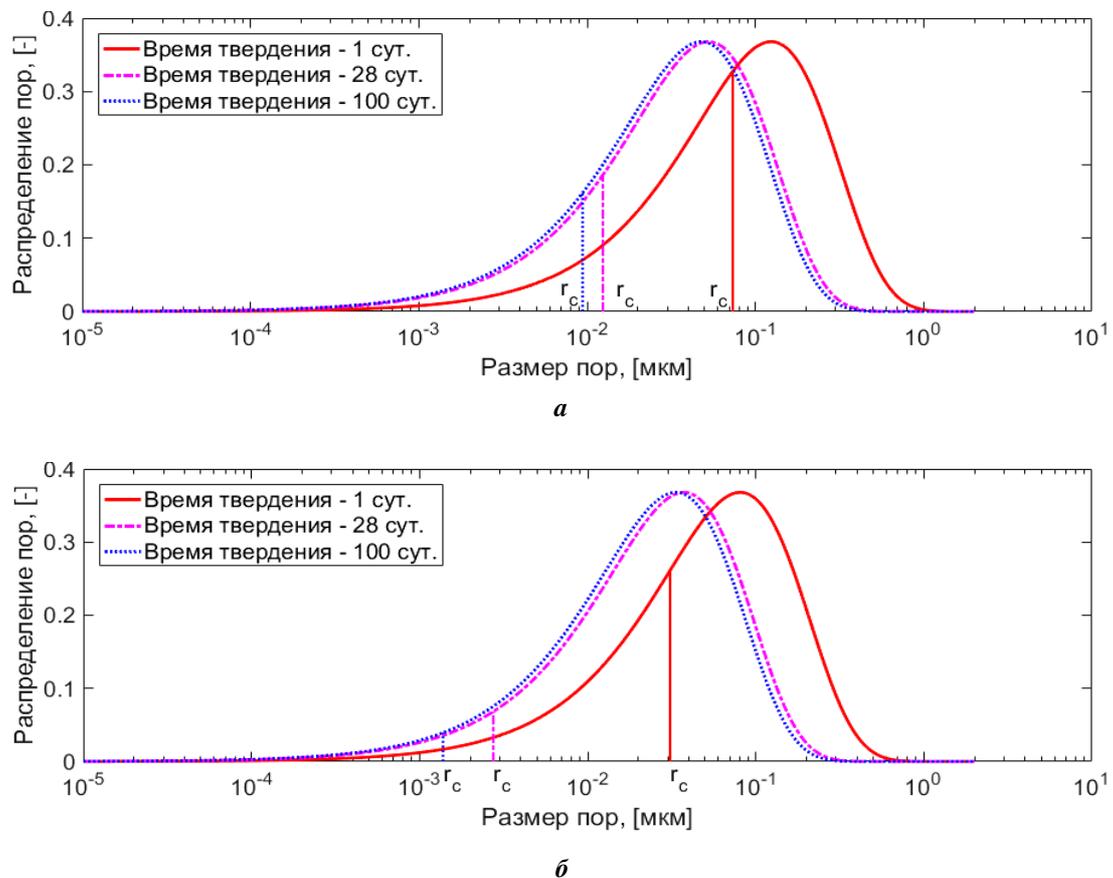


Рисунок 4. – Изменение размера капилляра с мениском в поровой структуре цементного камня при  $\text{В/Ц} = 0,4$  (а) и  $\text{В/Ц} = 0,25$  (б) (определено по исходным данным [13])

**Моделирование основных параметров процесса миграции дополнительной воды в поровую среду цементного камня.** Основная движущая сила миграции дополнительной воды в поровую среду цементного камня – разность капиллярных давлений, возникающих в капиллярных порах цементного камня и пористого заполнителя в результате значительного отличия их геометрических размеров.

На основании закона Лапласа в мелких капиллярных порах цементного камня действует более высокое капиллярное давление, чем в крупных капиллярных порах пористого заполнителя, что приводит к возникновению градиента капиллярного давления и, как следствие, к возникновению движения потока (фильтрации) влаги. Для смачивающих жидкостей поток влаги будет всегда направлен к мениску с меньшим радиусом кривизны, т.е. в направлении капиллярных пор цементного камня (рисунок 5).

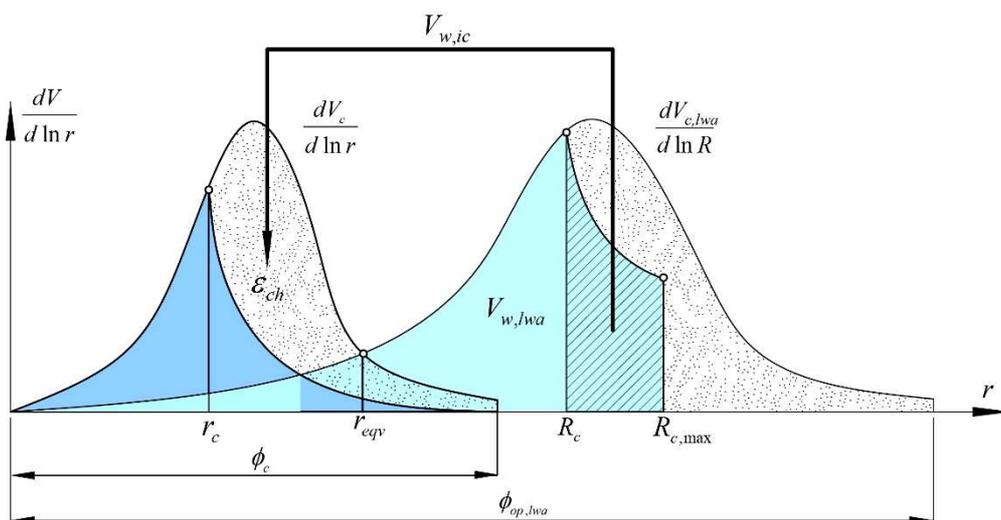


Рисунок 5. – Схема процесса внутреннего увлажнения цементного камня

Однако в реальной структуре цементного камня встречаются случаи, для которых теоретические выводы не находят подтверждения. Например, если изменить форму капилляра, как это показано на рисунке 6, то согласно сорбционной теории миграция влаги при определенных условиях окажется невозможной из-за отсутствия разности капиллярных потенциалов.

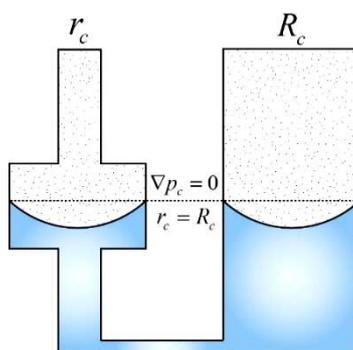


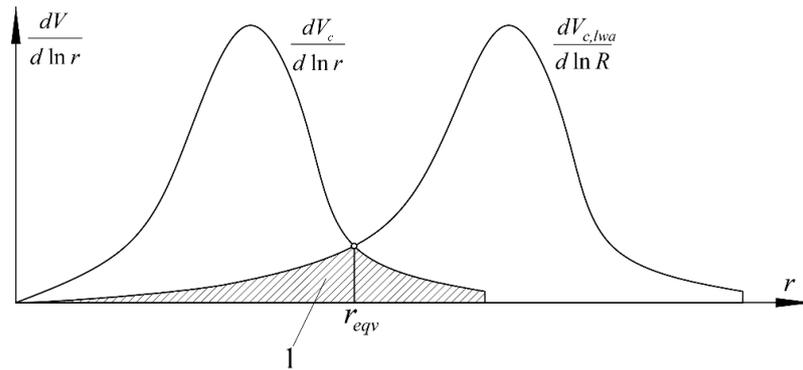
Рисунок 6. – Графическая интерпретация к определению «сорбционного равновесия» в поровой среде цементного камня

В случае, представленном на рисунке 6, в состоянии «сорбционного равновесия» могут (но необязательно) находиться поры в количестве, равном площади заштрихованной области. Остальные поры, пока они сообщаются, доступны для заполнения водой за счет разности капиллярных потенциалов.

Следовательно, учитывая «сорбционное равновесие» (рисунок 7), начало процесса внутреннего увлажнения возможно при выполнении следующего условия:

$$r_c < r_{eqv}, \tag{30}$$

где  $r_{eqv}$  – равнозначный радиус пор. Равнозначный радиус пор – значение радиуса пор, присутствующего как в структуре пор цементного камня, так и пористого заполнителя.



1 – область «сорбционного равновесия»

Рисунок 7. – «Сорбционное равновесие» в поровой структуре цементного камня и пористого заполнителя

Значение равнозначного радиуса  $r_{eqv}$  можно определить из решения следующего уравнения:

$$B_c \cdot r_{eqv} \cdot \exp[-B_c \cdot r_{eqv}] = B_{lwa} \cdot r_{eqv} \cdot \exp[-B_{lwa} \cdot r_{eqv}]. \quad (31)$$

где  $B_{lwa}$  – параметр распределения пор пористого заполнителя.

Параметр распределения  $B_{lwa}$  можно определить на основании зависимости, указанной в [17]:

$$B_{lwa} = -\frac{A_{lwa} \cdot \ln(1 - \phi_{op,lwa})}{2 \cdot \phi_{op,lwa}}, \quad (32)$$

где  $A_{lwa}$  – площадь поверхности открытых пор в единице объема;  $\phi_{op,lwa}$  – относительный объем открытой пористости в структуре пористого заполнителя.

Площадь поверхности открытых пор пористого заполнителя, определяется по следующей зависимости:

$$A_{lwa} = a_{lwa} \cdot \phi_{op,lwa} \cdot \rho_{lwa}, \quad (33)$$

где  $a_{lwa}$  – удельная поверхность пор пористого заполнителя;  $\rho_{lwa}$  – средняя плотность гранул пористого заполнителя.

Для пористого заполнителя структура пористости (относительный объем открытой и закрытой пористости), а также параметры пористости (удельная поверхность открытых пор) определяется экспериментально методом ртутной порометрии.

Теоретически окончание процесса внутреннего увлажнения происходит при условии полного исчерпания зарезервированной дополнительной воды, находящейся в пористом заполнителе, т.е. при выполнении следующего условия:

$$V_{w,ic} > V_{w,lwa}, \quad (34)$$

где  $V_{w,lwa}$  – начальное количество воды, содержащееся в пористом заполнителе.

Начальное количество воды, содержащееся в пористом заполнителе, определяется в зависимости от степени объемного водонасыщения гранул пористого заполнителя и его фактической концентрации в композитной цементной системе:

$$V_{w,lwa} = W_{v,lwa} \cdot \frac{V_{lwa,f}}{V_{cm}}, \quad (35)$$

где  $W_{v,lwa}$  – объемное водонасыщение пористого заполнителя;  $V_{lwa,f}$  – фактический относительный объем пористого заполнителя в композитной цементной системе;  $V_{cm}$  – относительный объем цементной матрицы в композитной цементной системе.

Очевидно, что интенсивность процесса миграции дополнительной воды в поровую структуру цементного камня будет зависеть от интенсивности образования обезвоженных пор в его структуре. Кроме того, на интенсивность миграции будет оказывать влияние то, на какую глубину от поверхности гранулы способна мигрировать дополнительная вода внутрь поровой структуры цементного камня. Мигрируя внутрь поровой структуры цементного камня, дополнительная вода обеспечивает внутреннее увлажнение пор цементной матрицы, располагаемых вокруг каждой гранулы пористого заполнителя, на расстоя-

нии, равном глубине миграции влаги, т.е. вокруг каждой гранулы пористого заполнителя формируется определенный объем цементной матрицы, подверженной внутреннему увлажнению. Соответственно, объем цементной матрицы, располагаемой на расстоянии большем чем способна мигрировать дополнительная вода от поверхности пористой гранулы, будет недоступен для внутреннего увлажнения.

Таким образом, интенсивность процесса миграции дополнительной воды можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial V_{w.ic}}{\partial \tau} = f_{ic}(l_{mig}) \cdot \frac{\partial \epsilon_{ch}}{\partial \tau}, \quad (36)$$

где  $f_{ic}$  – доля объема цементной матрицы, подверженной внутреннему увлажнению;  $l_{mig}$  – глубина миграции дополнительной воды, внутрь поровой структуры цементного камня.

Также на объем цементной матрицы, подверженной внутреннему увлажнению, будет оказывать влияние концентрация пористого заполнителя в объеме цементной матрицы и размер его гранул. Повышение концентрации пористого заполнителя приведет к увеличению количества гранул в единице объема цементной матрицы и, как следствие, их распределение в объеме станет более равномерным, соответственно, увеличится доля объема цементной матрицы, подверженной внутреннему увлажнению.

При постоянной концентрации уменьшение размера фракции пористого заполнителя, аналогично приведет к увеличению количества пористых гранул, располагаемых в единице объема цементной матрицы. Значение глубины миграции влаги определяется при моделировании процесса фильтрации влаги в пористой среде цементного камня (рисунок 8).

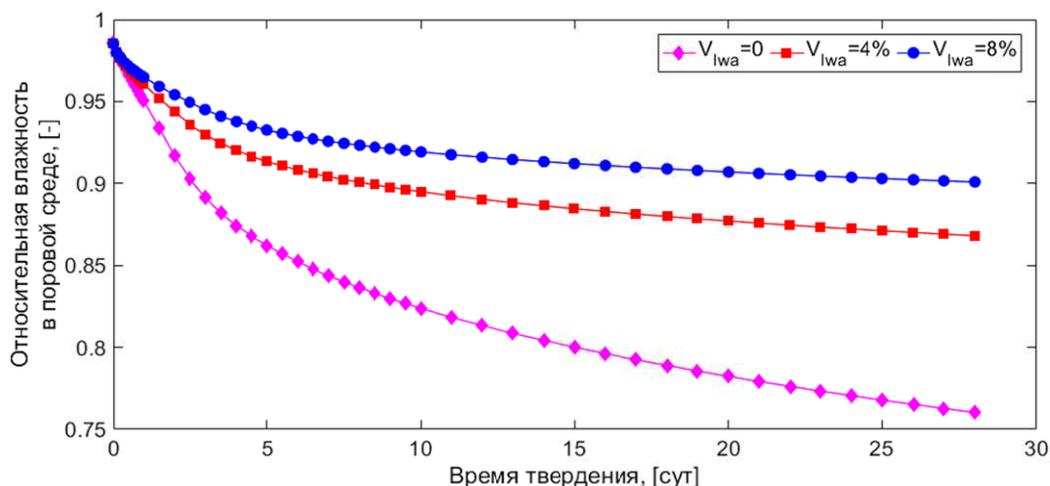
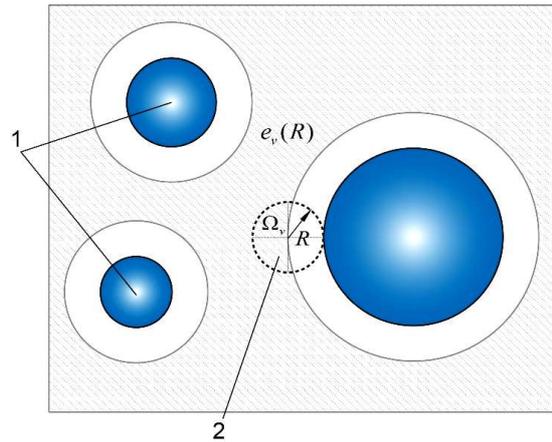


Рисунок 8. – Изменение относительной влажности в поровой среде цементного камня (определено по исходным данным [20])

В ряде исследований проведена экспериментальная оценка глубины миграции влаги. Так, например, по данным [18], дополнительная вода способна мигрировать на расстояние до 4 мм в поровую среду цементного камня в первые несколько суток твердения при водоцементном отношении, равном 0,3. По данным [19], дополнительная вода способна мигрировать на расстояние до 2 мм в первые трое суток твердения при водоцементном отношении, равном 0,3.

**Моделирование распределения гранул пористого заполнителя в структуре цементной матрицы.** В качестве модели произвольного распределения пористых гранул в структуре цементной матрицы, можно использовать модель, предложенную в работе [21], которая основана на функциях распределения «ближайшего соседа» – функции распределения пустот и частиц, в полидисперсной системе сферических частиц. Функция распределения пустот, которую авторы модели еще называют «вероятность «исключения» пустоты  $e_v(R)$ », показывает вероятность, что некоторая область  $\Omega_v$ , в виде сферической N-размерной полости радиусом  $R$  с центром в произвольной точке является пустотой (рисунок 9). Соответственно, функция распределения частиц – вероятность «исключения» частиц  $e_p(R)$  показывает вероятность, что некоторая область  $\Omega_p$  в виде сферы радиусом  $R$  с центром в произвольной точке охватывает сферическую частицу радиусом  $r$ .

Здесь стоит отметить, что в своих работах авторы модели используют термины «пустот» и «частиц», под которыми необходимо понимать определение матрицы и сферических включений соответственно.



1 – сферические частицы; 2 – сферическая N-размерная полость

Рисунок 9. – Графическая интерпретация к определению функции распределения пустот

Предложенные функции учитывают возможное перекрытие оболочек сферических частиц, независимо от количества частиц в единице объема.

Функция вероятности «исключения» пустоты имеет следующий вид:

$$e_v(R) = (1 - V_{sph}) \cdot \exp \left[ -\pi \cdot n_{sph} \cdot (c_{lt} \cdot R + d_{lt} \cdot R^2 + g_{lt} \cdot R^3) \right], \quad (37)$$

где  $R$  – расстояние от произвольной точки до поверхности частицы;  $V_{sph}$  – относительный объем сферических частиц в полидисперсной системе;  $n_{sph}$  – количество сферических частиц в единице объема полидисперсной системы;  $c_{lt}$ ,  $d_{lt}$ ,  $g_{lt}$  – функции распределения сферических частиц.

Фактически вероятность «исключения» пустоты показывает долю объема пустоты, которая располагается вне оболочек, вокруг каждой частицы толщиной, равной расстоянию  $R$  от поверхности частиц.

Функции распределения сферических частиц в соответствии с [21] определяются следующим образом:

$$c_{lt} = \frac{4 \cdot M[r^2]}{1 - V_{sph}}; \quad (38)$$

$$d_{lt} = \frac{4 \cdot M[r]}{1 - V_{sph}} + \frac{12 \cdot M[r^2] \cdot \xi_2}{(1 - V_{sph})^2}; \quad (39)$$

$$g_{lt} = \frac{4}{3 \cdot (1 - V_{sph})} + \frac{8 \cdot M[r] \cdot \xi_2}{(1 - V_{sph})^2} + \frac{16 \cdot M[r^2] \cdot \xi_2^2}{3 \cdot (1 - V_{sph})^3} \cdot A_{lt}; \quad (40)$$

$$\xi_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{sph} \cdot M[r^2]}{3}, \quad (41)$$

где  $M[r^k]$  – математическое ожидание величины радиуса сферических частиц;  $A_{lt}$  – коэффициент, зависящий от применяемой функции аппроксимации, принимается равным нулю.

Математическим ожиданием величины радиуса сферических частиц исходя из положений теории вероятности является интеграл следующего вида:

$$M[r^k] = \int_0^{\infty} r^k \cdot f(r) \cdot dr, \quad (42)$$

где  $f(r)$  – функция плотности вероятности распределения сферических частиц.

Общее количество сферических частиц в единице объема определяется как сумма количества сферических частиц каждого отдельного размера:

$$n_{sph} = \sum_i n_{sph,i}, \quad (43)$$

где  $n_{sph,i}$  – количество сферических частиц  $i$ -го размера в единице объема полидисперсной системы.

Данную модель можно применить к рассматриваемой системе, где в качестве сферических частиц выступают гранулы пористого заполнителя, а в качестве пустоты – цементная матрица (рисунок 10).

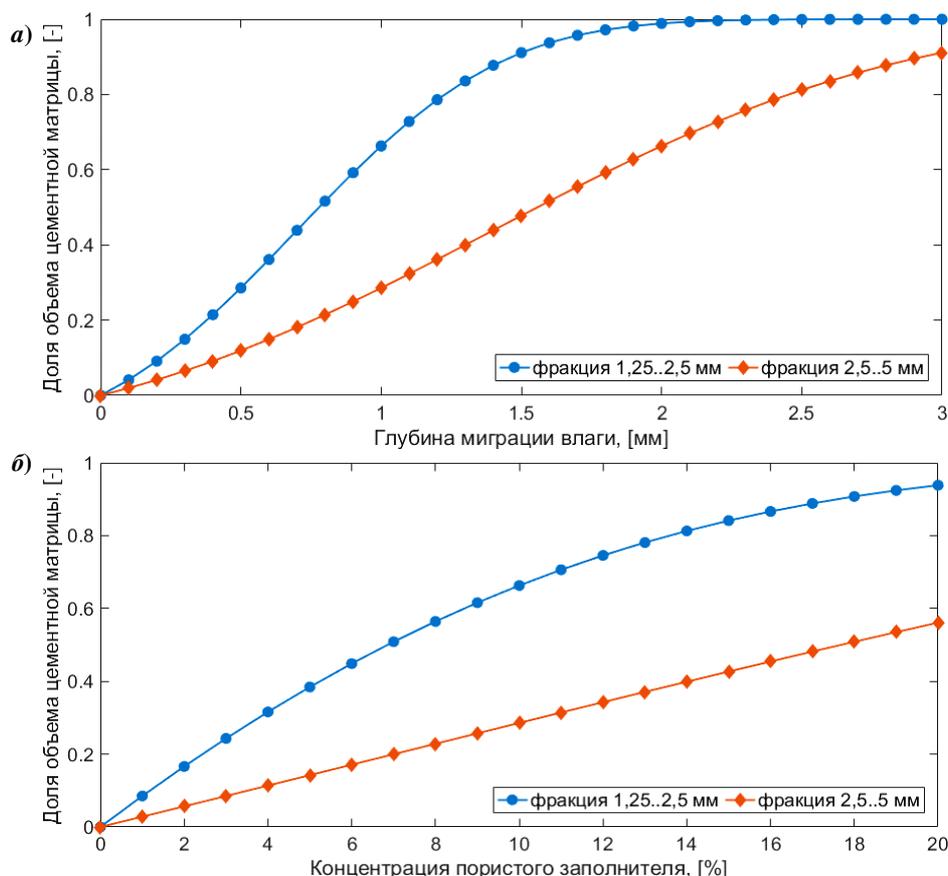


Рисунок 10. – Изменение доли объема цементной матрицы, подверженной внутреннему увлажнению при объемной концентрации пористого заполнителя 10% (а) и глубине миграции влаги 1 мм (б)

Если принять параметр  $R$  равным значению глубины миграции дополнительной воды  $l_{mig}$ , исходя из функции вероятности «исключения» пустоты, можно определить долю объема цементной матрицы, подверженной внутреннему увлажнению, в пределах данного значения глубины миграции:

$$f_{ic} = \frac{1 - c_{lwa} - e_v(l_{mig})}{1 - c_{lwa}} = 1 - \exp\left[-\pi \cdot n_{lwa} \cdot (c_{li} \cdot l_{mig} + d_{li} \cdot l_{mig}^2 + g_{li} \cdot l_{mig}^3)\right], \quad (44)$$

где  $c_{lwa}$  – объемная концентрация пористого заполнителя в цементной композитной системе;  $n_{lwa}$  – количество гранул пористого заполнителя в цементной композитной системе.

Использование данной модели основано на следующих допущениях: гранулы легкого заполнителя имеют правильную сферическую форму; дополнительная вода равномерно распределена в объеме цементной матрицы вокруг гранулы пористого заполнителя; объем увлажненного цементного камня вокруг гранулы легкого заполнителя имеет моноразмерную сферическую оболочку толщиной, соответствующей глубине миграции влаги  $l_{mig}$ .

**Моделирование параметров давления, действующего в поровой среде цементного камня.** Учитывая, что в процессе гидратации поровая среда цементного камня частично заполнена как водой, так и газообразной фазой, давление в поровой среде может быть определено как сумма давления в поровой жидкости и давления в газообразной фазе, с учетом объемных долей порового пространства, соответственно заполненных жидкостью и газом. Предполагая, что поры, заполненные жидкостью и газом, деформируются равномерно, зависимость для определения значения давления, действующего в поровой среде цементной матрицы может быть выражена в следующем виде [14; 22]:

$$p_{pr} = (1 - S_{w,p}) \cdot p_g + S_{w,p} \cdot p_w, \quad (45)$$

где  $p_{pr}$  – давление, действующее в поровой среде цементной матрицы;  $p_g$  – давление газообразной фазы, заполняющей поровое пространство;  $p_w$  – давление жидкой фазы, заполняющей поровое пространство.

Учитывая, что в поровой среде цементного камня значением газообразной фазы  $p_g$  можно пренебречь, получим следующее выражение для определения давления в поровой среде:

$$p_{pr} = S_{w,p} \cdot p_w = S_{w,p} \cdot (p_g - p_c) = -S_{w,p} \cdot p_c, \quad (46)$$

где  $p_c$  – капиллярное давление, возникающее в поровой среде.

Капиллярное давление может быть определено на основании закона Лапласа:

$$p_c = \frac{2 \cdot \gamma_{12} \cdot \cos \vartheta}{r_m}, \quad (47)$$

где  $\vartheta$  – краевой угол смачивания (краевой угол смачивания между твердой и жидкой фазой цементной матрицы обычно принимается равным нулю).

Поскольку в поровой среде также действует давление, возникающее при изменении поверхностной энергии, полное поровое давление (рисунок 11) можно определить из принципа суперпозиции [23]:

$$p_{eqv} = p_{pr} + p_{se} = -S_{w,p} \cdot p_c + p_{se}, \quad (48)$$

где  $p_{eqv}$  – полное давление, действующее в поровой среде цементной матрицы;  $p_{se}$  – давление, возникающее при изменении поверхностной энергии.

По данным [23], давление, возникающее при изменении поверхностной энергии, зависит от капиллярного давления, действующего в поровой среде цементного камня:

$$p_{se} = \int_{S_{w,p}}^1 p_c(S) \cdot dS. \quad (49)$$

Давление  $p_{eqv}$  может быть интерпретировано как термодинамическое поровое давление, являющееся следствием процессов химических и физических взаимодействий, существующих между жидкой и твердой фазами в поровой среде цементной матрицы на границе раздела фаз [23].

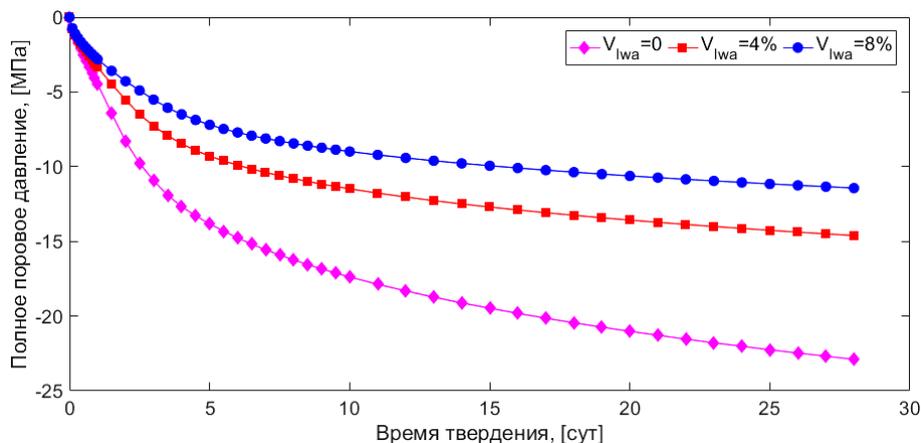


Рисунок 11. – Изменение полного порового давления в цементном камне (определено по исходным данным [20])

**Заключение.** Рассмотрены основные положения по моделированию параметров состояния поровой среды цементного камня в процессе гидратации, учитывая применение метода «внутреннего увлажнения» структуры цементного камня, с использованием предварительно насыщенного пористого заполнителя. Представленные положения предлагаемой модели позволяют прогнозировать следующие основные параметры поровой среды цементного камня: *распределение пор* цементного камня; *водный баланс* в твердеющей цементной системе; термодинамическое состояние поровой среды; *процесс миграции* дополнительной воды в поровую среду; *давление*, действующее в поровой среде. Указанные параметры в дальнейшем могут быть использованы при разработке модели для прогнозирования деформативных характеристик композитных систем, содержащих предварительно насыщенный пористый заполнитель, в рамках концепции «внутреннего увлажнения».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jensen, O.M. Autogenous deformation and RH-change in perspective / O.M. Jensen, P.F. Hansen // Cement and Concrete Research. – 2001. – Vol. 31, iss. 12. – P. 1859–1860.

2. Lura P. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms / P. Lura, O.M. Jensen, K. Van Breugel // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, iss. 2. – P. 223–232.
3. Maekawa, K. Multi-scale modeling of concrete performance: integrated material and structural mechanics / K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2003. – Vol. 1, iss. 2. – P. 91–126.
4. Maekawa, K. Multi-Scale Modeling of Structural Concrete / K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi. – New York ; London : CRC Press, 2008. – 658 P.
5. Powers, T.C. Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste / T.C. Powers, T.L. Brownyard // *Journal Proceedings*. – 1946. – Vol. 43, iss. 9. – P. 249–336.
6. Parrot, L.J. Prediction of cement hydration / L.J. Parrot, D.C. Killoh // *British ceramic proceedings*. – 1984. – Vol. 35. – P. 41–53.
7. Influence of limestone on the hydration of Portland cements / B. Lothenbach [et al.] // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – Vol. 38, iss. 6. – P. 848–860.
8. Ukrainczyk, N. Kinetic modeling of calcium aluminate cement hydration / N. Ukrainczyk // *Chemical Engineering Science*. – 2010. – Vol. 65, iss. 20. – P. 5605–5614.
9. Bogue, R.H. Calculation of the Compounds in Portland Cement / R.H. Bogue // *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*. – 1929. – Vol. 1, iss. 4. – P. 192–197.
10. Jennings, H.M. Colloid model of C-S-H and implications to the problem of creep and shrinkage / H.M. Jennings // *Materials and Structures*. – 2004. – Vol. 37, iss. 1. – P. 59–70.
11. Hillerborg, A. A modified absorption theory / A. Hillerborg // *Cement and Concrete Research*. – 1985. – Vol. 15, iss. 5. – P. 809–816.
12. Hagymassy, J. Pore structure analysis by water vapor adsorption / J. Hagymassy, J.R. Brunauer, R.S. Mikhail // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1969. – Vol. 29, iss. 3. – P. 485–491.
13. Tazawa, E. Prediction Model for Autogenous shrinkage of concrete with different type of cement / E. Tazawa, S. Miyazawa // *Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology: Proceedings 4th International Seminar, Gaithersburg, 20 June 2005 / National Institute of Standards and Technology; ed.: B. Persson, D. Bentz, L. Nilsson. – Gaithersburg, 2005. – P. 125–139.*
14. Grasley, Z.C. Desiccation shrinkage of cementitious materials as an aging, poroviscoelastic response / Z.C. Grasley, C.K. Leung // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – Vol. 41, iss. 1. – P. 77–89.
15. CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modelling Package: Internal Report (NISTIR) / National Institute of Standards and Technology; D. Bentz. – Gaithersburg, 2005. – 226 P.
16. Revised Release on Surface Tension of Ordinary Water Substance / The International Association for the Properties of Water and Steam; Pr. T. Petrova. – Moscow, 2014. – P. 1–6.
17. Филимонова, Н.В. Моделирование структуры и собственных деформаций расширяющихся сульфатоалюминатных цементных систем : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Н.В. Филимонова. – Брест, 2006. – 223 с.
18. Measurement of water transport from saturated pumice aggregates to hardening cement paste / P. Lura [et al.] // *Materials and Structures*. – 2006. – Vol. 39, iss. 9. – P. 861–868.
19. Henkensiefken, R. Saturated Lightweight Aggregate for Internal Curing in Low w/c Mixtures: Monitoring Water Movement Using X-ray Absorption / R. Henkensiefken, T. Nantung, J. Weiss // *Strain*. – 2011. – Vol. 41, iss. S1. – P. 432–441.
20. Lura, P. Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete / P. Lura. – Delft : Delft University Press, 2003. – 180 P.
21. Lu, B. Nearest-surface distribution-functions for polydispersed particle-systems / B. Lu, S. Torquato // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45, iss. 8. – P. 5530–5544.
22. Coussy, O. Poromechanics / O. Coussy. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 312 P.
23. Coussy, O. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials / O. Coussy, P. Dangla, T. Lassabatère, V. Baroghel-Bouny // *Materials and Structures*. – 2004. – Vol. 37, iss. 1. – P. 15–20.

Поступила 09.06.2017

## MODELING OF THE PARAMETERS OF THE PORAL STATE OF THE CEMENT STONE WITHIN THE CONCEPT OF “INTERNAL MOISTURE”

V. KRAVCHENKO

*The main provisions for modeling the basic parameters of the poral state of the cement stone during the hardening process are considered, taking into account the application of the “internal moisture” method of the cement stone structure, using a pre-saturated porous aggregate. The results of modeling on the indicated problems are shown, such as the change in the radius of the capillary pores with the meniscus, the relative humidity in the pore medium, and the pore pressure during the curing process.*

**Keywords:** cement stone, self-drying, internal moistening, porous aggregate, relative humidity, pore pressure.

УДК 666.973.2:666.972.1

## МИКРОСТРУКТУРА КАК ОСНОВНОЙ КРИТЕРИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МХА СФАГНУМА В КАЧЕСТВЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПЛИТНОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

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

*Рассмотрены области применения сфагнума в хозяйственной деятельности человека, включая технологию сбора и сушки мха. С помощью световой микроскопии изучено внутреннее строение, определены размеры паренхимных и гиалиновых клеток листа и стебля сфагнума. Ячеистая структура стебля мха с размерами клеточных оболочек 6...45×50...80 мкм при толщине межклеточных перегородок 0,5...1,5 мкм по своим параметрам превосходит микроструктуру пенополистирола. Проведенная сканирующая томография образцов позволила оценить внешние размеры и поверхность стебля мха. Полученные данные по ячеистой микроструктуре и внешним характеристикам обеспечивают возможность применения мха как природного заполнителя для изготовления эффективного теплоизоляционного материала, обладающего бактерицидными свойствами, являющегося безопасным для окружающей среды и здоровья человека.*

**Ключевые слова:** сфагнум, микроскопия, микроструктура, клетки, стебель, ячеистая структура, заполнитель, эффективный теплоизоляционный материал.

**Введение.** Сфагнум – наиболее известный представитель среди мхов. Особенно широко род мхов представлен в умеренных широтах Северного полушария, где произрастает на больших площадях верховых болот [1]. Мох сфагнум применяется в различных отраслях жизнедеятельности человека: строительстве, медицине, пчеловодстве, садоводстве, флористике, в оценке экологической обстановки.

Дезинфицирующие и противогрибковые свойства сфагнума обусловлены веществами, входящими в состав мха [2]. Современная медицина приходит к выводу, что сфагнум является более эффективным средством, чем, например, хлопковая вата, и поэтому возобновляется производство сфагново-марлевых тампонов [3]. Основными действующими веществами растений рода сфагнум являются фенольные соединения (преимущественно фенолкарбоновые кислоты) и полисахариды. В 90-х годах прошлого столетия разработан ряд средств на основе сфагновых мхов, применяемых в хирургической стоматологии и женской гигиене. Использование сфагнума в данных средствах основано на его высокой гигроскопичности, наличии бактерицидных свойств, а также легкости утилизации после использования [4].

Мох сфагнум также нашел свое применение в пчеловодстве. Из прессованного сухого сфагнума делают утеплитель для ульев, чтобы сохранить пчел от замерзания зимой. Также мох поддерживает постоянный уровень влажности внутри улья. Уложенный в основании улья мох забирает излишки влаги, при этом дополнительно дезинфицирует пространство, предотвращая тем самым различные заболевания у пчел. При повышенной сухости воздуха мох начинает отдавать влагу, что позволяет меду в сотах не засахариться.

Устройство покрытий из мха в дизайнерских решениях по декоративной отделке стен выступает как новое направление [5]. Зелёные граффити малозатратны, не требуют согласования, легко переносят теплый сезон и выживают при низких температурах зимой.

Метод мхов-биомониторов регулярно используется в течение последних 30 лет в скандинавских странах для мониторинга атмосферных выпадений тяжелых металлов на обширных территориях, а в последнее время данная технология нашла широкое применение в странах Западной Европы [6].

Сфагновые мхи широко используются при проведении экологических исследований в качестве тест-объектов, чутко реагирующих на антропогенные воздействия, изменяя свои характеристики или аккумулируя поступающие из окружающей среды элементы. При этом концентрация веществ во мхах значительно выше, чем в травянистой растительности [3].

Ввиду своей малой теплопроводности мох сфагнум применяется в качестве изоляционного материала при утеплении венцов деревянных домов. Строители, разбирая старые деревянные дома, отмечают отличное состояние древесины в тех местах, где находился мох. Сохранность древесины обусловлена полезными бактерицидными свойствами сфагнума, содержащего сфагнол – вещество, препятствующее развитию гнилостных процессов. Для утепления венцов бань и саун мох сфагнум отлично подходит, так как растение способно выдерживать перепады температур, влагу и конденсат [7]. Однако строительная промышленность до настоящего времени не может предложить теплоизоляционный материал на основе сфагнума в виде плит, что позволило бы применять мох не только в бревенчатом строительстве.

К свойствам мха сфагнума можно отнести: экологичность, лечебные (бактерицидные) свойства, долговечность, выдерживание перепадов температур, неподверженность гниению, низкую теплопроводность, сохранение тепла, гигроскопичность. Учитывая данный комплекс положительных качеств, использование мха для плитного теплоизоляционного материала представляется весьма перспективным. На сегодняшний день ниша теплоизоляционных материалов, обладающих бактерицидными свойствами, не занята, а реальная потребность в таком утеплителе существует, особенно для зданий с повышенными требованиями к микроклимату помещений.

Повышение экологической культуры потребителей вынуждает строителей быть в поиске новых технологий и предлагать заказчику теплоизоляционные материалы, обеспечивающие экологическую безопасность зданий. Разработка на основе мха экологически чистого утеплителя с бактерицидными свойствами в виде плит позволит удовлетворить растущий спрос на такой материал.

**Технология сбора и сушки мха.** При сборе мха следует придерживаться нескольких простых правил, позволяющих растениям быстрее возобновляться. Заготовка сфагнума производится в основном вручную на максимально чистых от других растений участках. Сбор мха осуществляется выборочно, полосами шириной 20...30 см и с такими же промежутками между ними, оставляемыми нетронутыми, что позволяет мху постепенно восстановиться на участках сбора. Повторная заготовка на таком участке возможна через 7...10 лет [8]. Заготовку проводят с мая по сентябрь в сухую солнечную погоду. Мох сфагнум собирают и укладывают пучками.

Сушка мха является важным процессом для его дальнейшего использования, так как неправильная обработка сырого материала может привести к утрате положительных свойств. Наиболее подходящий способ сушки сырья – использование вешал [9]. Вешала представляют собой каркас из досок и бруса. Между сколоченными опорами натягивают сетку. Раскладывают мох буртом, толщина слоя в верхней точке бурта первого яруса не должна превышать 30...35 см, на втором ярусе толщина слоя уложенного мха должна быть не более 20...25 см. Расстояние между ярусами составляет 30...40 см. Такое устройство стеллажа обеспечит качественную просушку мха за счет протока воздуха между слоями. Мох, уложенный на них, хорошо продувается, сохраняя свою эластичность. Вешала располагают под навесом, закрывая мох от дождя, тумана и солнца.

Учитывая опыт применения мха для утепления зазоров между венцами в срубках, задача получения высокоэффективного теплоизоляционного материала на основе мха может иметь успешную реализацию. С целью получения мха с необходимыми свойствами и возможностью дальнейшего использования необходимо придерживаться определенных технологических правил в процессе сушки и хранения.

Основное требование при сборе и сушке мха – сохранение структуры материала, что является важным условием для производства на основе сфагнума жесткого плитного утеплителя.

**Методики исследований.** Микроскопический анализ структуры мха выполняли с использованием бинокулярного биологического микроскопа «Crocus 5MP MCX100». Принцип работы оптического микроскопа заключается в преломлении света в момент его прохождения через стекло. Свет отражается от зеркальной поверхности, проходит через рассматриваемый объект и попадает в объектив. Пучок световых лучей, попадающий в микроскоп, вначале преобразуется в параллельный поток, затем преломляется в окуляре. Далее информация об объекте исследования поступает в зрительный анализатор человека.

На стадии подготовки проб образцы мха (лист, продольный срез стебля шириной 0,5 мм, поперечный срез стебля диаметром 0,2 мм) помещали на прозрачное силикатное предметное стекло размером 26×76 мм. Исследуемый объект при помощи пипетки увлажняли дистиллированной водой и накрывали покрывным стеклом размером 18×18 мм. Затем пробу помещали на предметный столик.

При исследовании структуры высушенного мха сфагнума применяли рентгеновский томограф «SkyScan1174v2» (рисунок 1).



Рисунок 1. – Внешний вид томографа «SkyScan1174v2»

**Изучение микроструктуры листа мха сфагнома.** С целью установления структурных параметров, обуславливающих теплоизоляционные свойства мха, проведена световая микроскопия листьев мха. В результате получены изображения микроструктуры листа (рисунок 2), позволяющие определить два вида четко различимых клеток. К первым относятся узкие хлорофиллоносные ассимилирующие клетки, соединенные концами и образующие сетчатую структуру. В хлорофиллоносных клетках происходит фотосинтез, а по всей клеточной структуре осуществляется движение органических веществ. Ко второму виду клеток относятся широкие мертвые гиалиновые водоносные клетки со спиральными утолщениями, располагающимися между живыми. Мертвые клетки представляют собой замкнутые пустотелые оболочки-капилляры, длиной от 60 до 90 мкм и шириной 15...25 мкм. При этом толщина листа мха соответствует одному слою клеток. Множественное наличие пустотелых оболочек в микроструктуре сфагнома обуславливает теплоизоляционные свойства листьев мха. Также мертвые клетки, имеющие отверстия-поры, втягивают и конденсируют пары воды из окружающего воздуха. По принципу капиллярности вода активно засасывается из влажной атмосферы внутрь клетки и прочно удерживается там благодаря гигроскопическим свойствам гиалина. Таким образом, мох сфагнум может впитать в себя объем воды, в 20 раз превышающий по массе собственный. Данное свойство мха впитывать в себя воду из влажного воздуха и отдавать при необходимости способствует поддержанию благоприятного влажностного режима в помещениях. Водоносные клетки мха сфагнома занимают около 65% площади поверхности листа.

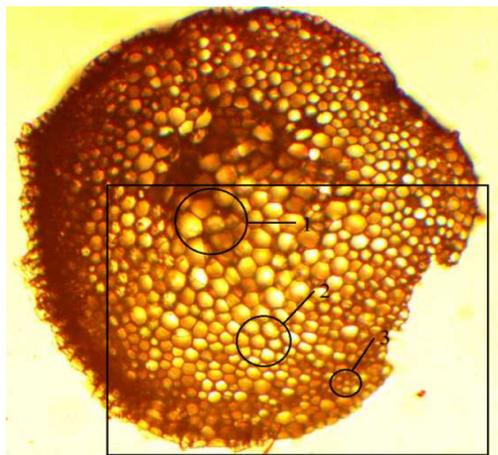


**1 – живые хлорофиллоносные клетки; 2 – гиалиновые клетки со спиральными утолщениями оболочки; 3 – поры в гиалиновых клетках**

**Рисунок 2. – Микроструктура листа мха сфагнома**

В процессе исследования получены изображения (рисунки 3–6) поперечных и продольных срезов стебля мха. Используя метод светлого поля, оптическая микроскопия в прозрачном свете позволила установить, что в поперечном сечении стебля мха присутствуют три области, формирующие ячеистую структуру (рисунок 3). Поперечный разрез стебля напоминает по строению пчелиные соты гексагональной и неопределенной формы. В центре сечения находится сердцевина из паренхимных клеток (рисунок 4) размером 20...45 мкм, выполняющих проводящую и запасную функции. Сердцевина окружена основным слоем из мертвых пустотелых гиалиновых клеток размером в поперечном сечении 10...20 мкм, образующих капилляры. Гиалиновые и паренхимные клетки соединены между собой тонкостенными перегородками толщиной менее 0,5 мкм. Внешняя область (наружная кора) также представлена гиалиновыми клетками. Данные клетки отличаются меньшим диаметром в поперечном сечении, равным 6...10 мкм и утолщенными перегородками от 0,5 до 1,5 мкм. Таким образом, в области внешнего слоя образуется наиболее жесткая и прочная ячеисто-капиллярная структура.

В процессе микроскопических исследований продольного среза стебля мха сфагнома (рисунки 5, 6) отмечено, что структура формируется из сосудов-капилляров, имеющих тонкие поперечные перегородки по длине. Каждый капилляр состоит из последовательно расположенных клеток-членников в виде цилиндрической ячейки. Перегородки между паренхимными клетками в сердцевине расположены на расстоянии 60...80 мкм (рисунок 6). Гиалиновые клетки имеют меньшую длину, равную 50...65 мкм. Следует отметить, что толщина поперечных стенок увеличивается от тонких в центре размером менее 0,5 мкм (паренхимные клетки) к более толстым от 1 до 1,5 мкм во внешней области (гиалиновые клетки).



1 – паренхимные клетки, сердцевина;  
2 – гиалиновые, водососные клетки; 3 – наружная кора  
Рисунок 3. – Поперечный срез стебля мха сфагнума,  
увеличение 10 крат



Рисунок 4. – Поперечный срез  
стебля мха сфагнума, увеличение 40 крат

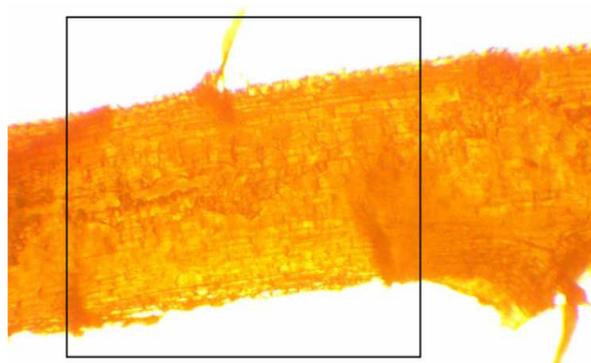


Рисунок 5. – Продольный срез  
стебля мха сфагнума, увеличение 5 крат

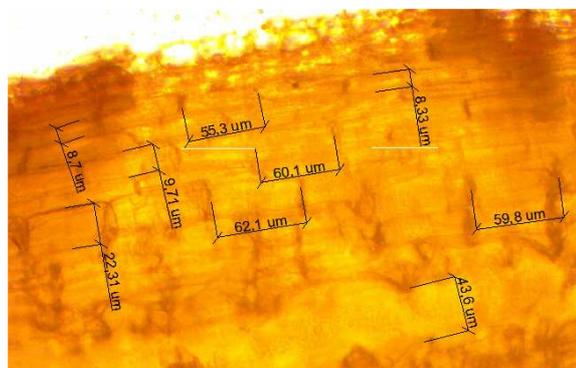


Рисунок 6. – Продольный срез  
стебля мха сфагнума, увеличение 40 крат

Структура сухого мха сфагнума изучалась при помощи рентгеновского томографа «SkyScan1174v2». Результат в виде 3D-скана стебля мха диаметром 0,7...0,9 мм при длине 12 мм представлен на рисунке 7.

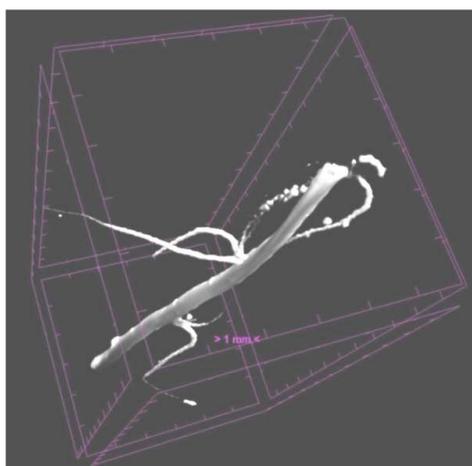


Рисунок 7. – 3D-изображение скана стебля мха сфагнума

На полученном изображении четко видно, что сухой стебель сфагнума полый внутри и по форме имеет вид пустотелого цилиндра – трубки. Полученное строение стебля мха объясняется тем, что плотность структуры мха сфагнума изменяется от центра поперечного сечения и увеличивается при прибли-

жени к внешней границе. Уменьшение объема клеток и утолщение перегородок создают более плотную структуру во внешней области. В сухом состоянии строение области паренхимных клеток представляет собой пространственную структуру из тончайших прозрачных перегородок. По этой причине томограф определяет внутреннюю центральную область как пустоту, а строение стебля в целом в виде трубки. Выполненная томография образца позволила получить наглядное пространственное изображение фрагмента стебля мха с возможностью оценить его форму и внешние размеры.

**Заключение.** Применение *световой микроскопии и рентгеновской томографии* позволили в полном объеме оценить микроструктуру мха и определить морфометрические параметры. По результатам исследований установлено, что тонкостенные оболочки, остающиеся после клеток, как в листьях, так и в стеблях, формируют ячеистую микроструктуру сухого мха, обеспечивающую высокие теплоизоляционные свойства мха сфагнома. Полученные данные *оптической микроскопии* мха сфагнома указывают на наличие ячеистой структуры с размером ячеек листа 9...20×60...90 мкм и ствола мха 6...45×50...80 мкм при толщине перегородок 0,5...1,5 мкм, по своим параметрам превосходящую микроструктуру полимерных ячеистых утеплителей. Таким образом, можно предположить, что по своим теплоизоляционным свойствам утеплители на основе мха сфагнома не будут уступать пенополистиролу. Использование мха для утеплителя позволит получить экологически безопасный эффективный жесткий плитный теплоизоляционный материал, обладающий бактерицидными свойствами, регулирующий влажностный режим в помещениях. Для обеспечения экологической чистоты теплоизоляционного материала в целом необходимо использовать безопасное связующее. Таким вяжущим компонентом может выступать натриевое жидкое стекло, дополнительно обеспечивающее негорючесть утеплителя в случае возникновения пожара в здании.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев, А.А. Оценка условий местообитания сфагновых мхов Западно-Сибирской равнины по ведущим экологическим факторам / А.А. Зверев, Л.Г. Бабешина // Вестн. Томск. гос. ун-та, 2009.
2. Интернет портал [Электронный ресурс] / Отдел моховидные. Общая характеристика и значение. – Режим доступа: <http://blyu.ru/biology6/moss>. – Дата доступа: 16.05.2016.
3. Емельянова, А.П. Выявление природно-климатических факторов, влияющих на содержание химических элементов в сфагновых мхах / А.П. Емельянова, Е.А. Шмелина, С.В. Алексеенко. – Томск : Томск. политехн. ун-т, 2012. – 98 с.
4. Подтероб, А.П. История применения растений рода *Sphagnum* в медицине / А.П. Подтероб, Е.В. Зубец. – Минск : Белорус. гос. ун-т, 2002. – 28 с.
5. Чернолуцкая, М.В. Использование мха в ландшафтном дизайне / М.В. Чернолуцкая. – Новочеркасск : Новочеркасская гос. мелиоративная акад., 2011.
6. Винокурова Е.П. Сравнение аккумуляционной способности различных видов мхов / Е.П. Винокурова, Н.С. Рогова. – Томск : Томск. политехн. ун-т, 2013. – 19 с.
7. Интернет портал [Электронный ресурс] / Мох сфагнум: применение в строительстве. – Режим доступа: <http://dom.ukrbio.com/ru/articles/5654/>. – Дата доступа: 17.05.2016.
8. Интернет портал [Электронный ресурс] / Мох сфагнум. Свойства, заготовка, применение.
9. Интернет портал [Электронный ресурс] / Как собирать и сушить мох. – Режим доступа: <http://www.builderclub.com/vopros-otvet/588/kak-sobirat-i-sushit-moh>. – Дата доступа: 16.05.2016.

Поступила 08.06.2017

#### MICROSTRUCTURE AS A BASIC CRITERION DETERMINING THE USE OF SPHAGNUM MOSS AS A FILLER FOR EFFECTIVE PLATE THERMAL INSULATING MATERIAL

A. BAKATOVICH

*The variants of using sphagnum in human economic activities are considered, including the technology of collecting and drying moss. The internal structure was studied with the help of light microscopy, the sizes of the parenchymal and hyaline cells of the leaf and the sphagnum stem were determined. The cellular structure of the moss stalk, with the dimensions of the cell membranes 6...45×50...80 μm at the thickness of the intercellular partitions 0.5...1.5 μm, exceeds the microstructure of expanded polystyrene by its parameters. The scanning tomography of the samples made it possible to estimate the external dimensions and surface of the moss stalk. The obtained data on the cellular microstructure and external characteristics provide the possibility of using moss as a natural aggregate for the manufacture of an effective heat-insulating material with bactericidal properties that is safe for the environment and human health.*

**Keywords:** sphagnum, microscopy, microstructure, cells, stem, cellular structure, aggregate, effective thermal insulating material.

УДК 691.42:504

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ТЭЦ И СТАНЦИЙ  
ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА**

*канд. техн. наук, доц. А.В. ГРЕЧАНИКОВ; канд. техн. наук, доц. А.С. КОВЧУР;  
канд. техн. наук, доц. И.А. ТИМОНОВ; д-р техн. наук, проф. С.Г. КОВЧУР  
(Витебский государственный технологический университет)*

*Представлен новый разработанный состав сырья для изготовления керамического кирпича с использованием неорганических отходов, образующихся при водоподготовке на теплоэлектроцентралях и станциях обезжелезивания. Определен химический состав прокаленных железосодержащих отходов. Содержание тяжелых металлов в отходах определялось с помощью атомно-эмиссионного анализа. В лаборатории проведены испытания керамического кирпича, содержащего от 5 до 25 % (масс.) железосодержащих отходов вместо глины. Установлено, что кирпич, содержащий неорганические прокаленные отходы, соответствует требованиям СТБ 1160-99 «Кирпич и камни керамические. Технические условия». Исследовано влияние содержания в исходном сырье железосодержащих неорганических отходов на процессы структурообразования, происходящие в керамическом кирпиче. Изучено влияние гранулометрического состава отходов на процесс формования изделий. На ОАО «Обольский керамический завод» изготовлена опытная партия керамического кирпича.*

**Ключевые слова:** неорганические отходы, теплоэлектроцентрали, станции обезжелезивания, кирпич керамический, физико-механические свойства.

Ежегодно на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) и станциях обезжелезивания образуются тысячи тонн отходов, которые состоят в основном из нерастворимых оксидов, гидроксидов, карбонатов железа, кальция, магния и являются ценным химическим сырьем. Вопрос переработки отходов, образующихся после водоподготовки на станциях обезжелезивания и ТЭЦ, в Республике Беларусь до сих пор не решен. Согласно данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды, ежегодно на ТЭЦ, входящих в состав РУП «Минскэнерго», образуется 3700–3800 тонн железосодержащих отходов (Минские ТЭЦ № 3, № 4, № 5). По данным Витебского областного комитета природных ресурсов и охраны окружающей среды, на территории области накопилось около 7000 тонн железосодержащих отходов, имеющих 3 класс опасности. Данные о количестве железосодержащих отходов по областям Республики Беларусь: Гомельская область – 1176,89 тонн; Витебская область – 114 138,54; Минская область – 3910,54; г. Минск – 7193,85. Всего по республике – 126 419,82 тонн. Максимальное количество отходов накоплено в Витебской области [1].

Исследование составов неорганических железосодержащих отходов, выявление возможности использования отходов в производстве строительных материалов и получение нового состава сырья для изготовления керамического кирпича и явилось целью представленной работы.

В качестве железосодержащих отходов выбраны неорганические отходы, образующиеся при водоподготовке на котельной «Южная» ОАО «Витязь» и двух водозаборов г. Витебска.

Анализ химического состава неорганических отходов проводился в усредненной пробе в трех параллельных образцах. Образцы отходов массой от 4 до 11 г высушивались до постоянного веса при температуре 105...110 °С. Все анализы в дальнейшем проводились в пересчете на безводные навески. Для определения ионов трехвалентного железа выбран гравиметрический метод осаждения в виде гидроксида, так как определение ионов железа с помощью ферроцианида калия затруднительно из-за плохого осаждения мелкодисперсного синего остатка и длительного фильтрования. Прозрачный фильтрат после осаждения гидроксида железа использовался для определения содержания алюминия, кальция и магния.

Отходы (шлам водоподготовки) имеют следующий состав, в пересчете на сухое вещество, масс. %:  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2$  – 12,8...14,2;  $\text{SiO}_2$  – 41,9...44,5;  $\text{CaSO}_4$  – 2,4...2,6; органические вещества – остальное.

Определялся также химический состав неорганических отходов станций обезжелезивания г. Витебска. Станция № 1:  $\text{SiO}_2$  – 45...47%;  $\text{Fe}^{3+}$  – 31...32%;  $\text{Ca}^{2+}$  – 4,5...5,5%;  $\text{Mg}^{2+}$  – 1,5...2,5%; анионы – остальное. Станция № 2:  $\text{SiO}_2$  – 48...49%;  $\text{Fe}^{3+}$  – 30,5...31,5%;  $\text{Ca}^{2+}$  – 4,5...5,2%;  $\text{Mg}^{2+}$  – 2,0...2,5%; анионы – остальное. При исследовании химического состава шламов установлены возможные колебания в содержании основных соединений (%):  $\text{SiO}_2$  – 0,5...4,9;  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  – 5,8...10,5;  $\text{CaCO}_3$  – 62,8...68,2;  $\text{CaSiO}_3$  – 3,9...6,6; органические вещества – 5,2...8,9. Колебания состава шлама в узком диапазоне позволяют сделать вывод о достаточной стабильности соотношений составляющих его компонентов [2–4].

Содержание тяжелых металлов в отходах определялось на спектрографе PGS-2. Перед исследованием образцы массой от 0,2 до 0,6 г высушивались до постоянного веса при 105...110 °С. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Содержание тяжелых металлов в неорганических железосодержащих отходах

Элемент	Чувствительность метода, мг/кг	Содержание, мг/кг
Ti	10	10
Cu	4	8
Pb	8	24
Mo	1	–
Zn	200	–
Ba	50	50
Mn	10	30
V	10	–
Ni	5	–
Co	4	–
Be	1	–
Bi	10	–
As	200	–
Sr	100	–
Cd	10	–
Cr	6	–

В результате выполненных исследований установлено, что содержание тяжелых металлов (микроэлементов) не превышает допустимых санитарных норм. Анализируя химический состав шламов станций обезжелезивания и ТЭЦ, содержания в них тяжелых металлов (микроэлементов), сделан вывод о том, что эти отходы могут быть использованы при изготовлении керамического кирпича [2–4].

Для производства керамического кирпича полусухого прессования на ОАО «Обольский керамический завод» применяется глинистое сырье месторождения «Заполье». Глинистая порода светло-коричневого цвета. Структура – крупнодисперсная, легко поддается дроблению, хорошо размокает в воде, бурно вскипает, обработанная 10%-ным раствором HCl. Глинистая порода должна иметь число пластичности не менее 7. Содержание в глинистой породе тонкодисперсной фракции менее 1 мкм должно быть 15%, фракции менее 10 мкм – более 30% по массе, содержание фракции 0,01...0,5 мкм не регламентируется. Глинистое сырье должно обеспечить механическую прочность кирпича не ниже марки 75. На предприятии используются отощающие добавки: шамот (молотый кирпич с фракциями от 0,5 до 5 мм) и керамзиты в количестве от 12 до 18% (масс.). Результаты исследования гранулометрического состава сырья и шамота представлены в таблице 2 [4].

Таблица 2. – Гранулометрический состав сырья и шамота для изготовления керамического кирпича

Гранулометрический состав сырья	Гранулометрический состав шамота
0,5...0,063 мм – 9,7%; 0,063...0,01 мм – 25,39%; 0,01...0,005 мм – 18,95%; 0,005...0,001 мм – 23,32%; менее 0,001 мм – 22,55%.	5...3 мм – 2,5...7%; 3...2 мм – 10...20%; 2...1 мм – 20...40%; 2...0,5 мм – 10...0,5 0,5...0,25 мм – 5...20 менее 0,25 мм – 30...13,5

Применяемая техническая вода должна соответствовать требованиям технических нормативных правовых актов.

Кирпич керамический лицевой применяется для кладки наружных и внутренних стен зданий и сооружений и должен отвечать основным требованиям по СТБ 1160-99 [6] (таблица 3).

Таблица 3 – Основные требования, предъявляемые к керамическому кирпичу

Показатели	Значения показателей
- предел прочности при сжатии	от 7,5 до 30 МПа
- предел прочности при изгибе	от 1,4 до 3,4 МПа
- морозостойкость	от 15 до 75 циклов (попеременного замораживания и оттаивания)
- водопоглощение	не менее 8%
- удельная эффективная активность естественных радионуклидов	не более 370 Бк/кг
- масса	не более 3,8 кг

Проведенные предварительные исследования по замене традиционных отошающих добавок неорганическими железосодержащими отходами показали, что при использовании этих отходов качество продукции не ухудшается.

Для производства экспериментальной партии кирпича и проведения дальнейших исследований были подготовлены два состава керамической массы (таблица 4). Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности 18...20%, из которой формовали кирпич, высушивали кирпич-сырец до влажности 8%, затем обжигали при температуре 1050 °С. Состав сырья для изготовления кирпича керамического методом полусухого прессования с использованием железосодержащих отходов водонасосных станций и ТЭЦ разработан в соответствии с требованиями СТБ 1160-99 «Кирпич и камни керамические» [4–6].

Таблица 4. – Состав керамических масс

Компоненты	Содержание компонентов, масс. %	
	Состав 1	Состав 2
Легкоплавкая глина	90	75
Неорганические отходы ТЭЦ	10	25

На рентгеновском дифрактометре D8 Advance Bruher AXS (Германия) изучена кристаллическая структура образцов кирпича. На сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (SEOL, Япония) изучен химический состав и микроструктура образцов (рисунки 1–4).

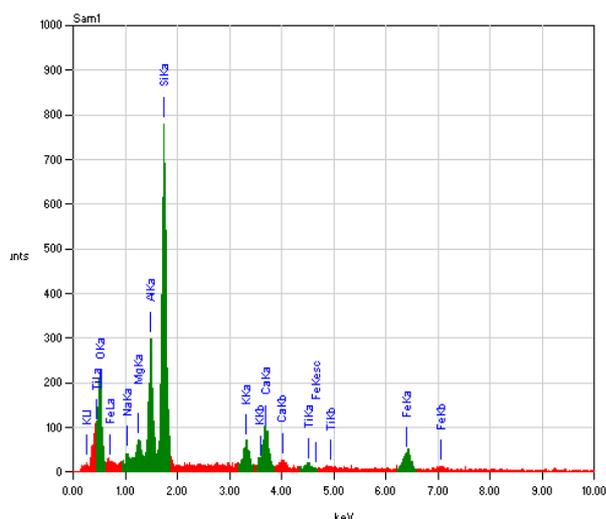


Рисунок 1. – Рентгенограмма образца кирпича, изготовленного из керамической массы состава 1

Элементы состава 1, масс %:

Na<sub>2</sub>O – 1,4684;  
MgO – 2,2646;  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14,3833;  
SiO<sub>2</sub> – 47,7641;  
K<sub>2</sub>O – 7,3134;  
CaO – 12,6099;  
TiO<sub>2</sub> – 1,6292;  
FeO – 12,5671

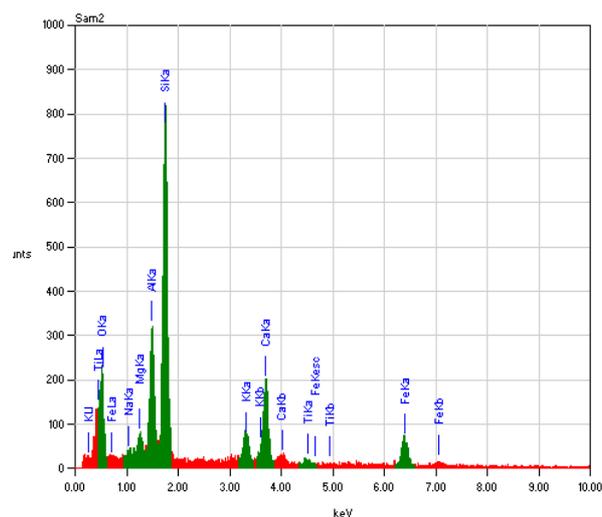


Рисунок 2. – Рентгенограмма образца кирпича, изготовленного из керамической массы состава 2

Элементы состава 2, масс %:

Na<sub>2</sub>O – 1,614;  
MgO – 2,326;  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 12,6477;  
SiO<sub>2</sub> – 39,3959;  
K<sub>2</sub>O – 6,5573;  
CaO – 20,8187;  
TiO<sub>2</sub> – 1,4446;  
FeO – 15,1958

Анализируя данные, представленные на рисунках 1–4, установлено, что с увеличением процента вложения неорганических железосодержащих отходов снижается содержание SiO<sub>2</sub> (47,7641 и 39,3959 масс.% соответственно по составу 1 и 2) и увеличивается содержание FeO (12,5671 и 15,1958 масс.% соответственно). Снижение содержания SiO<sub>2</sub> связано с уменьшением количества исходной глинистой породы в составе сырья. Увеличение процента вложения отходов приводит также к увеличению содержания CaO (12,6099 и 20,8187 масс.% соответственно).

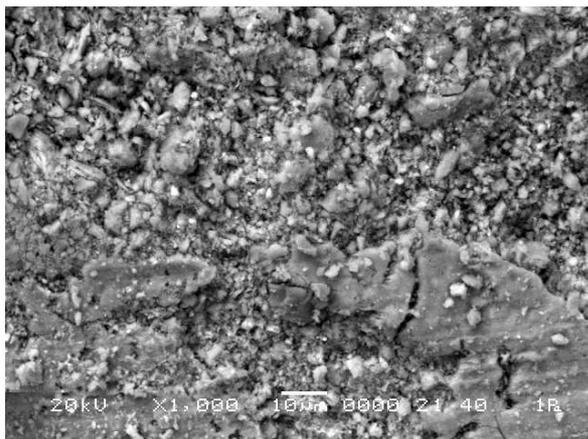


Рисунок 3. – Микроструктура образца кирпича, изготовленного из керамической массы состава 1 (увеличение в 100 раз)

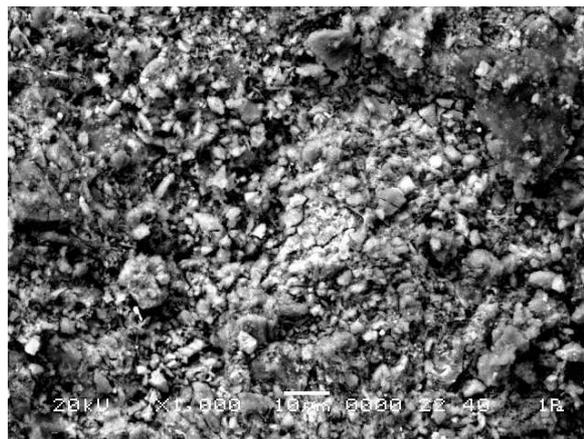


Рисунок 4. – Микроструктура образца кирпича, изготовленного из керамической массы состава 2 (увеличение в 1000 раз)

Микроструктура образцов показывает, что увеличение содержания железосодержащих отходов в составе для изготовления кирпича приводит к появлению более гранулированной структуры (рисунок 4). Это, в свою очередь, приводит к снижению основных физико-механических показателей кирпича. В то же время влияние введенных добавок на основные физико-механические показатели кирпича (морозостойкость, предел прочности, водопоглощение) зависит от их дисперсности и зернового состава. Например, мелкозернистая добавка неорганических отходов, ухудшая сушильные свойства сырца, вместе с тем повышает прочность готовых изделий, спекаясь с глинистой породой при обжиге. Как отщипывающая добавка шлам продувочной воды наиболее эффективен при максимальном размере зерен, а также при содержании фракции размером менее 0,3 мм не более 5% [4].

Дальнейшие исследования опытной партии керамического кирпича были проведены на испытательном комплексе ОАО «Обольский керамический завод». Испытания подвергались следующие образцы: кирпич керамический рядовой полнотелый одинарного пластического формования; кирпич керамический рядовой пустотелый утолщенного пластического формования; кирпич керамический рядовой пустотелый одинарного пластического формования; камень керамический рядовой. Образцы опытной партии были изготовлены с вложением железосодержащих отходов в диапазоне от 10 до 25% с шагом 5%. Методика испытаний соответствовала требованиям ТНПА. Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Результаты испытаний образцов кирпича по физико-механическим показателям

Наименование показателя. Единицы измерения	Номер пункта ТНПА, устанавливающего требования к продукции	Нормированное значение показателей, установленных ТНПА	Среднее значение показателей для пяти образцов			
			Содержание отходов (масс. %)			
			10	15	20	25
1. Морозостойкость, циклы	СТБ 1160-99 п. 4.5 п. 5.5	не менее 15	19	20	20	18
2. Предел прочности, МПа	СТБ 1160-99 п. 4.4, п. 5.3 табл. 4					
- при сжатии, МПа		15,0...17,5	16,5	19,9	15,8	18,8
- при изгибе, МПа		1,5...3,1	2,0	2,9	3,2	1,6
3. Водопоглощение, %	СТБ 1160-99 п. 5.4	не менее 8	18	16,5	16,8	17

Результаты проведенных исследований показывают, что вложение неорганических железосодержащих отходов в состав керамического кирпича не снижают его физико-механических показателей. Образцы кирпича керамического рядового полнотелого одинарного пластического формования с добавлением железосодержащих отходов соответствуют требованиям СТБ 1160-99 «Кирпич и камни керамические. Технические условия». Оптимальное содержание неорганических железосодержащих отходов составляет 15...20% (масс.) [4; 6].

Получаемый материал по водо- и морозостойкости превосходит обычный керамический кирпич, имеет меньшие значения водопоглощения, лучший товарный вид. Кирпич получается с минимальной влажностью, что уменьшает продолжительность сушки сырца. Кирпич, изготовленный с добавками шлама, обладает стабильной прочностью и высокой морозостойкостью. Он характеризуется высокой кислотостойкостью и низкой истираемостью. Неорганические железосодержащие отходы станций обезжелезивания и ТЭЦ содержат цветные оксиды железа, что позволяет регулировать и улучшать цветовую гамму.

Разработанные составы и полученные образцы кирпича также были испытаны по показателям радиационной безопасности в лаборатории Витебского центра стандартизации, метрологии и сертификации. Испытывались следующие образцы: 1 – бой кирпича керамического рядового полнотелого одинарного пластического формования, кирпича керамического рядового пустотелого утолщенного пластического формования, кирпича керамического рядового пустотелого одинарного пластического формования, камня керамического рядового; 2 – глина, карьер «Заполье»; 3 – пресс-порошок (глина порошкообразная); 4 – неорганические железосодержащие отходы. Условия проведения испытаний: температура окружающего воздуха: 18,9...21,2 °С; относительная влажность воздуха: 63,0...65,2%; мощность эквивалентной дозы гамма-излучения: 0,110...0,124 мкЗв/ч; атмосферное давление: 100,7...100,8 кПа. В таблице 6 приведены результаты испытаний.

Таблица 6. – Результаты испытаний образцов по показателям радиационной безопасности

№ образца	Наименование показателей безопасности по ТНПА, единица измерения	Значение показателей безопасности по ТНПА	Фактическое значение показателей безопасности
1	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	до 370 – 1 класс	186,0 ± 14,1 177,3 ± 14,6 180,6 ± 14,3 175,4 ± 14,4 180,5 ± 14,0
2	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	до 370 – 1 класс	177,0 ± 13,9 181,3 ± 14,1 173,6 ± 13,4 183,6 ± 14,1 174,5 ± 13,9
3	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	до 370 – 1 класс	182,7 ± 13,9 185,9 ± 13,6 182,1 ± 13,6 184,5 ± 13,6 180,7 ± 13,4
4	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	до 370 – 1 класс	181,6 ± 13,8 182,3 ± 13,8 178,0 ± 13,4 184,5 ± 13,6 180,4 ± 13,5

В итоге установлено, что все образцы по всем требуемым показателям соответствуют стандарту – ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» [7]. Результаты выполненной работы имеют практическое значение. Получен патент № 18790 от 20.08.2014 на изобретение «Керамическая масса для производства строительного кирпича», на ОАО «Обольский керамический завод» [8] разработана технологическая карта изготовления керамического кирпича методом пластического формования. Технологическая карта содержит перечень технологических операций, входящих в состав технологических процессов, порядок и приемы их выполнения, требования к сырью и материалам, технологические параметры продукции. Поскольку неорганические железосодержащие отходы станций обезжелезивания и водоподготовки относятся к 3 классу опасности, то для производства опытной партии кирпича керамического (3000 шт.) методом пластического формования (кирпич керамический рядовой полнотелый одинарный, пластического формования, с добавкой отходов химводоподготовки (код – 8410500) было получено специальное разрешение (лицензия) на право осуществления деятельности, связанной с воздействием на окружающую среду на основании решения Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. В настоящее время решается вопрос об отнесении керамического кирпича, содержащего отходы станций обезжелезивания и ТЭЦ, к инновационной продукции.

**Заключение.** Ежегодно на станциях обезжелезивания и ТЭЦ Республики Беларусь образуются тысячи тонн шламов, которые состоят в основном из оксидов, гидроксидов, карбонатов железа, кальция, магния, алюминия и являются ценным химическим сырьем. Их химический, фазовый, дисперсный состав может изменяться в широких пределах в зависимости от состава вод и способов очистки. Образующиеся шламы вывозятся для складирования на специально отведенные полигоны или площадки и практически не утилизируются. В результате проведенных исследований определен состав неорганических

отходов (шлама), образующихся на станциях обезжелезивания и теплоэлектроцентралях. Установлен состав железосодержащих отходов, образующихся на станциях обезжелезивания и при водоподготовке на теплоэлектроцентралях. В результате исследований установлена возможность производства на основе глинистого сырья с добавкой неорганических железосодержащих отходов кирпича методом пластического формования. Разработаны составы керамических масс для изготовления кирпича, содержащие различные процент вложения неорганических отходов. Проведены исследования кирпича позволившие установить, что образцы кирпича керамического рядового полнотелого одинарного пластического формования с добавлением железосодержащих отходов соответствуют требованиям СТБ 1160-99 «Кирпич и камни керамические. Технические условия». Оптимальное содержание неорганических железосодержащих отходов составляет 15...20% (масс.). Разработанные составы для изготовления керамического кирпича с добавками неорганических железосодержащих отходов отвечают насущным задачам получения высококачественных строительных материалов и позволяют значительно улучшить экологическую ситуацию на территории водонасосных станций и ТЭЦ. Результаты работы в дальнейшем будут использованы при исследовании возможности изготовления других видов строительных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Состояние природной среды Беларуси : эколог. бюл. 2015 г. / под ред. В.Ф. Логинова. – Минск, 2016. – 363 с.
2. Гречаников, А.В. Керамические строительные материалы с использованием неорганических отходов станций обезжелезивания и ТЭЦ / А.В. Гречаников, А.П. Платонов, С.Г. Ковчур // Инновации. Инвестиции. Перспективы : материалы междунар. форума, Витебск 19–20 марта 2015 г. – Витебск : Витебский областной центр маркетинга, 2015. – С. 61–62.
3. Гречаников, А.В. Изготовление строительных материалов с использованием промышленных отходов / А.В. Гречаников, А.А. Трутнев // Стройиндустрия. Инновации в строительстве. – 2013 : сб. материалов науч.-практ. конф. ККУП «Витебский областной центр маркетинга», Витебск, 25–27 апр. 2013 г. – Стройаналитик. – 2013. – С.48–49.
4. Изготовления керамического кирпича с использованием промышленных отходов / А.П. Платонов [и др.] // Вестн. Витеб. гос. технолог. ун-та. – 2015. – № 28. – С. 128–134.
5. Изготовление кирпича керамического с использованием неорганических отходов теплоэлектроцентралей / А.А. Трутнев [и др.] // Новое в технике и технологии текстильной и легкой промышленности : сб. матер. междунар. науч. конф., ВГТУ, Витебск, 27–28 нояб. 2013 г. ; ВГТУ. – Витебск, 2013. – С.176–180.
6. Кирпич и камни керамические. Технические условия : СТБ 1160-99. – Взамен ГОСТ 530-95, ГОСТ 7484-78 ; Введ. 1999.06.02. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 1999. – 47 с.
7. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов : ГОСТ 30108-94 ; Введ. 1995.01.01. – М. : Стандартинформ, 2007. – 11 с.
8. Керамическая масса для производства строительного кирпича : пат. 18790 Респ. Беларусь / А.П. Платонов, А.А. Трутнев, С.Г. Ковчур, А.С. Ковчур, П.И. Манак ; заявитель Витеб. гос. технолог. ун-т. – № а 20130766 ; заявл. 17.06.2013 ; опубл. 30.12.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 11 (182). – С. 76.

Поступила 09.03.2017

#### USE OF THE FERRIFEROUS WASTAGE OF COMBINED HEAT AND POWER PLANT AND STATIONS OF DEFERRIZATION FOR MANUFACTURE OF THE CERAMIC BRICK

A. HRACHANIKAU, A. KAUCHUR, I. TSIMANAV, S. KAUCHUR

*The new composition of raw materials is developed for manufacture of a ceramic brick with use of the inorganic wastage which is formed at water treatment on combined heat and power plants and the stations of deferrization. Chemical composition of the calcinated ferriferous wastage is defined. Content of heavy metals in a wastage decided on the help of the atomic and issue analysis. Tests of the ceramic brick containing from 5 to 25% are carried out to laboratories (masses.) ferriferous wastage instead of clay. It is established that the brick containing the inorganic calcinated wastage conforms to requirements of STB 1160-99 “A brick and stones ceramic. Technical specifications”. Influence of contents in a feed stock of a ferriferous inorganic wastage on the structurization processes happening in a ceramic brick is investigated. Influence of distribution of sizes of a wastage on process of formation of products is studied. On JSC “Obolsky keramichesky zavod” the experimental batch of a ceramic brick is produced.*

**Keywords:** inorganic waste, combined heat and power station of deferrization, ceramic brick, physico-mechanical properties.

УДК 691.335

**СЕРОБЕТОН КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ**

**И.В. ЛАЗОВСКАЯ; канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ;  
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ; канд. техн. наук, доц. Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Проанализирован мировой опыт, а также возможности и целесообразность использования строительных материалов на основе серного вяжущего. Приведена краткая характеристика серы как химического элемента, вяжущего, положительные и отрицательные свойства материалов на основе серного вяжущего. Описан эксперимент и представлены данные экспериментальных исследований образцов-кубов из серобетона собственного состава.*

**Ключевые слова:** строительный материал, серное вяжущее, серобетон, собственный состав.

**Введение.** Одна из важных задач строительной науки – развитие и обеспечение отрасли новыми строительными материалами, которые изготавливаются с использованием сырья местного производства и отходов, побочных продуктов этого производства. Среди таких продуктов нефтехимической промышленности, представляющих не только научный, но и практический интерес, сера – один из самых распространенных неметаллов в природе. Как химический элемент, сера способна образовывать соединения со многими другими химическими элементами. В природе сера и химические соединения на основе серы встречаются в различных агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном; благодаря молекулярной структуре сера обладает различными полиморфными модификациями. Из них наиболее изучены полиморфные аллотропы (ромбический (плотностью 2,07 г/см<sup>3</sup>), моноклинный (плотностью 1,97 г/см<sup>3</sup>) и пластический).

Следует отметить, что, находясь в твердом агрегатном состоянии при нормальных внешних условиях, сера абсолютно безопасна для жизнедеятельности человека.

**Свойства серы как химического элемента.** Химически активная сера при наличии определенных условий (повышенной температуре) способна соединяться со всеми химическими элементами, за исключением N<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>, Au, Pt и инертных газов. При температурах свыше 300 °С сера с кислородом на воздухе образуют оксиды: SO<sub>2</sub> – сернистый ангидрид, SO<sub>3</sub> – серный ангидрид, из которых получают сернистую и серную кислоты соответственно, а также их соли – сульфиты и сульфаты. При нагревании серы свыше 150 °С в присутствии водорода идет обратимая реакция, в результате которой образуется сероводород, а также многосернистые водороды – сульфаны. При нагревании серы возможно ее взаимодействие с металлами, результатом которого являются сернистые соединения – сульфиды, а также многосернистые металлы – полисульфиды.

На рынке сбыта сера встречается в жидкой, комовой и гранулированной форме. При этом жидкая сера по отношению к другим формам первична, а чистота ее в такой форме значительно выше. Однако в связи со сложностью хранения и транспортировки жидкой серы возникают издержки, и исходя из этого в различных сферах применения используют другие товарные формы серы.

**Наличие серы в регионе.** В настоящее время в мире возникла тенденция превышения производства серы над ее реализацией, что связано с усовершенствованием и расширением способов разработки нефтяных и газовых месторождений, глубиной очистки продуктов нефтепереработки.

В Республике Беларусь, в частности в Витебской области, в ближайшее время прогнозируется аналогичная ситуация, связанная с увеличением количества серы. Более углубленная переработка нефти, а также планируемое производство кокса приведет к приросту объемов производимого сероводорода. Ввод в эксплуатацию строящейся на промышленном предприятии ОАО «Нафтан» установки замедленного коксования позволит утилизировать сероводород методом «Клауса» и получить новый для региона вид товарной продукции – элементарную серу. План выпуска твердой серы может составить более 68,7 тыс. тонн в год.

При этом, учитывая вышеизложенное, становится более перспективным использование серы не только в устоявшихся сегментах потребления, но и в развивающейся технологии стройиндустрии, а точнее в разработке композиционных материалов (серный бетон, серный цемент, сероасфальтобетон и др.). Это означает, что наряду с традиционной технологией производства бетона на основе портландцемента, изделий из бетона и железобетона предлагаются новые решения – более гибкие, специализированные технологии, связанные с отличительными свойствами серы и серобетона. Это направление, по мнению ряда авторов [1], считается наиболее перспективным.

Многочисленные исследования свидетельствуют, что строительные материалы с добавлением серы обладают высокими эксплуатационными характеристиками, повышенной стойкостью к экстремальным нагрузкам и факторам окружающей среды, низкой водопроницаемостью. При этом такие материалы экологически безопасны и в ряде случаев более экономичны [2].

**Сера как вяжущее.** Вяжущие свойства серы известны с начала XVII века, однако серобетон как непосредственно строительный композитный материал активно начали исследовать с целью изучения возможности применения в стройиндустрии в Северной Америке только в XX веке. Именно тогда были определены его преимущества над традиционным бетоном на основе портландцемента. Найденные во времена Первой мировой войны в США большие запасы серы послужили толчком к разработке и изучению новых строительных материалов на основе серных вяжущих. При этом оказалось, что серобетон безопасен для человека и окружающей среды. Как известно [3], о свойствах серы и ее применении для производства строительных материалов впервые заявили ученые Бэйкони, Дэвис, опубликовав результаты своих исследований.

С развитием строительной индустрии возникла потребность в новых строительных материалах, долговечных и стойких к агрессивным средам, а вместе с этим начался поиск новых способов применения и утилизации серы.

Первые разработки и изобретения, связанные с составом серобетона, по получению желаемых свойств и технологии производства, проводились в США [3]. Так, по сложившейся в США последовательности изобретений, связанных с производством серобетона, можно проследить хронологию процесса изготовления строительных материалов на основе серного вяжущего.

В России первое применение серы для производства серобетона осуществили в 70-х годах прошлого столетия.

**Область применения серобетона.** Серобетон представляет собой искусственный композитный материал, состоящий из инертных заполнителей, наполнителей и вяжущего – серы, применяющегося в развитых странах Европы, Северной Америке и Юго-Восточной Азии [4].

Для производства серобетона чаще всего используют техническую серу, но также возможно применение других серосодержащих отходов. Использование таких отходов позволяет не только снизить себестоимость материалов и изделий на основе серного вяжущего, а также решить вопрос по утилизации отходов. Низкая пористость серобетона способна «химически связывать» радиоактивные отходы, а оксиды некоторых металлов, взаимодействуя с серобетоном, не проникают в окружающую среду и превращаются в менее растворимые сульфиды металлов. Серобетон способен, таким образом, связывать ртуть и кадмий, высокая концентрация которых в окружающей среде опасна.

В зависимости от применения различных размеров фракции и сочетаний заполнителей возможно изготовление растворов, бетонов, мастик. Вид заполнителя разделяет серобетоны на тяжелые, особо тяжелые и легкие. Классифицируют серные бетоны также и по структуре: плотные, ячеистые, поризованные и крупнопористые [5]. Количество используемого серного вяжущего при изготовлении серных бетонов определяет подвижность смеси. Выделяют литые, подвижные и малоподвижные, жесткие и особо жесткие смеси.

Имеющиеся технологии позволяют вводить любые цветовые пигменты в состав серобетонов. В зависимости от колера добавляемого красителя бетоны на основе серного вяжущего могут обладать широким диапазоном цветовой гаммы.

К положительным свойствам серобетона, благодаря которым он получил широкое распространение, можно отнести его высокую прочность, коррозионную стойкость, низкое водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость, а также быстрый набор прочности, возможность применения при низких отрицательных температурах, а также возможность вторичной переработки. К отрицательным – возникновение трещин при застывании большого объема материала, низкую устойчивость к высоким температурам, возможность разрушения серобетона тионовыми бактериями.

Однако с развитием и совершенствованием технологии производства серобетона определенное количество его недостатков было устранено. Так, установлено, что добавление к серному вяжущему пластификаторов, таких как полисульфиды, способствует уменьшению количества усадочных трещин, повышает пластичные характеристики серного раствора.

Серобетон используется для изготовления сборных конструкций (фундаментных блоков и подушек, монолитных фундаментных плит, бордюров и ограждений, отделочных плиток полов, дорожных плит, конструкций портовых сооружений, железнодорожных и трамвайных шпал, опор ЛЭП и т.д.) [6].

Кроме того, серобетон в сочетании с повышенными прочностными, адгезионными и эксплуатационными характеристиками может иметь различный цвет и фактуру поверхности и применяться для декоративной отделки, восстановительных и реставрационных работ [7].

**Состав серобетона.** Наиболее существенным отличием серобетона от традиционного бетона на основе портландцемента является отсутствие воды в составе.

Подбор состава серобетона, как и традиционного бетона, заключается в определении оптимального содержания всех составляющих компонентов, чем достигается получение материала с требуемыми физико-механическими свойствами.

Большое влияние на свойства серобетона, его стоимость и срок эксплуатации изделий из него оказывают заполнители, объем которых занимает до 80% от объема смеси. Минимизировать расход серы (до 15% по массе) также позволяет введение в серобетон заполнителей и наполнителей. В зависимости от вида, назначений изделий и условий их эксплуатации определяется выбор крупного и мелкого заполнителей. В качестве крупного заполнителя используют керамзитовый, аглопоритовый гравий, вулканический шлак, пемзу и т.д., что позволяет получить легкий серобетон [8]. Для изготовления тяжелого бетона с улучшенными прочностными свойствами применяют щебень, гравий, дробленый бетон, промышленные отходы. Мелким заполнителем служат кварцевые пески и порошки, полученные путем дробления горных пород и минералов.

В качестве структурообразователя в серобетон добавляют тонкодисперсный наполнитель с размером зерен менее 0,15 мм: графитовый порошок, базальтовую муку, шамот, золу уноса, трепел и другие виды минеральных порошков. Наполнитель может быть охарактеризован размерами зерна, формой зерна. Эти свойства определяют такими показателями, как удельная поверхность наполнителя и пустотность [8].

В первом патенте, в который вошел весь накопленный экспериментальный опыт, полученный за время исследований в США относительно изготовления серобетона [3], впервые введено такое понятие, как модификатор серы для производства строительного материала с наиболее высокими показателями качества. Благодаря проведенному эксперименту также установлено, что эффективнее использовать модифицированную серу [3]. Это позволяет избежать разрушения серобетона тионовыми бактериями, при воздействии сильных окислителей, щелочей, некоторых органических растворителей, значительной деформации усадки в процессе формирования материала.

Техническую серу модифицируют добавками, которые способны регулировать физико-механические и реологические свойства серобетона [9]. Все модифицирующие добавки можно разделить на четыре группы: пластифицирующие, стабилизирующие, антипирены и антисептики. Добавки-пластификаторы используют в составе серного вяжущего с целью снижения хрупкости, увеличения прочности и замедления кристаллизации серы при охлаждении. Стабилизирующие добавки требуются для изменения структуры серы и повышения ее устойчивости к атмосферным условиям. Антипирены применяют для снижения горючести материалов из серобетона. Антисептики используют для повышения биологической стойкости серных бетонов.

Для регулирования свойств серобетона следует также соблюдать основные подходы при его производстве: обязательная модификация серы путем введения добавок, способствующих кристаллизации серы при сохранении ее реологических свойств; определенный режим охлаждения изделий для предотвращения образования дефектов и внутренних напряжений [9].

**Особенности технологии производства серобетона.** Как и у традиционного бетона, свойства серобетона зависят от качества входного сырья и соблюдения технологии производства. Основной особенностью приготовления серобетона является «горячая» технология, в соответствии с которой составляющие серобетона до перемешивания подогреваются до 140...150 °С. При этой температуре сера находится в жидком состоянии. Жидкая сера в составе смеси выполняет функцию жидкой фазы, определяющей все основные технологические показатели смеси (подвижность, удобоукладываемость). В отличие от традиционного бетона, жизнеспособность серобетонной смеси в горячем состоянии практически не ограничена. Процесс отверждения связан с кристаллизацией серы при охлаждении.

**Опыт получения серобетона в Полоцком государственном университете.** Изучив свойства местного сырья серы, ее возможную модификацию на предмет применения для производства серобетона, на кафедрах «Строительные конструкции» и «Химия и технологии переработки нефти и газа» разработан состав и апробирована сама технология возможного производства серобетона.

В состав входили: сера, песок, щебень, зола ТЭЦ, модифицирующие добавки.

Цель применения добавок и модификаторов – избежание усадки серобетона и исключение образования трещин при быстром его охлаждении на воздухе.

Полученную смесь ингредиентов заявленного состава разогревали, перемешивали и заполняли стандартные формы для кубов с ребром 100 мм. Для уплотнения серобетонной смеси применяли вибрирование. Было изготовлено 5 опытных образцов-кубов (рисунок 1). У всех опытных образцов с помощью шаблонов проверялась плоскостность граней. Признаков усадочных деформаций при твердении серобетона не выявлено.



**Рисунок 1. – Внешний вид опытных образцов**

Опытные образцы-кубы испытывались до разрушения при одноосном кратковременном сжатии. В процессе проведения испытаний контролировалась прикладываемая к образцу нагрузка.

Все опытные образцы разрушились от действия главных растягивающих напряжений по схеме, аналогичной разрушению образцов-кубов из высокопрочного бетона на цементном вяжущем, – мгновенное хрупкое разрушение с образованием двух усеченных пирамид (рисунок 2).



**Рисунок 2. – Вид разрушения опытных образцов**

По результатам испытаний образцов-кубов средняя кубиковая прочность серобетона заявленного состава при сжатии составила 46 МПа.

Таким образом, в итоге проведенного экспериментального исследования реализованы следующие его этапы:

1) выполнен анализ свойств серы как вяжущего, известных составов, технологии производства серобетона;

2) определена область возможного применения в Республике Беларусь изделий и конструкций из серобетона – серобетон может применяться для изготовления свай, фундаментных блоков и плит, канализационных колец, коллекторов, лотков, элементов хранилищ химических и других отходов, покрытий полов, покрытий дорог, бордюров, дорожных и аэродромных плит и т.д.;

3) подобран состав, изготовлены и испытаны до разрушения опытные образцы из серобетона. Средняя кубиковая прочность по результатам испытания составила 46 МПа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кисленко, Н.Н. Анализ производства и использования серы на предприятиях ОАО «Газпром» / Н.Н. Кисленко, Н.В. Мотин, М.А. Медведев // Научно-технический прогресс в технологии переработки природного газа и конденсата. – М., 2003. – С. 115–120.
2. Волгушев, А.Н. Применение серы и серосодержащих отходов в технологии производства строительных конструкций и изделий / А.Н. Волгушев, Н.Ф. Шестеркина, В.А. Елфимов // Строительные материалы. – М., 1990. – № 10. – С. 21–23.
3. Волгушев, А.Н. Применение серы в строительстве / А.Н. Волгушев // Аналитический портал химической промышленности Newchemistry.ru. – Режим доступа: [http://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=4348](http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=4348). – Дата доступа: 02.06.2017.
4. Рокас, С.Ю. Опыт и возможности применения серы в дорожном строительстве / С.Ю. Рокас, М.А. Марцинкявичене. – Вильнюс : ЛитНИИТИ, 1979. – 39 с.
5. Орловский, Ю.И. Бетон и изделия на основе серосодержащих отходов / Ю.И. Орловский, А.С. Семченков, В.И. Хоржевский // Бетон и железобетон. – 1995. – № 3. – С. 21–24.
6. Возможности применения серы при производстве новых строительных материалов и изделий : науч.-техн. докл. / Л.М. Вользон [и др.]. – М., 1999. – 74 с.
7. Волгушев, А.Н. Производство и применение серных бетонов. Обзорн. информ. / А.Н. Волгушев, Н.Ф. Шестеркина ; НИИЖБ. – М., 1991. – Вып. 3. – 51 с.
8. Елфимов, В.А. Подбор составов серных бетонов / В.А. Елфимов, А.Н. Волгушев // Журн. «Строительные материалы». – М., 1991. – № 19. – С. 28–29.
9. Личман, Н.В. Сера и ее свойства как связующего в серобетонах / Н.В. Личман // Модификация серы различными добавками : сб. науч. тр. Норильск. индустриал. ин-та. – Норильск, 1998.

Поступила 09.06.2017

#### SEROBETON AS A PERSPECTIVE BUILDING MATERIAL

**I. LAZOVSKAYA, S. JAKUBOWSKI,  
D. HLUKHAU, Y. LAZOUSKI**

*The world experience, as well as the feasibility and feasibility of using building materials based on sulfur binder are analyzed. A brief description of sulfur as a chemical element, astringent, positive and negative properties of materials based on sulfur binder is given. The experiment and presents data on experimental studies of sample cubes made of sulfur concrete of authors own composition is described.*

**Keywords:** building material, sulfur binder, sulfur concrete, own composition.

УДК 691.3:699.874

## БИОСТОЙКОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ К ПЛЕСНЕВЫМ ГРИБАМ

*канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА;  
канд. техн. наук, доц. Ю.В. ВИШНЯКОВА; А.А. ШАУРО  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены результаты исследований биостойкости цементного камня, модифицированного суперпластификатором Стахемент 2000М Ж30 и комплексными добавками на его основе. Степень воздействия плесневых грибов на цементный камень оценивалась путем погружения образцов в модельную среду из растворов трех органических кислот, являющихся продуктами жизнедеятельности микроорганизмов. Показано, что образцы цементного камня с комплексными добавками более устойчивы к воздействию агрессивной среды по показателям прочности, потери массы и изменения уровня рН модельной среды. Установлено, что комплексные добавки Стахемент 2000М Ж30+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Стахемент 2000М Ж30+KMnO<sub>4</sub> в оптимальных дозировках обладают фунгицидным действием и позволяют получить цементный камень, устойчивый к воздействию плесневых грибов.*

**Ключевые слова:** биостойкость, цементный камень, комплексные добавки, модельная среда, плесневые грибы.

**Введение.** Бетон и железобетон был и остается наиболее массовым конструкционным материалом для строительства зданий и сооружений, который в ходе эксплуатации подвергается различным коррозионным воздействиям, в том числе и биологической коррозии. Благодаря пористой структуре бетон является потенциально благоприятной средой обитания для микроорганизмов. Бактерии, плесневые грибы поражают поверхности конструкций, контактирующих с агрессивными веществами из газовых выбросов, жидких отходов различных производств, а также отходов жизнедеятельности населения на предприятиях пищевой промышленности, сельскохозяйственного назначения и коммунальных хозяйств.

Участились случаи обильного роста плесени в теплые и влажные сезоны при эксплуатации жилых домов в ваннах комнатах, на оконных откосах, за шкафами и стенками, под подоконниками. Появление плесени может быть вызвано как объективными причинами (строительными дефектами, установкой пластиковых стеклопакетов в старых домах, нарушающих вентиляцию), так и неправильной эксплуатацией (искусственное создание высокой влажности, неправильный температурный режим отопления и плохое проветривание).

При недостаточной стойкости к биологической коррозии снижается эксплуатационная надежность изделий и конструкций из бетона, ухудшается их внешний вид и экологическая ситуация в зданиях. В этой связи актуальными являются исследования биостойкости бетонов, модифицированных пластифицирующими добавками и комплексами на их основе, которые используются для изготовления широкой номенклатуры сборных железобетонных конструкций и в монолитном строительстве.

**Основная часть.** Известно, что биологическому повреждению материалов способствуют не столько сами микроорганизмы, сколько продукты их метаболизма. Сильнейшими агрессивными метаболитами плесневых грибов являются органические кислоты: фумаровая, янтарная, яблочная, лимонная, глюконовая, молочная, щавелевая, уксусная [1]. Для проведения эксперимента использовалась методика, предложенная Д.А. Куколевой в работе [2], заключающаяся в оценке степени воздействия микроорганизмов на исследуемый материал путем погружения образцов материала в модельную среду из растворов трех органических кислот (таблица 1).

Таблица 1. – Состав модельной среды

Наименование компонента	Концентрация, %	Содержание в смеси, %
Уксусная кислота	1	35
Щавелевая кислота	0,1	49
Лимонная кислота	1	16

### **Испытания образцов на биостойкость**

Образцы после тепловлажностной обработки (ТВО) укладывались на дно эксикатора (диаметром 200 мм) таким образом, чтобы расстояние между ними составляло не менее 20 мм, что исключало их контакт друг с другом. Образцы заливали раствором органических кислот состава, приведенного в таблице 1, – зеркало воды на 20 мм выше верхней грани образцов. Для оценки сопротивления образцов при действии на них продуктов жизнедеятельности микроорганизмов периодически осуществлялся кон-

троль массосодержания, уровня рН среды, а по окончании экспозиции образцы испытывались на сжатие в возрасте 3 и 5 месяцев. Испытания образцов на сжатие осуществлялись согласно ГОСТ 10180-2012 [3] на испытательном прессе ИП-100. Для измерения уровня рН использовался рН-метр типа рН-150 М.

Объектом исследования являлись образцы цементного камня кубической формы размерами 20×20×20 мм с водоцементным отношением 0,3. Составы исследуемых образцов цементного камня приведены в таблице 2. Для изготовления образцов использовался портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» ЦЕМ I – 42,5 Н и химические добавки: суперпластификатор Стахемент 2000М Ж30, сульфат натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и комплексные добавки Стахемент 2000М Ж30 +  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Стахемент2000М Ж30 +  $\text{KMnO}_4$ .

Таблица 2. – Составы исследуемых образцов цементного камня

Номер состава	Химические добавки		Прочность на сжатие, $R_{сж.}$ , МПа	Плотность, $\text{кг/м}^3$
	Наименование	Количество, % от массы цемента		
1	Без добавки	–	36,36	2062
2	Стахемент 2000М Ж30	0,6	25,75	2109
3	Стахемент 2000М Ж30+ $\text{Na}_2\text{SO}_4$	0,6+1	39,18	2160
4	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	1	23,23	2055
5	Стахемент 2000М Ж30+ $\text{KMnO}_4$	0,6+0,1	28,20	2131
6	Стахемент 2000М Ж30+ $\text{KMnO}_4$	0,6+0,3	26,14	2195
7	Стахемент 2000М Ж30+ $\text{KMnO}_4$	0,6+0,5	24,98	2205

Наличие в исследуемых составах суперпластификатора Стахемент 2000М Ж30 способствует увеличению подвижности цементного теста при постоянном водоцементном отношении (В/Ц), снижению водопотребности цементного теста для равноподвижных смесей до 5%. Пептизирующее действие суперпластификатора Стахемент 2000М Ж30 приводит к образованию мелкокристаллической структуры, способствующей уплотнению цементного камня. Так, плотность модифицированных образцов цементного камня увеличилась до 7%.

В качестве ускорителя твердения использовался сульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), который, в свою очередь, ускоряет гидратационные процессы и структурообразование цементного камня. При введении в состав цементного камня добавки ускорителя твердения  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  заряд клинкерных частиц уменьшается [4], что приводит в начальный период к уменьшению слоя адсорбируемой ими воды, создавая предпосылки для получения более плотного и прочного цементного камня (состав № 3). Наряду с этим вводимая добавка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  увеличивает скорость взаимодействия клинкерных фаз цемента с водой (гидратация), а следовательно и скорость твердения цементного камня.

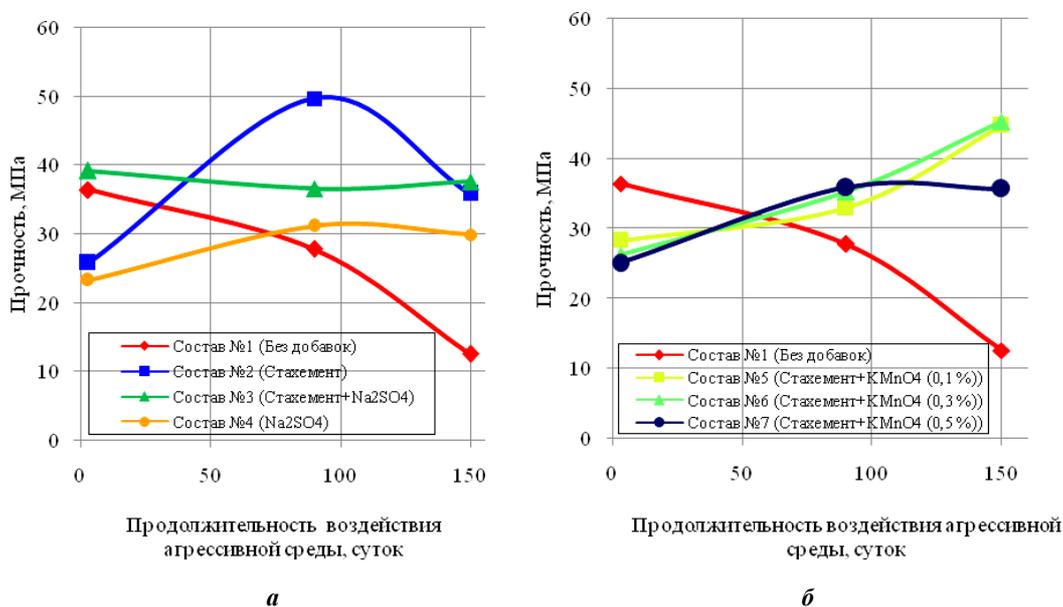
Испытания показали, что введение суперпластификатора Стахемент 2000М Ж30 совместно с ускорителем твердения  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  приводит к повышению прочности на 7,76%, плотности цементного камня на 4,75% по сравнению с образцом без добавок. Введение перманганата калия  $\text{KMnO}_4$  совместно с суперпластификатором Стахемент 2000М Ж30 приводит к повышению плотности образцов на 3,34% при концентрации перманганата калия 0,1% от массы цемента; на 6,45% при концентрации перманганата калия 0,3% от массы цемента; на 6,94% при концентрации перманганата калия 0,5% от массы цемента. Однако отмечается замедление набора прочности на начальном этапе твердения.

Изменение прочности исследуемых образцов в зависимости от продолжительности воздействия агрессивной среды представлено в таблице 3. Прочность образцов в возрасте 3 суток после ТВО сравнивалась с прочностью образцов после 3 и 5 месяцев нахождения в модельной среде.

Таблица 3. – Изменение прочности исследуемых образцов в зависимости от продолжительности воздействия агрессивной среды

Номер состава	Прочность на сжатие $R_{сж.}$ , МПа (%) после ТВО в возрасте 3 суток	Прочность на сжатие $R_{сж.}$ , МПа (%) при выдерживании образцов в агрессивной среде	
		3 месяца	5 месяцев
		1	36,36 (100)
2	25,75 (70,82)	49,63 (136,50)	35,79 (98,43)
3	39,18 (107,76)	36,57 (100,58)	37,58 (103,36)
4	23,23 (63,89)	31,10 (85,53)	29,85 (82,10)
5	28,20 (77,56)	32,90 (90,48)	44,63 (122,75)
6	26,14 (71,89)	35,24 (96,92)	45,26 (124,48)
7	24,98 (68,70)	35,82 (98,52)	35,61 (97,98)

Влияние продолжительности воздействия агрессивной среды на прочность цементного камня, модифицированного добавками: суперпластификатором Стахемент 2000М Ж30, ускорителем твердения  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , комплексными добавками Стахемент 2000М Ж30+ $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Стахемент 2000М Ж30+ $\text{KMnO}_4$  (концентрация  $\text{KMnO}_4$  варьировалась: 0,1, 0,3, 0,5%) – проиллюстрировано на рисунке 1 (а, б).



**Рисунок 1. – Влияние продолжительности воздействия агрессивной среды на прочность цементного камня, модифицированного добавками Стахемент 2000М Ж30+ $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (а) и Стахемент 2000М Ж30+ $\text{KMnO}_4$  (б)**

Установлено, что прочность образцов без добавок (состав № 1) значительно снижается под действием агрессивной среды органических кислот. Так, прочность образцов контрольного состава в возрасте 3 месяцев снизилась на 23,65%, а в возрасте 5 месяцев – на 65,51%. Образцы с добавками оказались более устойчивы к воздействию агрессивной среды. Если на ранних сроках твердения (3 суток после ТВО) наблюдается замедление процесса набора прочности, то испытания в более поздние сроки, через 3 месяца и 5 месяцев нахождения в агрессивной среде, показали продолжение набора прочности и превышение прочности бездобавочного образца составами, модифицированными комплексными добавками Стахемент 2000М Ж30+ $\text{KMnO}_4$  и Стахемент 2000М Ж30+ $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . В возрасте 5 месяцев не было выявлено отрицательного воздействия агрессивной среды на составы № 3, № 5 и № 6.

Установлено, что прочность состава № 5, модифицированного добавкой Стахемент 2000М Ж30 (0,6%)+ $\text{KMnO}_4$  (0,1%), по сравнению с прочностью состава № 1 (без добавок) первоначально в возрасте 3 суток была ниже на 38,94%, но через 3 месяца выдерживания в агрессивной среде наблюдается рост прочности, а в возрасте 5 месяцев уже отмечается превышение прочности контрольного состава на 22,75%.

Увеличение дозировки перманганата калия  $\text{KMnO}_4$  до 0,3% в составе комплексной добавки Стахемент 2000М Ж30 (0,6%)+ $\text{KMnO}_4$  (0,3%) позволило обеспечить еще более интенсивный набор прочности состава № 6, находящегося в агрессивной среде. Так, через 5 месяцев выдерживания в агрессивной среде прочность повысилась на 24,48% по сравнению с прочностью контрольного состава. Дальнейшее повышение дозировки перманганата калия  $\text{KMnO}_4$  до 0,5% в составе комплексной добавки не обеспечило дальнейшего роста прочности, после 5 месяцев воздействия агрессивной среды привело к ее снижению на 2%.

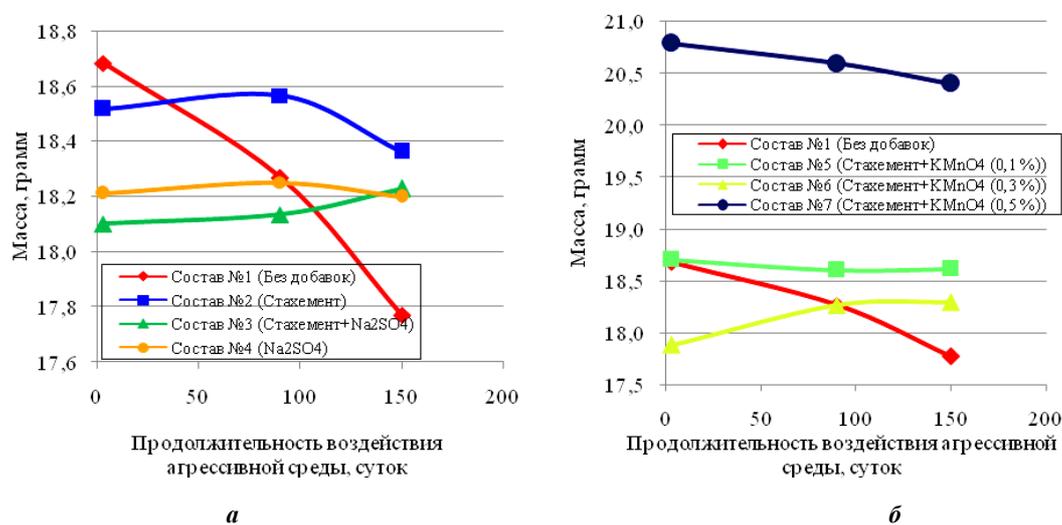
Комплексная добавка Стахемент 2000М Ж30 (0,6%)+ $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (1%) обеспечивает интенсивный набор прочности в ранние сроки твердения, прочность в возрасте 3 суток после ТВО превышала прочность контрольного состава на 7,76%, через 5 месяцев выдерживания в агрессивной среде превышение прочности составило 3,36%. Таким образом, комплексная добавка Стахемент 2000М Ж30+ $\text{KMnO}_4$  обладает фунгицидными свойствами, при этом оптимальная дозировка перманганата калия  $\text{KMnO}_4$  составляет 0,1–0,3% от массы цемента.

Потеря массы исследуемых образцов является еще одним критерием оценки биоцидных свойств исследуемых составов. В качестве контрольных значений принята масса образцов в возрасте 3-х суток после ТВО до погружения их в агрессивную среду. Изменение массы образцов цементного камня в зависимости от продолжительности воздействия агрессивной среды представлено в таблице 4.

Таблица 4. – Изменение массы исследуемых образцов в зависимости от продолжительности воздействия агрессивной среды

Номер состава	Масса образцов $m_{об}$ , г (%) в возрасте:	Масса образцов $m_{об}$ , г (%) в агрессивной среде через:	
	3 сут.	3 месяца	5 месяцев
1	18,682 (100)	18,267 (97,78)	17,770 (95,12)
2	18,517 (100)	18,565 (100,26)	18,363 (99,17)
3	18,100 (100)	18,135 (100,19)	18,228 (100,71)
4	18,212 (100)	18,250 (100,21)	18,198 (99,92)
5	18,703 (100)	18,605 (99,48)	18,618 (99,55)
6	17,582 (100)	18,267 (103,90)	18,297 (104,07)
7	20,787 (100)	20,593 (99,07)	20,403 (98,15)

На рисунке 2 (а, б) представлены графики влияния продолжительности воздействия агрессивной среды на массу цементного камня, модифицированного добавками суперпластификатор Стахемент 2000М Ж30, ускорителем твердения  $Na_2SO_4$ , комплексными добавками Стахемент 2000М Ж30+ $Na_2SO_4$ , Стахемент 2000М Ж30+ $KMnO_4$ , Стахемент 2000М Ж30+ $KMnO_4$ .



**Рисунок 2. – Влияние продолжительности воздействия агрессивной среды на массу цементного камня, модифицированного добавками Стахемент 2000М Ж30+ $Na_2SO_4$  (а) и Стахемент 2000М Ж30+ $KMnO_4$  (б)**

Анализ показал, что в ходе эксперимента в основном происходит уменьшение массы образцов. Взвешивание кубиков в начале эксперимента, а также через 3 и 5 месяцев выдерживания в агрессивной среде показал, что массы отдельных образцов не только уменьшаются, но и увеличиваются (составы № 3 и № 6), по-видимому, за счет новообразований.

Измерение значения pH агрессивной среды проводилось в возрасте 3 и 5 месяцев. Результаты измерений представлены в таблице 5. Значение измеренных pH, которое составило 3,41, сравнивалось с pH исходной агрессивной среды.

Известно [5], что кристаллогидраты (гидросиликаты, алюминаты и ферриты кальция), образующиеся при взаимодействии с водой клинкерных минералов и составляющие вместе с наполнителями цементный камень, имеют значительную равновесную растворимость в воде. Это значит, что они остаются устойчивыми при контакте с водой, только в том случае, если в воде имеется достаточная концентрация  $Ca(OH)_2$ . В случае если концентрация в воде  $Ca(OH)_2$  ниже равновесной, у гидрата будут отщепляться молекулы извести, и концентрация будет восстанавливаться до равновесной. Чем выше концентрация извести в порах цементного камня, тем выше скорость выщелачивания.

Показано [6], что схожий с изложенным механизм имеет кислотная коррозия в среде кислот, таких как уксусная, молочная и т.п. Отличие кислотной коррозии от коррозии выщелачивания состоит в том, что в данном случае происходит не гидролиз и растворение в воде гидросиликатов кальция и других гидратных фаз, а разрушение последних в водных растворах кислот.

Таблица 5. – Динамика изменения pH агрессивной среды

Номер состава	Начальное значение pH агрессивной среды	pH агрессивной среды с исследуемыми образцами	
		3 месяца	5 месяцев
1	3,41	11,39	10,46
2		11,41	10,59
3		11,45	11,30
4		11,44	10,64
5		11,46	10,82
6		11,42	10,86
7		11,35	10,58

Таким образом, выдерживание образцов в течение 3 месяцев в агрессивной среде органических кислот привело к выщелачиванию и увеличению значения pH окружающей образцы агрессивной среды с 3,41 до 11,4 (снижение кислотности контактирующего раствора органических кислот). Дальнейшее выдерживание образцов в течение 5 месяцев в агрессивной среде приводит к уменьшению pH среды, т.е. начинается процесс разрушения гидросиликатов кальция. Установлено, что менее подвержены коррозионным процессам составы № 3, № 5 и № 6, для которых значение pH составило соответственно 11,30, 10,82 и 10,86 после 5 месяцев воздействия агрессивной среды.

**Заключение.** Экспериментально установлена кинетика изменения прочности, потери массы и pH среды цементного камня, модифицированного комплексными добавками на основе суперпластификатора Стахемент 2000М Ж30, под воздействием агрессивной среды растворов органических кислот, являющихся продуктами жизнедеятельности плесневых грибов. Определено, что образцы цементного камня, модифицированные комплексными добавками Стахемент (0,6%)+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1%), Стахемент (0,6 %)+KMnO<sub>4</sub> (0,1...0,3%), более устойчивы к воздействию агрессивной среды. Исследуемые комплексные добавки обладают фунгицидным действием, позволяют получать цементные композиты с повышенной плотностью и прочностью для эксплуатации в условиях биологически активных сред.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Parfenova, L. Protection from construction biodeteriorations / L. Parfenova, A. Shauro, A. Karmalys // European and national dimension in research : materials of conference : in 3 parts, Novopolotsk, 2016. – Part 3. Technology. – 2016. – С. 71–72.
2. Строганов, В.Ф. Методика испытаний минеральных строительных материалов на биостойкость / В.Ф. Строганов, Д.А. Куколева // Изв. КГАСУ. – 2011. – № 3 (17). – С. 150–156.
3. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : ГОСТ 10180-2012 / Гос. стандарт России. – М., 2013. – 36 с.
4. Денисова, Ю.В. К вопросу использования фунгицидных добавок в борьбе с биокоррозией композиционных соединений / Ю.В. Денисова // Вестн. науки и образования Северо-Запада России. – Т. 1, № 1. – 2015. – С. 4.
5. Парфёнов, С.Г. К вопросу влияния степени агрессивности среды на коррозию железобетона / С.Г. Парфёнов, М.В. Моргунов // Вестн. ВолгГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2013. – Вып. 31 (50). Ч. 2 : Строительные науки. – С. 3.
6. Толыпина, Н.М. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / Н.М. Толыпина. – Белгород, 2014. – 354 л.

Поступила 05.06.2017

#### BIOSTABILITY OF MODIFIED CEMENT STONE TO THE MOLDY MUSHROOMS

L. PARFIONOVA, J. VISHNIAKOVA, A. SHAURO

*The paper presents the results of studies of the biostability of cement stone, modified with the superplasticizer Stachement 2000M G30 and complex additives based on it. The degree of exposure of moldy mushrooms to cement stone was evaluated by immersing the samples in a model medium from solutions of three organic acids, which are the products of the vital activity of microorganisms. It is shown that samples of cement stone with complex additives are more resistant to the influence of an aggressive environment in terms of strength, weight loss and pH change of the model medium. It was found that the complex additives Stachement 2000M G30 (0,6%)+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1%), Stachement 2000M G30 (0,6%)+KMnO<sub>4</sub> (0,1%...0,3%) in optimal dosages have fungicidal action and allow to obtain a cement stone resistant to the effects of moldy mushrooms.*

**Keywords:** biostability, cement stone, complex additives, model medium, moldy mushrooms.

УДК 691.322:004.421

**МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ  
СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ  
И НАПЕЧАТАННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ ОБРАЗЦОВ****канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ; Е.А. ЗЯБКИН; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Представлен анализ деформационно-прочностных характеристик волокнистых композитов, а также напечатанных на 3D-принтере образцов. Обнаружены некоторые специфические направленные механизмы разрушения (расслоения, расщепления, скол вдоль волокон, полосы сдвига). Сделан вывод, что для численного описания таких видов разрушения необходимы нетрадиционные подходы, новые специальные модели разрушения и критерии прочности, учитывающие взаимодействие нормальных и касательных напряжений на плоскости разрушения. Показано, что использование простых линейных критериев прочности позволяет лучше интерпретировать экспериментальные данные и оценивать в опытах прочностные параметры целостности композитных структур.*

**Ключевые слова:** *растяжение, напряжение, 3D-принтер, стеклопластиковая арматура, деформация.*

**Введение.** Актуальность развития новых методов, учитывающих неоднородность полей напряжений и деформаций в структурных элементах, а также многостадийность процессов микро- и макроразрушения, связана с необходимостью получения новых данных о влиянии параметров структуры на неупругое механическое поведение и эффективные деформационные и прочностные свойства структурно неоднородных сред [1–10].

Одна из особенностей неупругого поведения материалов – закритическая стадия деформирования. Вопросы теоретического и экспериментального изучения закономерностей закритического деформирования материалов привлекают внимание исследователей в связи с необходимостью использования деформационных резервов материалов, повышения несущей способности и живучести конструкций. Развитие методов расчета ответственных конструкций с оценкой их живучести и безопасности требует получения информации о закономерностях механического поведения композиционных материалов на стадии закритического деформирования [2].

Разрушение конструкционных материалов может происходить по одному из двух направлений: может быть пластичным или хрупким. Эта классификация основана на том, могут ли в материале создаваться пластические деформации. Для пластических материалов характерны большие *пластические деформации*, т.е. материалы поглощают большую энергию деформирования до наступления разрушения. При *хрупком разрушении*, напротив, пластические деформации либо отсутствуют, либо очень малы, и поглощения энергии до разрушения не происходит [3].

В последние годы на мировом рынке активно применяются решения, способные преобразить всю инвестиционно - строительную деятельность – это широко известные в мире информационные технологии, в частности BIM & IPD-технологии, а также 3D-печать.

Изучение факторов пластичности и хрупкости, влияющих на характер процессов образования и развития дефектов, связано с исследованиями явления деформационного разупрочнения материалов на закритической стадии деформирования, непосредственно предшествующей моменту разрушения [1].

«Пластичность» и «хрупкость» – это лишь условные термины. То, каким образом разрушение происходит в действительности, зависит от конкретных обстоятельств. Пластичность можно количественно охарактеризовать относительным удлинением или относительным уменьшением поперечного сечения; пластичность зависит от температуры, скорости деформации, а также от вида напряженного состояния [3].

Любой процесс разрушения происходит в два этапа: вначале образуется трещина, которая затем распространяется. Характер разрушения в высокой степени зависит от механизма разрушения. Для пластичных материалов характерно то, что впереди растущей трещины и вокруг нее развивается область пластических деформаций, при этом процесс распространения трещины происходит относительно медленно. Такие трещины часто характеризуют термином «стабильные». В этом случае материал сопротивляется дальнейшему развитию трещины, если только напряжение не увеличивается. Кроме того, визуально наблюдаются крупномасштабные деформации на поверхности разрушения в виде полос кручения и задира. В случае же хрупкого разрушения, напротив, трещина распространяется очень быстро без каких-либо заметных пластических деформаций. Трещину в этом случае характеризуют как неустойчивую, а развитие трещины после того, как она возникла, происходит самопроизвольно без увеличения приложенного напряжения.

Разрушение не происходит при фиксированном для данного материала значении какой-либо меры напряженного состояния в точке. Условия разрушения формируются в процессе деформирования, имеют нелокальный характер и ключевым образом определяются не только свойствами среды, но и механическими свойствами нагружающей системы, что приводит к отказу от использования критериев прочности в традиционном их понимании. Предлагаемый альтернативный подход заключается в том, что условия разрушения в результате потери устойчивости процесса неупругого деформирования определяются непосредственно из решения краевой задачи, при формулировке которой диссипативные свойства материала учитываются в определяющих соотношениях с помощью материальных функций, а условия нагружения – с помощью локальных или нелокальных граничных условий контактного типа [2].

Теоретические положения иллюстрируются аналитическими решениями простейших задач для тел с зонами разупрочнения и стержневых систем, численными решениями краевых задач механики неупругого деформирования и разрушения для тел с концентраторами напряжений и композитов волокнистой, слоистой и зернистой структур [2].

Испытания проводились в лабораторных условиях на стенде, предназначенном для проведения статических испытаний прочности материалов на осевое растяжение/сжатие.



Рисунок 1. – Образец в разрывной машине

Разрывная машина (рисунок 1) имеет механизированный привод управления активным захватом с программным управлением, осуществляемым при помощи персонального компьютера. Программное обеспечение позволяет проводить испытания образцов по заранее заданным параметрам с установкой требуемой скорости испытания. Графический вывод экспериментальных зависимостей в режиме реального времени. Возможность сохранения результатов эксперимента в отдельный файл для дальнейшей обработки в сторонних приложениях облегчает проведение эксперимента и делает его более наглядным. Конструктивно разрывная машина выполнена в виде двух полурам, причем верхняя полурама имеет возможность перемещаться вдоль вертикальной оси относительно нижней. Неподвижная полурама – сварная конструкция, соединенная с подвижной, выполняющей функцию приводного механизма. Испытуемые образцы устанавливаются в захваты, имеющие бортики для фиксации. Усилия, возникающие в образцах при растяжении, регистрируются весовым датчиком. Показания величины усилий и деформаций передаются на компьютер, который подключен к внешнему блоку измерения.

На рисунке 2 представлены результаты испытаний образцов (А – стеклопластик; Б – напечатанный на 3D-принтере) на растяжение в разрывной машине НТЦ-13.04.20.

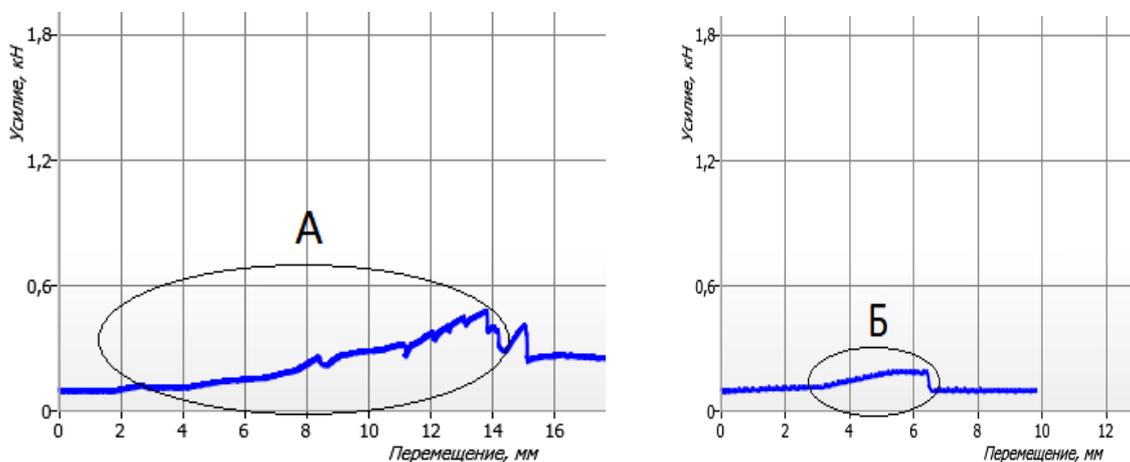


Рисунок 2. – Результаты испытаний образцов на растяжение

В ходе анализа напряженно-деформированного состояния стеклопластикового образца установлена зависимость, представленная на рисунке 3.

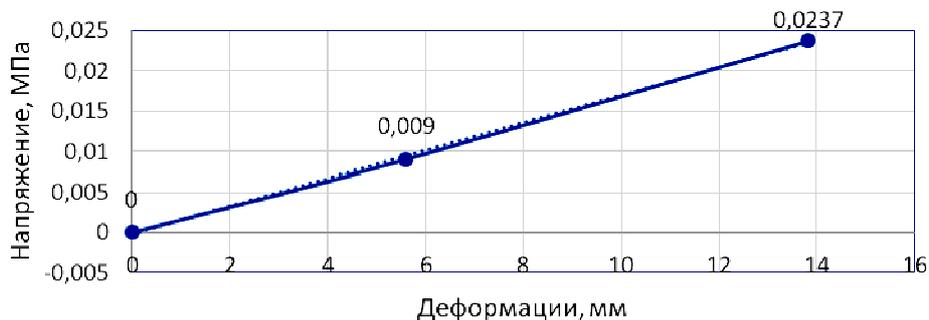


Рисунок 3. – Напряженно-деформированное состояние стеклопластикового образца

Установлено, что разрушение образца из стекловолокна (рисунок 4) происходило в несколько стадий:  
 - при достижении напряжений в образце 0,0237 МПа наблюдается разрыв внешних волокон;  
 - при дальнейшем нагружении стержень разрывается по своему сечению.  
 Диаграмма «напряжение – деформация» практически линейная вплоть до разрушения арматуры.



Рисунок 4. – Результат испытания стеклопластикового образца

Исследование напряженно-деформированного состояния образца, напечатанного на 3D-принтере, выявило схожую зависимость (рисунок 5).

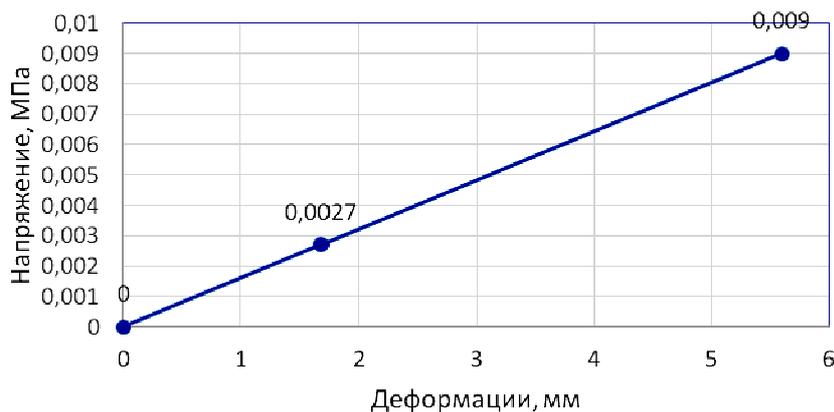
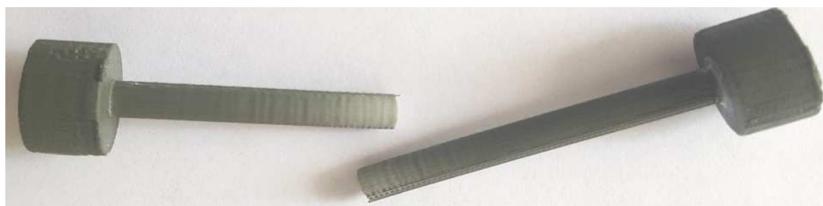


Рисунок 5. – Напряженно-деформированное состояние образца, напечатанного на 3D-принтере

Изучив характер разрушения напечатанного образца (рисунок 6), сделаны следующие **выводы**:  
 - *характер разрушения хрупкий*. Такое разрушение происходит в отсутствие заметных деформаций путем быстрого распространения трещины. Направление развития трещины близко к строго перпендикулярному направлению приложения нагрузки, а поверхность разрыва в этом случае сравнительно гладкая;

- *предел прочности полимерных материалов невелик по сравнению с прочностью стеклопластиков*. Как правило, термореактивным полимерам присуще хрупкое разрушение. Процесс разрушения

происходит таким образом, что трещина образуется в области, в которой имеет место концентрация напряжений (т.е. царапины, надрезы и полости).



**Рисунок 6. – Результат испытания напечатанного на 3D-принтере образца**

Таким образом, подытоживая результаты проведенного модельного анализа критериев прочности стеклопластиковой арматуры периодического профиля и напечатанных на 3D-принтере образцов, можно сделать вывод, что характер разрушения образцов кардинально отличается друг от друга.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вильдеман, В.Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В.Э. Вильдеман, Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов. – М. : Наука. Физматлит, 1997. – 288 с.
2. Вильдеман, В.Э. Моделирование процессов структурного разрушения и масштабных эффектов разупрочнения на закритической стадии деформирования неоднородных сред / В.Э. Вильдеман, А.В. Ильиных // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т. 10, № 4. – С 23–31.
3. Каллистер, У. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры) / У. Каллистер, Д. Ритвич. – СПб. : Науч. основы и технологии, 2011. – 896 с.
4. Мекеров, Б.А. Аналитические описания для диаграммы растяжения высокопрочной арматурной стали / Б.А. Мекеров, Р.Л. Маилян // Новые виды арматуры и ее сварка : сб. докл. Всесоюз. совещ. в Волгограде, 1982. – С. 166–171.
5. Джигрин, А.В. Исследование структуры композита со спирально армированным наполнителем для анкерной крепи / А.В. Джигрин, И.В. Махраков // Изв. высш. учеб. заведений. Горный журн. – 2012. – № 2. – С. 38–43.
6. Полилов, А.Н. Экспериментальное обоснование критериев прочности волокнистых композитов, проявляющих направленный характер разрушения / А.Н. Полилов, Н.А. Татусь // Вестн. Перм. нац. исслед. Политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 2. – С. 140–166.
7. Луговой, А.Н. Композитная арматура миф или будущее [Электронный ресурс] / А.Н. Луговой, В.Ф. Савин. – URL: [http://www.sskural.ru/meropriyatiya/?ELEMENT\\_ID=3040](http://www.sskural.ru/meropriyatiya/?ELEMENT_ID=3040). – Дата обращения: 10.08.2013.
8. Белянкин, Ф.П. Прочность и деформативность слоистых пластиков / Ф.П. Белянкин, В.Ф. Яценко, Г.И. Дыбенко. – Киев : Наукова думка, 1964. – 220 с.
9. С.А. Лурье, Юсефи Шахрам Об определении эффективных характеристик неоднородных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 1997. – Т. 3, № 4. – С. 76–92.
10. Полилов, А.Н. Неупругие свойства композиционных материалов / А.Н. Полилов // Новое в зарубежной науке. Механика. Вып. 16. – М. : Мир, 1978. – 296 с.

Поступила 18.05.2017

#### MODEL ANALYSIS OF STRENGTH CRITERIA FIBERGLASS REINFORCEMENT FOR THE PERIODIC PROFILE AND PRINTED ON 3D-PRINTER SAMPLES

*D. SHABANOV; E. ZIABKIN; E. TRAMBITSKY*

*The article presents analysis of deformation-strength characteristics of fibrous composites, as well as samples printed on a 3D printer. Some specific directional mechanisms of destruction (stratification, splitting, cleavage along the fibers, shear bands) are found. The conclusion is drawn that non-traditional approaches, new special models of fracture and strength criteria, which take into account the interaction of normal and tangential stresses on the failure plane, are needed to numerically describe these types of fracture. It is shown that the use of simple linear strength criteria makes it possible to better interpret the experimental data and to evaluate the strength parameters of the integrity of composite structures in the experiments.*

**Keywords:** extension, tension, 3D printer, fiberglass reinforcement, deformation.

УДК 691.5.535

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КЛАДОЧНЫХ ЦЕМЕНТНО-ИЗВЕСТКОВЫХ РАСТВОРОВ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ ШЛАМА ИЗВЕСТКОВАНИЯ**

**А.С. КАТУЛЬСКАЯ; канд. техн. наук, доц. Ю.В. ВИШНЯКОВА;  
канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА  
(Полоцкий государственный университет)**

*Рассматривается проблема размещения отходов водоподготовки. Предложено использовать шлам известкования в качестве заполнителя в кладочных цементно-известковых растворах. Выполнены исследования по определению подвижности, водоудерживающей способности растворных смесей, а также прочности на сжатие, коэффициента теплопроводности, водопоглощения и прочности растворов в водонасыщенном состоянии.*

**Ключевые слова:** *кладочные растворы, шлам известкования, заполнитель, жизнеспособность, водоудерживающая способность, прочность на сжатие.*

На крупных предприятиях теплоэнергетики, таких как ТЭЦ, значительное количество образующихся отходов представляют собой отходы водоподготовки [1] – недопал извести, шлам химводоочистки (ХВО), фильтрующие материалы. На большинстве этих мероприятий имеются находящиеся на балансе самого предприятия и согласованные с природоохранными органами места временного размещения данных видов отходов – шламоотвалы.

Шлам образуется на водоподготовительных установках при обработке воды, предназначенной для восполнения потерь пара конденсата, сетевой воды ТЭЦ и для потребителей. Качество очищенной воды, подаваемой в пароводяной цикл котлов, обеспечивает безаварийный режим их работы, что, в свою очередь, влияет на надежность и экономичность работы всей ТЭЦ.

Шламонакопители – одни из основных источников гидродинамического воздействия на окружающую среду, вызывают изменение уровня подземных вод, оказывая тем самым отрицательное влияние на селитебную зону.

Подотвальные воды загрязняют поверхностные водоемы, грунтовые воды и почвы токсичными элементами.

Вторичное пыление и газовыделение с поверхности шламонакопителя вызывают загрязнение токсичными соединениями не только атмосферы в районе размещения шламонакопителя, но и почвы вокруг них.

Рабочие площадки, включающие систему пульпопроводов для транспортировки шламов к шламонакопителям, также требуют отвода определенных земельных участков и загрязняют почву и грунтовые воды при повреждении труб и насосов [2].

Важным этапом является разработка мер по предупреждению, сокращению, компенсации и ликвидации потенциального ущерба окружающей природной среде от шламонакопителя. Решить данную задачу наиболее полно можно за счет применения шламов в качестве сырья самой материалоемкой отрасли народного хозяйства – строительной индустрии, разнообразие продукции которой позволяет найти рациональное направление утилизации практически каждого вида отходов данной группы [3].

Шламовые отходы образуются в результате химводоочистки и умягчения воды на ТЭЦ и являются одним из многотоннажных побочных продуктов энергетической отрасли промышленности [4]. Проблема утилизации шлама не решена до настоящего времени. Практически половина шлама водоподготовки образуется на территории Витебской области. Наиболее крупный производитель шлама – Новополоцкая ТЭЦ.

Перед поступлением в технологический цикл вода подвергается обязательной очистке [5]. Для питания котлоагрегатов теплоэлектростанций производят забор пресной речной воды, содержащей в растворенном состоянии небольшие количества бикарбонатов, хлоридов, сульфатов, силикатов и других элементов. С целью снижения жесткости воды производится химическая очистка путем добавления заранее приготовленного известкового молока. После того как начался процесс известкования, вода попадает в сакуратор. Далее из распределительной струи производится забор воды, после чего путем химического анализа в лаборатории определяют требуемое количество извести.

На следующем этапе очистки вода нагревается от 40 до 50 °С и происходит частичное смешивание с известью. Затем вода проходит через механические фильтры 1-й и 2-й ступени для умягчения и удаления примесей. Отфильтрованная вода поступает в дэаратор, температура внутри которого дном достигает 102...105 °С. В дэараторе происходит удаление кислорода из воды, после чего она попадает в паровые котлы, производящие до 20 т пара в час.

В процессе химводоочистки образуется осадок – шлам, представляющий собой вторичный отход. Чаще всего шлам водоочистки вывозится на полигон промышленных отходов или на полигон твердых бытовых отходов для изоляции слоев складываемых отходов. Однако в силу своего дисперсного и химического состава шлам ТЭЦ в перспективе может быть использован в различных технологических процессах.

Для углубления эффекта декарбонизации и удаления других примесей в обрабатываемую воду наряду с известью дозируется коагулянт – семиводный сульфат закиси железа (железный купорос).

Назначение коагуляции – удаление веществ, присутствующих в виде механических примесей, органических соединений, железа и кремния.

В присутствии извести происходит гидролиз железного купороса и дальнейшее окисление железа кислородом, растворяющимся при барботаже воздуха, и образуется гидроксид железа (III). Первоначально это коллоидная система, а затем хлопья за счет избыточной свободной энергии механически захватывают естественную взвесь и органические примеси, присутствующие в исходной воде.

Для получения заполнителя шлам, прошедший через вакуум-фильтры или осветлители на тепловых электроцентралях, высушивали в сушильном шкафу марки «SNOL 58/350» в течение 5 часов до постоянной массы при температуре 110 °С. Высушенный шлам в виде комьев охлаждали на воздухе в помещении лаборатории. Помол материала производили в барабанной лабораторной мельнице марки МБЛ и просеивали на механических ситах марки СМ. Максимальный размер частиц заполнителя варьировался пределах от 80 до 200 мкм. Готовый заполнитель хранили при относительной влажности воздуха в помещении 60±5%. Величину истинной плотности определяли по ГОСТ 8735[6], она составила 2170 кг/м<sup>3</sup>. Насыпная плотность 780 кг/м<sup>3</sup> соответствует СТБ ЕН 1097-3 [7].

**Основная часть.** В проводимых исследованиях ставится задача получения заполнителя на основе шлама известкования, применение которого позволит получить цементно-известковые кладочные растворы, соответствующие требованиям СТБ 1307 [8].

Для установления возможности применения шлама в качестве заполнителя в цементно-известковых растворах проведены исследования прочности композиций на цементах ПЦ500 Д0 завода ОАО «Красносельскстройматериалы». В качестве контрольного принят состав цементно-известкового кладочного раствора марки М75 при подвижности 8 см с водоудерживающей способностью 97,3%. В экспериментальных составах вместо песка использовали шлам известкования в виде порошка. Шлам известкования разных фракций (не более 80, 100, 140 и 200 мкм) вводили в количестве 10% от массы песка, необходимой по расчету. Результаты определения прочности и водоудерживающей способности растворных смесей с порошком шлама представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Зависимость прочности раствора от фракции шлама

Максимальный размер зерен, мкм	Прочность (7 сут), МПа	Прочность (28 сут), МПа	Водоудерживающая способность
80	3,9	6,5	97,4
100	4,0	6,8	97,8
140	4,5	7,7	97,9
200	4,4	7,3	97,5

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при увеличении фракции шлама с 80 до 140 мкм происходит постепенное увеличение прочности с 6,5 до 7,7 МПа. Дальнейшее увеличение фракции шлама ведет к уменьшению прочности при фракции 200 мкм. При этом водоудерживающая способность превышает показатель контрольного состава, который составляет 97,3%.

Дальнейшие исследования проводились с использованием порошка шлама фракцией 140 мкм. Состав с добавкой шлама фракцией 140 мкм имеет водоудерживающую способность выше, чем у контрольного, при этом прочность значительно превышает значение контрольного состава.

С целью определения оптимальной дозировки и максимального размера зерен порошка шлама проведены исследования по определению основных показателей качества кладочных цементно-известковых растворов с заполнителем.

В экспериментальных составах расход цемента составлял 160 кг, соотношение цемента, извести и песка принято (1: 1,2: 9,6). Шлам вводили в количестве от 30 до 10% от массы песка, необходимым по расчету. Результаты исследований приведены в таблице 2. Дозировки добавки шлама приведены в таблице 2 по сухому веществу.

При введении шлама известкования в количестве 20, 25 и 30% от массы песка водоудерживающая способность ниже контрольного показателя, а при введении 10 и 15% этот показатель качества выше значения контрольного состава.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что оптимальной является добавка порошка шлама с максимальным размером зерен 140 мкм в количестве 15% от расчетной массы песка (состав 3).

Таблица 2. – Основные показатели качества кладочных растворных смесей и растворов

№ состава	Расход компонентов, кг				В/Ц	Водоудерживающая способность, %	Прочность, МПа	
	цемент	известь	песок	шлам известкования			7 сут	28 сут
1	160	192	1536	–	2,3	97,3	4,6	7,6
2	160	192	1382	153 (10%)*	2,1	97,9	4,5	7,7
3	160	192	1305,6	230,4 (15%)	2,1	98,1	4,7	7,9
4	160	192	1228,8	307,2 (20%)	2,0	96,5	4,4	7,5
5	160	192	1152	384 (25%)	1,9	96,3	4,2	7,2
6	160	192	1075,2	460,8 (30%)	2,2	96,1	4,1	6,8

\* – масса ввода порошка шлама известкования в процентах от массы песка, требуемого по расчету.

Теплопроводность кладочных растворов определяли на составах марки М 75.

Контрольным являлся цементно-известковый раствор. Для определения коэффициента теплопроводности использовались предварительно изготовленные из растворных смесей плитки размером 250×250×30 мм. Формовались на керамическом основании. Для предварительного сцепления раствора с кирпичом предварительно на поверхность укладывалась увлажненная промокательная бумага. После 28 суток набора прочности образцы высушивались в сушильном шкафу марки «SNOL 58/350» до постоянной массы при температуре 110 °С. После остывания плитки помещали в прибор для определения теплопроводности и проводили испытания.

Результаты исследований приведены в таблице 3.

Показатель плотности, коэффициент теплопроводности приведены для растворов в сухом состоянии.

Таблица 3. – Изменение плотности и коэффициента теплопроводности растворов в зависимости от расхода шлама

№ состава	Расход компонентов, кг				Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
	цемент	известь	песок	шлам известкования		
1	160	192	1536	–	1860	0,47
2	160	192	1382	153, 6 (10%)*	1970	0,41
3	160	192	1305,6	230, 4 (15%)	1990	0,46

\* – масса ввода порошка шлама известкования в процентах от массы песка, требуемого по расчету.

В экспериментальных составах плотность увеличилась относительно контрольного раствора на 110...130 кг/м<sup>3</sup>.

Увеличение плотности растворов обусловлено формированием оптимально плотной структуры, понижающей исходную пустотность системы.

Формирование более плотной структуры экспериментальных растворов ведет к уменьшению открытой пористости по сравнению с контрольным составом. Поэтому, несмотря на более высокую плотность эксплуатационных составов, коэффициент теплопроводности уменьшился на 12,8 и 2%, ниже значения контрольного состава.

В связи с необходимостью выявления эксплуатационных свойств кладочных растворов исследовалось водопоглощение и прочность растворов в водонасыщенном состоянии.

Водопоглощение и прочность в водонасыщенном состоянии определяли по ГОСТ 5802 [9] на растворах марки 75. За контрольный принят цементно-известковый раствор. Расход порошка шлама размером зерен не более 140 мкм варьировался в пределах от 10 до 30% от массы песка, требуемой по расчету. Полученные данные приведены в таблице 4.

Важным свойством кладочных растворов является их жизнеспособность – свойство растворной смеси длительное время сохранять первоначальную подвижность.

Для выяснения возможного срока применения растворной смеси с заполнителем из порошка шлама известкования оценивалось изменение подвижности растворных смесей с течением времени. Исследования проводились на цементно-известковом растворе с заполнителем из порошка шлама известкования с максимальным размером зерен не более 140 мкм в количестве 10 и 15% от расчетной массы песка. Начальная подвижность принята равной 9 см. Исследование проводилось на протяжении 7 часов. Резкое падение подвижности контрольного состава происходило в течение 0,5 часа с 9 до 7,8 см. Подвижность цементно-известкового раствора с добавкой шлама в количестве 10% от массы песка значительно изменилась – в течение 0,5 часа с 9 до 7,9 см. При этом подвижность состава с добавкой шлама в количестве 15% от массы песка уменьшилась незначительно. Подвижность контрольного состава упала до 7 см через 2 часа, а экспериментальных составов с добавлением порошка шлама в количестве 10 и 15% от массы песка через 1 и 4,5 часа соответственно.

Таблица 4. – Изменение водопоглощения и прочности растворов в зависимости от расхода шлама

№ состава	Расход компонентов, кг				Водопоглощение, %		Прочность, МПа	
	цемент	известь	песок	шлам известкования	по массе	по объему	в сухом	в водонасыщенном состоянии
1	160	192	1536	–	7,48	13,07	4,6	4,3 (43%)**
2	160	192	1382	153 (10%)*	10,05	17,57	4,5	4,6 (40%)
3	160	192	1305,6	230,4 (15%)	7,55	14,46	4,7	5,0 (37%)
4	160	192	1228,8	307,2 (20%)	9,08	15,87	4,4	4,3 (43%)
5	160	192	1152	384 (25%)	10,57	17,88	4,2	3,7 (49%)
6	160	192	1075,2	460,8 (30%)	11,19	19,02	4,1	3,5 (49%)

\* – масса ввода порошка шлама известкования в процентах от массы песка, требуемого по расчету; \*\* – разность между прочностями растворов в нормально-влажностных условиях и в водонасыщенном состоянии, выраженная в процентах

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что применение порошка шлама в цементно-известковых кладочных растворах, позволяет увеличить время использования растворной смеси.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

- 1) проведенные исследования указывают на возможность эффективного применения шлама известкования в кладочных растворах и растворных смесях;
- 2) анализ полученных результатов показал, что при увеличении дозировки порошка шлама от 20 до 30% от массы песка в составе кладочных растворов и смесей уменьшает их прочность;
- 3) наиболее оптимальной является дозировка порошка шлама в количестве 15% от массы песка, требуемой по расчету, так как этот состав обладает наибольшей теплопроводностью, а также имеет наибольшую жизнеспособность по сравнению с другими экспериментальными составами;
- 4) полученные положительные результаты исследований по прочности, водоудерживающей способности, водопоглощению, жизнеспособности подтверждают соответствие кладочных растворов, содержащих порошок шлама известкования, требованиям СТБ 1307 [8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Найман, С.М. Количественная оценка шлама от химводоподготовки / С.М. Найман, Ч.Б. Лебедева // Вестн. технолог. ун-та. Т 18. – 2015. – № 17. – С. 98–103.

2. Касимов, А.М. Экологические и экономические инструменты сокращения ущерба окружающей среде со стороны накопителей промышленных отходов / А.М. Касимов, И.В. Гуренко, И.Н. Мацевитая // Экология и промышленность. – 2013. – № 1. – С. 79–83.
3. Николаева, Л.А. Ресурсосберегающая технология утилизации шлама водоподготовки на ТЭС / Л.А. Николаева, Е.Н. Бородай. – Казань : КГЭУ, 2012. – 110 с.
4. Медяник, Ю.В. Исследование свойств смешанных цементов с наполнителем из шламовых отходов теплоэлектростанций / Ю.В. Медяник // Изв. КГАСУ. – 2015. – № 2. – С. 249–255.
5. Исследование физико-химических свойств шлама водоочистки Белгородской ТЭЦ / С.В. Свергузова [и др.] // Вестн. Казан. технолог. ун-та. – 2014. – С. 164–166.
6. Песок для строительных работ. Методы испытаний : ГОСТ 8735-88. – Взамен ГОСТ 8735-75, ГОСТ 25589-83 ; введ. 01.07.1989. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 22 с.
7. Методы испытаний по определению механических и физических характеристик гранулометрических фракций горных пород. – Минск : Госстандарт, 1998. – Ч. 3 : Определение насыпной плотности и пустотности : СТБ ЕН 1097-3-2007 ; введ. 01.10.98. – 3 с.
8. Смеси растворные и растворы строительные. Технические условия : СТБ 1307-2012. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2012. – 22 с.
9. Растворы строительные. Методы испытаний : ГОСТ 5802-86 / Госстрой ССР. – М. : Стройиздат, 1986. – 22 с.

Поступила 10.06.2017

#### OPERATING PROPERTIES OF CEMENT-LIME MASONRY MORTARS WITH AGGREGATE OF LIMING SLUDGE

A. KATULSKAYA, Y. VISHNYAKOVA, L. PARFIONOVA

*The problem of water treatment waste disposal is considered. It is proposed to use liming sludge as a filler in mortar lime mortar. Studies have been carried out to determine the mobility, water-retaining capacity of mortar mixtures, as well as compressive strength, thermal conductivity, water absorption and strength of solutions in the water-saturated state.*

**Keywords:** masonry mortars, sludge liming, aggregate, vitality, water retention ability, compressive strength.

УДК 691.322:004.421

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ**

*канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ;  
Е.А. ЗЯБКИН; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ*

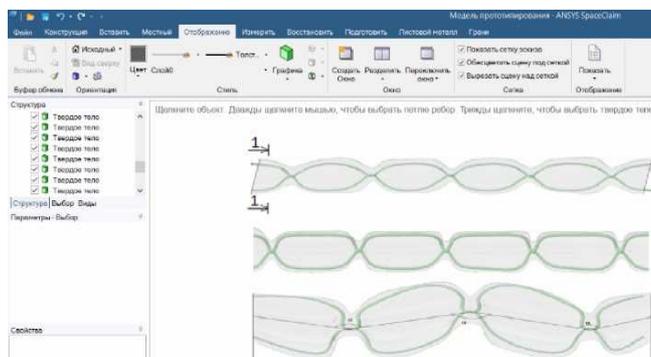
*Представлен пример современных систем инженерного анализа, информационного моделирования, позволяющих численными методами решать различные задачи, в частности определение физико-механических и деформационных характеристик преднатянутой стеклопластиковой арматуры. Грамотная постановка задачи с применением 3D-моделей существенно влияет на скорость исследования оценки строительных элементов различных конфигураций и их характеристик. Полученные результаты отличаются высокой степенью точности, что позволяет в некоторых случаях не прибегать к натурным испытаниям. Кроме того, благодаря построенной 3D-модели возможно наблюдать процесс деформации элемента в режиме «реального времени». В дальнейшем, на основе принципов подобия, полученные данные можно применить и для других материалов.*

**Ключевые слова:** *стеклопластиковая арматура, растяжение, деформация, информационное моделирование, T-FLEX CAD.*

**Введение.** Во многих случаях необходимо подтверждение работоспособности или проверка определенных эксплуатационных характеристик конструкций. Наиболее простой способ проверки работоспособности и надежности – создание опытных образцов или макетов с последующим испытанием в условиях, приближенных к реальным. Однако натурные испытания с помощью физических прототипов являются длительными и затратными, поэтому наиболее эффективным считается проведение виртуальных испытаний с применением современных систем инженерного анализа, CAE (Computer-Aided Engineering). Такая система позволяет численными методами решать различные задачи для определения физико-механических свойств исследуемых моделей [1].

Часто имитационное моделирование полностью заменяет натурные эксперименты. В случаях, когда необходимы испытания на физических образцах, имитационное моделирование позволяет существенно сократить количество экспериментов, подобрав оптимальные параметры конструкции, тем самым сократив издержки на апробацию результатов или сертификацию изделия. Зачастую результаты виртуальных испытаний дают более широкую картину происходящих процессов, чем натуральный эксперимент, предоставляя больше возможностей для оптимизации и улучшения эксплуатационных характеристик, экономя при этом значительные средства и время. Кроме того, практикуется применение численно-экспериментальных методов исследований, когда результаты натурных испытаний дополняются результатами имитационного моделирования, которые недостижимы в натурном эксперименте [2]. В этом случае достоверность результатов автоматически подтверждается корреляцией полученного решения с экспериментальным.

**Исследовательская часть.** Цель представляемой работы состоит в исследовании ранее смоделированного нами стержня [3] на растяжение неразрушающими методами. Для реализации задачи использовались программные продукты комплексов ANSYS SpaceClaim и T-FLEX PLM – T-FLEX CAD и T-FLEX Анализ (рисунк 1).



**Рисунок 1. – Рабочее окно программы ANSYS SpaceClaim с 3D-моделями профилей стеклопластиковой арматуры различной формы**

Для дальнейшего исследования выбран профиль эллиптической формы, представленный на рисунке 2 (получено положительное решение на получение патента).

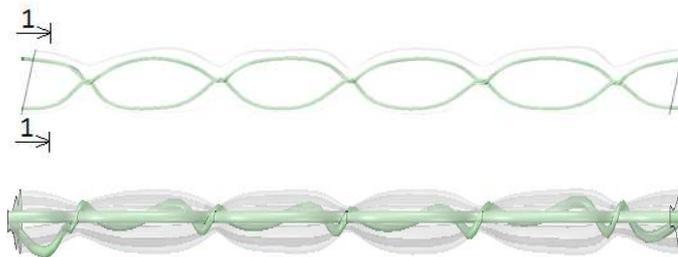


Рисунок 2. – Профиль стеклопластиковой арматуры эллиптической формы

Отличительные признаки арматурного стержня:

- иная форма выполнения элементов, а именно арматурного композитного стержня, имеющего места переплетения из жгутов нитей;
- взаиморасположение элементов, т.е. места переплетения, расположены с равным, регулируемым шагом между ними;
- дополнительная обработка стекловолокна специальными видами смол, обладающими таким свойством, как память, которое будет стремиться вернуть стержень в первоначальное состояние, до его вытягивания.

Применение стекловолокна при армировании цемента или бетона обусловлено использованием его значительной прочности на растяжение, невысоким модулем Юнга и неограниченно большой длиной. Один из способов использования стекловолокна заключается в том, что из ровинга получают жгуты, волокна в которых соединены вместе и покрыты пластиком, благодаря чему получают армирующий стержень, который может заменить стальную арматуру [4]. При этом толстое покрытие предохраняет стекловолокно от агрессивного действия среды. Известны исследования с предварительно напряженной арматурой. Модуль стекла довольно низкий для эффективного использования напряженной арматуры, но сочетание низкого модуля и высокой прочности на растяжение делают армирование конструкций перспективным способом [4]. Предельная величина предварительного напряжения  $\sigma$  стеклопластиковой арматуры периодического профиля составляет 0,30.

Испытания на растяжение неразрушающими методами осуществлены с помощью программного обеспечения T-FLEX CAD. В процессе проектирования в T-FLEX CAD использовалась 3D-модель стеклопластиковой арматуры периодического профиля. Фрагменты выполнены параметрическими, созданы окна диалогов управления. Это позволило ускорить работу по оптимизации геометрических размеров и формы элементов стержня, а также существенно ускорить выполнение прочностных расчетов в модуле T-FLEX Анализ (рисунок 3).

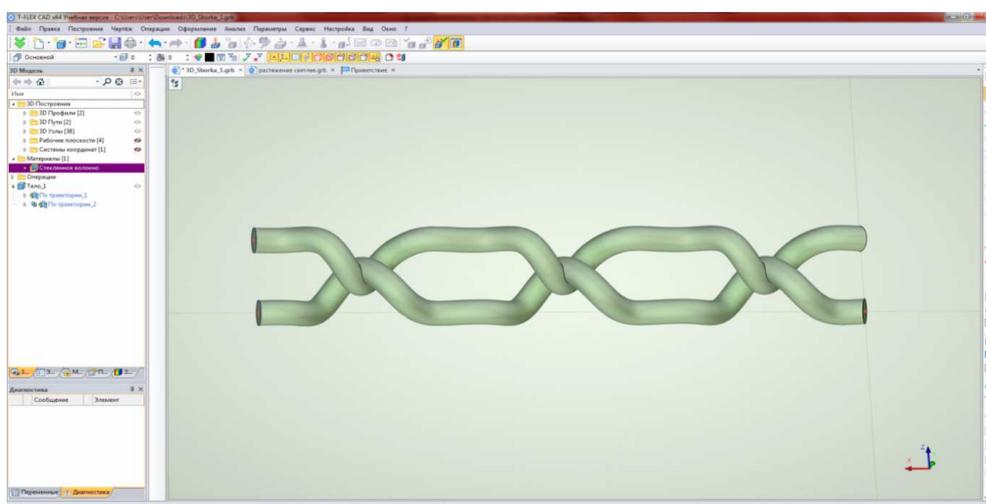


Рисунок 3. – Рабочее окно программы T-FLEX CAD с построенной 3D-моделью выбранного профиля стеклопластиковой арматуры

При выполнении расчетов принимаются следующие допущения и упрощения:

- прочность конструкции оценивается величиной коэффициента запаса прочности по эквивалентным напряжениям;
- материал конструкции принимается изотропным, концентраторы напряжений, вызванные идеальной геометрией модели, и дефекты материала в расчете не учитываются;
- расчет прочности конструкции проводится по соответствующему напряжению, при котором начинается пластическая деформация материала.

На основе 3D-модели реализованы следующие этапы эксперимента:

- построена расчетная конечно-элементная модель;
- заданы контактные условия и условия нагружения;
- выполнен поверочный расчет модели;
- осуществлена общая оценка прочности конструкции.

Полученные результаты, проиллюстрированные рисунком 4, сравнимы с показателями натуральных испытаний, представленных в таблице 1, что подтверждает правильность заданных параметров и конфигураций при проведении виртуального эксперимента.

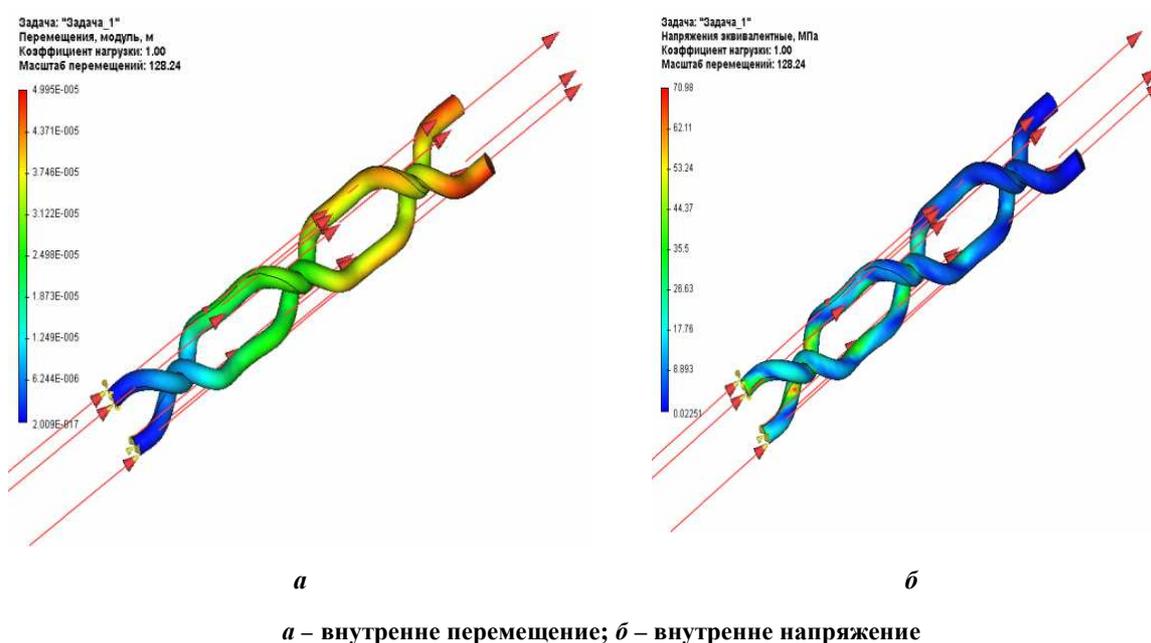


Рисунок 4. – Деформации напряжения растяжения, испытываемые моделью заданного профиля

Таблица 1. – Физико-механические характеристики стеклопластиковой арматуры периодического профиля

Площадь поперечного сечения $\Phi$ , мм	Предельная нагрузка, Р, кН	Предел прочности, $\sigma$ , МПа	Относительное удлинение, $\xi$ , %
8	0	0	0
Нагрузка до предельной величины предварительного напряжения	1	11,4	0,0004
	2	22,7	0,0009
	3	34,1	0,0013
	4	45,4	0,0016
	5	56,8	0,002
	5,7	63,81	0,0022

Источник: собственная разработка.

На рисунке 5 в виде графиков отображены участки максимальных напряжений и деформаций стеклопластиковой арматуры периодического профиля при получении преднапряжения.

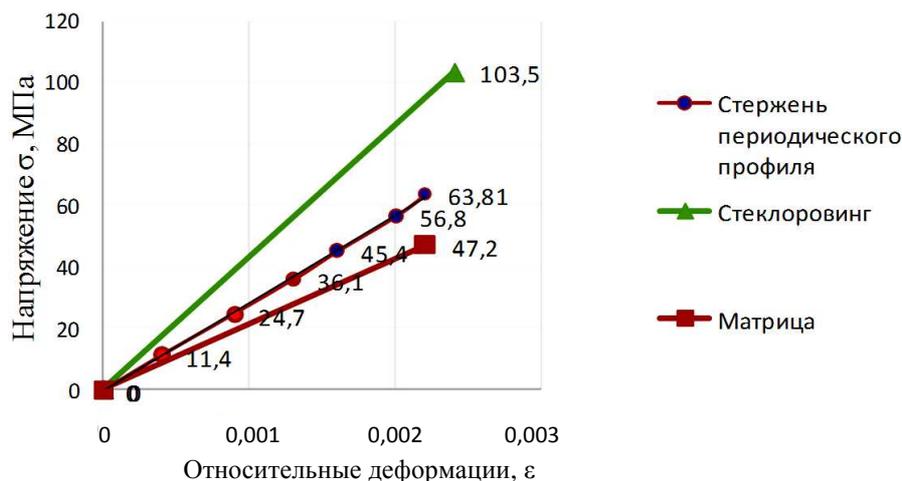


Рисунок 5. – Предельная величина деформаций всех составляющих стеклопластиковой арматуры периодического профиля при получении предварительного напряжения

Прочность композиционного материала характеризуется одновременной работой составляющих компонентов, и в случае ориентированного в одном направлении однородного непрерывного волокна, жестко сцепленного с матрицей, нагрузка на композицию распределяется между волокном и матрицей.

Упрочняющее действие волокон заключается в том, что более прочные и жесткие по сравнению с матрицей волокна начинают нести в композиции основную часть нагрузки, как только их объемная доля в матрице превысит некоторую критическую величину [5].

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

- испытание стеклопластиковой арматуры периодического профиля на растяжение способствует получению наиболее полного набора характеристик испытываемого образца;
- зона напряжений, равная 30% от разрушающей нагрузки, отображает поведение образца при приложении сил на начальной стадии испытания;
- отношение между прилагаемой силой или нагрузкой и удлинением образца – линейное. В пределах данной линейной области прямые подчиняются Закону Гука, согласно которому имеет место постоянное отношение между напряжением и деформацией. Наклон прямых на данном участке, где напряжение  $\sigma$  пропорционально деформации  $\epsilon$ , называется «модулем упругости», или «модулем Юнга».

Модуль упругости – это мера жесткости материала, однако она действует только на линейном участке кривой, который приведен на графике (рисунок 5). Если образец подвергается нагрузке на линейном участке, то материал вернется в исходную форму при прекращении действия нагрузки, что требуется для получения предварительного напряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Куликовкий, Д.П. BIM-технологии. Опыт внедрения / Д.П. Куликовкий // Технологии интеллектуального строительства. – М., 2015. – № 3.
2. Структура отрасли информационного моделирования, или Кто нужен рынку для ее развития [Электронный ресурс] // NEOLANT. – 2016. – ноябрь. – Режим доступа: [http://neolant.ru/upload/29112016/NEOLANT\\_SAPRiGr\\_Structura%20otrasli%20IM.pdf](http://neolant.ru/upload/29112016/NEOLANT_SAPRiGr_Structura%20otrasli%20IM.pdf). – Дата доступа: 03.02.2016.
3. Шабанов, Д.Н. Компьютерное моделирование стеклопластиковой арматуры периодического профиля и вычислительный эксперимент оценки ее эксплуатационных свойств / Д.Н. Шабанов, Е.А. Зябкин, Е.А. Трамбицкий // Вестник Полоцкого государственного ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – С. 73–78.
4. Материалы, армированные волокном : пер. с англ. / Л.И. Сычева, А.В. Воловик. – М. : Стройиздат, 1982. – 180 с.
5. Хежев, Т.А. Технология современных композиционных бетонов и изделий : метод. разработки к практическим занятиям по спецкурсу / Т.А. Хежев. – Нальчик : Кабардино-Балкар. ун-т, 2004. – 86 с.
6. Куликовский, Д. Повышение рентабельности проектно-строительного производства в условиях применения технологии информационного моделирования (BIM). Новая роль архитектора/проектировщика / Д. Куликовский, А. Паршин // Архитектура и строительство. – 2015. – № 2.

7. Волкинд, Д. Прямой и обратный инжиниринг с ANSYS SpaceClaim: применение для САМ, САЕ и 3D-сканирования / Д. Волкинд, К. Кравченко, М. Булатов.
8. Бабичев, С.В. Инженерный анализ средствами T-FLEX / С.В. Бабичев // САПР и графика. – 2016. – декабрь.
9. Плотников, А. Использование программного комплекса T-FLEXPLM и возможностей 3D-печати для проектирования оснастки испытательной установки / А. Плотников, Ю. Кучковский, С. Федотов // САПР и графика. – 2017. – январь.
10. Способ изготовления композитной арматуры периодического профиля : полож. решение пат. Респ. Беларусь, МПК Е 04 С 5/07, В 29 С 55/30, В 29 С 53/26 / Н.Н. Попок, Д.Н. Шабанов, О.А. Ерошова, Е.А. Менжинский ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 20130798 ; заявл. 2013.06.24.
11. Багмутов, В.П. Особенности организации вычислительного эксперимента по формированию шейки цилиндрического образца при растяжении / В.П. Багмутов, С.В. Бабичев // Изв. ВолгГТУ. Серия «Материаловедение и прочность элементов конструкций». – 2005. – Вып. 1. – № 3 (12).
12. Шабанов, Д.Н. / Эра технологий в современном строительстве / Д.Н. Шабанов, Н.А. Аверченко, М.Н. Высоцкая // Актуальные проблемы архитектурного Белорусского Подвинья и сопредельных регионов : сб. ст. республ. науч.-техн. семинара, Новополоцк, 8–9 окт. 2015 г. ; Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. В.Е. Овсейчик, Г.И. Захаркина, Р.М. Платонова. – Новополоцк : ПГУ 2015. – 216 с.
13. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач : учеб. пособие / В.В. Белов [и др.]. – Тверь : ТвГТУ, 2015. – 108 с.

Поступила 12.06.2017

## COMPUTER MODELING AND ANALYSIS OF OPERATING CHARACTERISTICS OF THE PERIODICAL PROFILE FIBERGLASS REINFORCEMENT

*D. SHABANOV; E. ZIABKIN; E. TRAMBITSKY*

*An example of modern systems of engineering analysis, information modeling, allowing numerical methods to solve various problems, for example: the determination of physico-mechanical and deformation characteristics of prestressed fiberglass reinforcement. Competent statement of the problem with the use of 3D-models and the possibilities of artificial intelligence significantly affects the speed of research and evaluation of building elements of different configurations and characteristics. The results obtained are highly accurate, which in some cases does not require full-scale testing. In addition, thanks to the constructed 3D-model, we can observe the deformation process of the element in the “real time” mode. In the future, based on the principles of similarity, the data obtained can be applied to other materials.*

**Keywords:** *fiberglass reinforcement, tension, deformation, information modeling, T-FLEX CAD.*

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.131.37:624.131.43

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОДИНОЧНОЙ БУРОНАБИВНОЙ СВАИ В УСЛОВИЯХ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО «СТЕСНЕНИЯ»

канд. техн. наук, доц. Т.М. УЛАСИК; А.В. БАЛЫШ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлено моделирование работы одиночной буронабивной сваи с помощью программы Plaxis 3D, позволяющее оценить возможность включения в работу сваи области «стеснения», которая формируется в околосвайном пространстве с учетом явления дилатансии. Подобное «стеснение» условий работы сваи в несвязном грунте выполняется посредством погружаемой оболочки. Параметры такой оболочки соотносятся с длиной и диаметром сваи. Погружение оболочки выполнялось на треть, две трети и на всю длину сваи. Выполненные расчеты указывают на максимальное увеличение несущей способности сваи для случая погружения оболочки на всю длину сваи, что наглядно отражено на графиках зависимости осадки сваи от нагрузки. Погружаемая оболочка способствует большей мобилизации контактного трения по боковой поверхности сваи – следствие возникновения условий «стеснения» несвязного грунта в пространстве между оболочкой и свайей.

**Ключевые слова:** моделирование, «стесненная» дилатансия, дилатантные напряжения, контактное трение, свая, оболочка, несвязный грунт, несущая способность, расчетное сопротивление, продольные усилия.

**Введение.** При возведении фундаментов глубокого заложения, в частности свайных фундаментов, важнейшим фактором, влияющим на надежность и экономичность таких конструкций, является их несущая способность. Работы многих исследователей посвящены вопросам несущей способности свай, и в современной геотехнике появляются все более новые способы устройства фундаментных конструкций с использованием струйных, полимерных технологий. Опираясь на фундаментальные исследования, посвященные изучению дилатансии несвязных, сыпучих грунтов, контактного трения и сопротивления сдвигу [1], нами проведено моделирование условий работы одиночной сваи. Проведенные ранее исследования поведения модели одиночной забивной сваи в грунтовом лотке [2] показали, что несущая способность сваи в среднем увеличивается на 20% при создании дополнительных условий «стеснения» несвязного грунта в виде погружения ПВХ трубы после устройства забивной сваи, на всю ее длину. Увеличение области «стеснения» вокруг сваи неизменно ведет к увеличению несущей способности. Принципиально важными остаются только начальные физические характеристики несвязного грунта (например, плотность, крупность зерен), в котором возможно проявление дилатансии, а также возможна и максимальная мобилизация контактного трения на боковой поверхности сваи.

**Исследование работы одиночной сваи при условии дополнительного «стеснения».** Для моделирования воспользовались программой PLAXIS 3D, предназначенной для комплексных расчетов напряженно-деформированного состояния и устойчивости геотехнических объектов методом конечных элементов в условиях пространственной задачи.

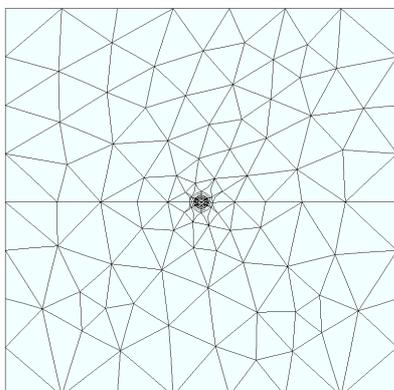


Рисунок 1. – Триангуляция области моделирования (2D-конечноэлементная сетка)

Заданы следующие параметры области моделирования:  $Z_{\min} = -8$  м,  $Z_{\max} = +8$  м;  $X_{\min} = -8$  м,  $X_{\max} = +8$  м,  $Y_{\max} = 15$  м.

Характеристики грунта:  $E_{гр} = 20$  МПа,  $\nu = 0,3$ ,  $\phi = 34^\circ$ ,  $\psi = 4^\circ$ ,  $\Upsilon = 20$  кН/м<sup>3</sup> (модель пластического разрушения Мора – Кулона).

Свая моделировалась длиной  $l = 6$  м, диаметром  $d_{св} = 300$  мм,  $E = 40$  ГПа,  $\Upsilon = 24$  кН/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0,35$  (линейно деформируемый изотропный материал).

Оболочка, моделирующая «стеснение» горизонтальных перемещений грунта, имеет следующие параметры:  $D = 3d_{св} = 900$  мм,  $t_{ст} = 10$  мм,  $E = 40$  ГПа,  $\nu = 0,35$ ,  $\Upsilon = 20$  кН/м<sup>3</sup>.

На рисунке 1 показана триангуляция области моделирования, на рисунке 2 – формирование трехмерной конечно-элементной сетки (в верхней части рисунка – свая и закрывающая ее оболочка). Оболочка погружается соосно свае.

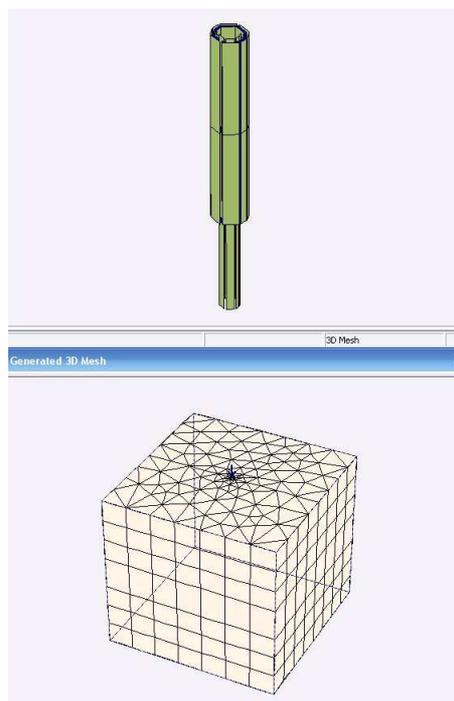


Рисунок 2. – Формирование трехмерной конечно-элементной сетки из 2D-контура триангуляции

Результаты моделирования поведения буронабивной сваи под нагрузкой в конечно-элементной программе Plaxis 3D Foundation приведены ниже в виде таблиц и рисунков. Для случая, когда свая длиной  $l = 6$  м и диаметром  $d = 300$  мм работает в обычных условиях, определены продольные усилия, возникающие в стволе сваи с приложением  $P = 700$  кН на оголовок сваи, а также сила трения сваи по грунту, собранная по поверхности сваи на 1 погонный метр. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Сила трения по грунту и продольные усилия в моделируемой свае без условий дополнительного «стеснения»

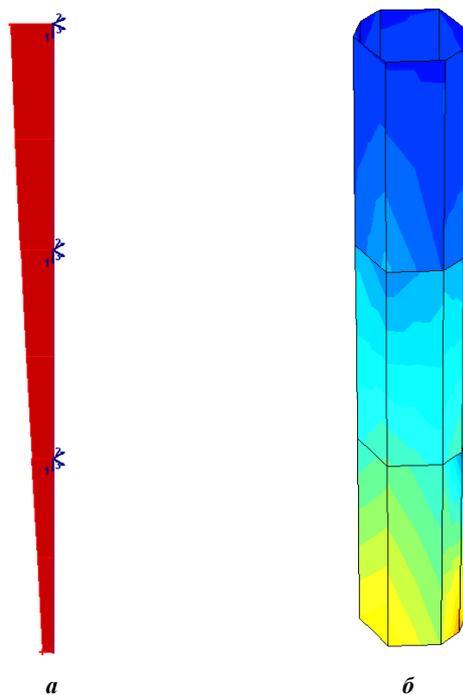
Глубина относительно отметки 0.000, м	Продольное усилие в стволе сваи, кН	Сила трения сваи по грунту, собранная по поверхности сваи на 1 п. м длины сваи, кН
0	700	–
–1	659	41
–2	608	51
–3	538	70
–4	469	69
–5	419	50
–6	373	46
Осадка $S$ при $P = 700$ кН, мм		
141		

В соответствии с нормативными документами [3] определение несущей способности сваи  $F_d$  зависит от  $R_{fi}$ , расчетного сопротивления (прочности)  $i$ -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи. Для более плотных несвязных грунтов эти значения, как правило, выше, чем для рыхлых грунтов.

Проведенные исследования [4] показали, что определение скорректированного значения расчетного сопротивления на боковой поверхности сваи объясняется мобилизацией контактного трения. Чтобы максимально реализовать этот процесс, необходимо изменить начальные условия до состояния «стеснения». Такой вывод был сделан нами в процессе подготовки и проведения работ на реальных моделях [5]. Плотность грунта при этом изменяется в большую сторону.

В нашем случае моделирование создания условий дополнительного «стеснения» осуществляется посредством погружаемой на разную глубину (от оголовка сваи) оболочки. Расчет проведен для следующих условий: оболочка погружается на всю длину сваи, т.е. на 6 м; оболочка погружена на 4 и 2 м соответственно. Диаметр погружаемой оболочки принимаем равным  $3d$  сваи.

Для того чтобы косвенно оценить значение несущей способности сваи  $F_d$ , из полученных данных выбираем значение осадки  $S$  и сравниваем её с полученными на следующих этапах моделирования значениями. На рисунке 3 показаны распределения нормальных усилий в свае и оболочке при  $P = 700$  кН на оголовке сваи диаметром 300 мм. Диаметр оболочки – 900 мм. Для оболочки значения на эпюре указаны в килоньютонах (кН); вертикальные усилия в оболочке – килоньютонах на метр (кН/м).



***a*** – эпюра продольных усилий в стволе ( $N_{\min} = 199$  кН,  $N_{\max} = 700$  кН);  
***б*** – продольные усилия в оболочке (max = 6,76 кН/м, min = 92,28 кН/м)

**Рисунок 3.** – Эпюры продольных усилий в стволе и оболочке  
(свая длиной  $l = 6$  м, длины сваи и оболочки совпадают)

Осадка, полученная для случая моделирования при совпадении длин сваи и тонкой оболочки, составила 76 мм. Для случая, когда оболочка отсутствует и дополнительных условий «стеснения» нет, осадка составила 141 мм (см. таблицу 1). Получено уменьшение осадки на 53,9%. Следовательно, увеличение несущей способности сваи происходит за счет формирования области дополнительного «стеснения», которая находится в объеме моделируемого грунта между оболочкой и самой свайей.

Дальнейшее моделирование проводилось для сваи длиной 6 м и погружаемой оболочки диаметром 900 мм и длиной 2 м; для сваи длиной 6 м и погружаемой оболочки диаметром 900 мм и длиной 4 м.

Обобщенные результаты моделирования (усилие в стволе сваи, сила трения сваи по грунту, собранная по поверхности сваи на 1 погонный метр) приведены в таблице 2.

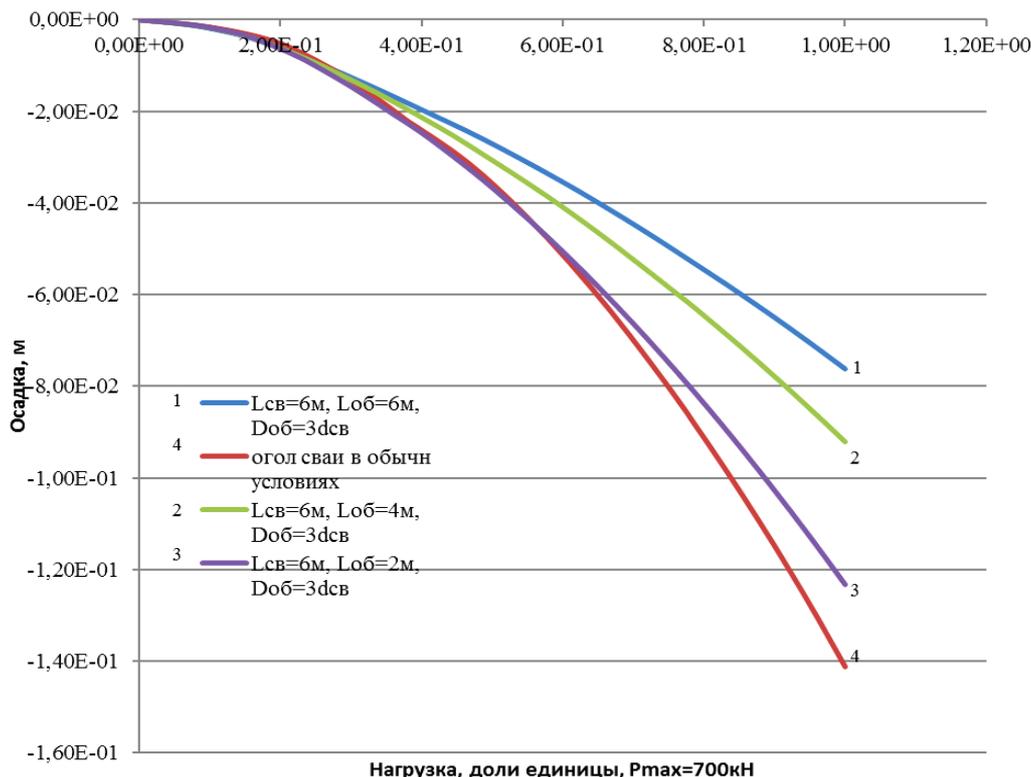
**Таблица 2.** – Сила трения по грунту и продольные усилия в моделируемой свае при условии дополнительного «стеснения»

Глубина относительно отметки 0.000, м		Усилие в стволе сваи, кН		Сила трения сваи по грунту, собранная по поверхности сваи на 1 п. м длины сваи, кН		
Свая диаметром $d$ 300 мм, длиной $l$ 6 м	Оболочка диаметром $D$ 900 мм, длиной $L$ , м		при «стеснении» оболочкой длиной $L$ , м			
	4	2	4	2	4	2
0	(отм. 0.000)	(отм. 0.000)	700	700	–	
–1			630	628	70	72
–2		(отм. –2.000)	554	464	76	164
–3			446	393	108	71
–4	(отм. –4.000)		330	322	116	71
–5			245	287	85	35
–6			200	242	45	45

В количественном выражении при погружении оболочки на всю длину сваи объем «стесненного» грунта составляет  $339,12 \text{ м}^3$ . Объем области «стеснения» для случаев моделирования погружаемой оболочки длиной 4 и 2 м соответственно 211,95 и  $127,17 \text{ м}^3$ .

Моделирование приведенных в таблице 2 вариантов при равных значениях  $P = 700 \text{ кН}$  на оголовки сваи дали следующие величины осадки сваи: для случая погружаемой на 4 м оболочки  $S = 92 \text{ мм}$ ; для оболочки, погружаемой на 2 м,  $S = 123 \text{ мм}$ . Максимальное уменьшение осадки наблюдается для случая максимального погружения оболочки на всю длину сваи ( $S = 76 \text{ мм}$ ). Промежуточные значения осадки соответствуют погружению оболочки на 4 и 2 м.

На рисунке 4 приведены результаты всех случаев работы сваи, как в условиях без дополнительного «стеснения», так и при совместной работе с погружаемой оболочкой, т.е. в условиях дополнительного «стеснения».



1 – длины сваи и оболочки совпадают (6 м); 2 – длина оболочки меньше длины сваи (4 м);  
3 – длина оболочки меньше длины сваи (2 м); 4 – свая работает без оболочки

**Рисунок 4.** – Изменение осадки сваи от нагрузки для различных случаев «стесненной» работы

Основные параметры сваи и оболочки отражены в таблицах 1 и 2. Рисунок 4 дает наглядное представление о поведении сваи в случае мобилизации слоя грунта, соприкасающегося с ее боковой поверхностью. Ветвь (1) на рисунке 4 показывает оптимальную осадку для конструкции свая – оболочка в сравнении с вариантами без условий «стеснения» (ветвь 4), со «стеснением» (ветви 2 и 3) для объемов области «стеснения»  $211,95$  и  $127,17 \text{ м}^3$  соответственно.

Мобилизация контактного трения вдоль боковой поверхности происходила при планомерном увеличении длины погружаемой оболочки. Так, по эпюре продольных усилий (см. рис. 3) в стволе сваи наблюдается изменение от  $N_{\max} = 700 \text{ кН}$  до  $N_{\min} = 199 \text{ кН}$ . Это говорит о том, что усилие в  $501 \text{ кН}$  расходуется на мобилизацию контактного трения вдоль боковой поверхности сваи, позволяя тем самым реализоваться условиям «стеснения» объемных деформаций, происходящих в массиве грунта, заключенного между свай и погружаемой оболочкой.

В работах [1; 2] отмечено, что напряженное состояние грунта меняется вследствие изменения условий «стеснения». Это происходит из-за переупаковки зерен несвязного грунта, увеличения дилатантного напряжения  $\Delta\sigma_d$  или дилатантного распора [1]. Такое состояние обычно является следствием переупаковки зерен, сближением их, соответственно, уплотнением грунта. В наших исследованиях такое состояние грунтового массива достигается посредством «стеснения» условий работы сваи и устройством погружаемой оболочки на соответствующую моделированию глубину погружения.

Основной причиной того, что работа сваи меняется, является дилатансия. Далее наблюдается мобилизация прочности несвязного грунта в связи с ограничением дилатансии или с проявлением «стесненной» дилатансии [1; 2; 4]. В нашем случае таким ограничением является погружаемая оболочка, имеющая круглоцилиндрическую форму. Возможно, если изменить форму оболочки на усеченный конус, сужающийся к острию сваи, мы получим еще большую несущую способность сваи, работающей в «стесненных» условиях. Эти предположения – предмет дальнейших исследований.

Что касается структуры области «стеснения», то исследования, посвященные «стесненной» дилатансии [1; 2] и её влиянию на несущую способность фундаментных конструкций, показывают, насколько важными являются характеристики грунтового массива, в котором развивается дилатансия. Поэтому важно иметь представление о том, какой грунт мы моделируем в области «стеснения», какими исходными характеристиками он обладает.

**Заключение.** Результаты моделирования сваи  $d = 300$  мм и оболочки диаметром 900 мм показали, что условия дополнительного «стеснения» являются определяющими факторами, влияющими на несущую способность сваи. Увеличение области стеснения за счет погружения оболочки на большую глубину, дает возможность реализовать в грунтовом массиве дополнительное контактное трение, мобилизованное на контактной поверхности сваи.

Проведенные исследования для конструкции свая – оболочка, позволяют сделать следующие *выводы*:

- погружение оболочки на всю длину сваи дает существенное уменьшение осадки сваи, а значит, несущая способность её возрастает;
- осадка сваи при условии максимального дополнительного «стеснения» уменьшается на 53%;
- увеличение объема области «стеснения» планомерно влияет на уменьшение осадки сваи;
- для определения оптимального соотношения диаметров сваи и оболочки необходимо провести дополнительные исследования по моделированию конструкции свая – оболочка;
- дальнейшие исследования по работе сваи в условиях «стеснения» будут проведены для случая изменения структуры области «стеснения».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д.Ю. Соболевский. – Минск : Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
2. Уласик, Т.М. Влияние «стесненной» дилатансии на несущую способность свайных фундаментов / Т.М. Уласик // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 30–33.
3. Проектирование забивных свай. Пособие к строительным нормам Республики Беларусь. П4-2000 к СНБ 5.01.01.-99.
4. Уласик, Т.М. Несущая способность свайных фундаментов с учетом скорректированного значения расчетного сопротивления на боковой поверхности / Т.М. Уласик // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 82–86.
5. Уласик, Т.М. Прочностные испытания грунтов на основе модели контактного сдвига / Т.М. Уласик // Геотехника Беларуси: наука и практика : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2008. – С. 174–182.

Поступила 05.06.2017

#### MODELING OF THE WORK OF A SINGLE PILE DRILL UNDER CONDITIONS ADDITIONAL “CONSTRAINT”

**T. ULASIK, A. BALICH**

*Simulation of the work of a single bored pile using of Plaxis 3D programs allows to evaluate the possibility of including in the work of the pile the area of “constraint” that is forming in the near the pile space, taking into account the phenomenon of dilatancy. Such a “constraint” of the working conditions of the pile in the incoherent processing ground through the immersed shell. The parameters of such an envelope correlate with the length and diameter of the pile. The shell is immersed in a third, two thirds and the entire length of the pile. The performed calculations indicate the maximum increase in the bearing capacity of the pile for the case of immersion of the shell over the entire length of the pile. This is clearly reflected in the graphs of the dependence of the draft of the pile on the load. The submerged shell promotes greater mobility of contact friction along the lateral surface of the pile, which is the result of the conditions of “constraint” of the disconnected soil in the space between the shell and the pile.*

**Keywords:** modeling, “cramped” dilatancy, dilatant stress, contact friction, pile, shell, non-cohesive soil, bearing capacity, settlement and resistance, the longitudinal force.

УДК 624.078.4

### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБУ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ В СОСТАВЕ ПЛАТФОРМЕННЫХ СТЫКОВ ЗДАНИЙ

*А.Д. ЛАЗОВСКИЙ; канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ; Т.М. ГЛУХОВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Предложена расчетная модель и алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния многопустотных плит перекрытия безопалубочного формования в зоне платформенного стыка, основанные на общей деформационной модели (между бетонными блоками в поперечных сечениях с трещинами нормального отрыва) и блочной модели трещинообразования (для бетонных блоков с продольной арматурой в растянутой зоне между трещинами нормального отрыва).*

**Ключевые слова:** алгоритм расчета, многопустотные плиты перекрытий, безопалубочное формование, платформенные стыки зданий.

Для решения поставленной задачи в качестве базовой использовали блочную модель сопротивления для железобетонного элемента, впервые предложенную Г.М. Вестергаардом в 1930 году [1]. Дальнейшее применение и развитие данная модель получила в работах П.И. Васильева, Е.Н. Пересыпкина [2], В.И. Белова [3], С.Е. Пересыпкина [4], Ю.В. Починка [5], М.В. Бровкиной [6], Pietro Croce, Paolo Formichi [7], А. Vorosnyó и G.L. Balázs [8], А. Casanova, L. Jason и L. Davenne [9] и других.

Предлагаемая расчетная блочная модель, описывающая напряженно-деформированное состояние железобетонных многопустотных плит перекрытия безопалубочного формования в зоне платформенного стыка, основывается на принятых предположениях базовой блочной модели [2; 3] с учетом ее конструкции и выявленных особенностей работы под нагрузкой:

- изгибаемый железобетонный элемент представляет собой совокупность блоков конечной длины  $L_{m,i}$ , разделенных в растянутой зоне трещинами нормального отрыва и связанных между собой растянутой арматурой и бетоном в сжатой зоне;

- бетон и арматура в растянутой зоне сечения работают совместно в соответствии с принятым законом сцепления [10] (рисунок 1), связывающим касательные напряжения по площади контакта арматурного стержня с бетоном и их взаимное смещение  $\tau_b = f(s)$ .

Напряженно-деформированное состояние железобетонного предварительно напряженного элемента описывается системой уравнений [11; 12]:

$$\begin{cases} M_y = -\iint_C \sigma(y)(y - y_o)x(y)dy + N(y_{oe} - y_o), \\ N = \iint_C \sigma(y)x(y)dy, \\ \epsilon(y) = \epsilon_z - \frac{1}{r_y}(y - y_o) + q_0(y), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma(y)$  – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры;  $\epsilon(y)$  – продольные деформации элементарной площадки бетона или арматуры;  $x(y)$  – функция формы;  $y_o$  – расстояние от центра изгиба сечения, нейтральной точки, до оси  $y$ ; и  $y_{oe}$  – расстояние от места приложения продольного усилия до оси  $y$ ;  $N$  – продольная сила от действия внешней нагрузки;  $1/r_y$  – кривизна продольной оси элемента относительно оси  $y$ ;  $q$  – остаточные деформации от процесса динамического обжатия в процессе предварительного напряжения.

Оси  $x$ ,  $y$  в уравнениях равновесия ориентированы в плоскости сечения, нормального к продольной оси. Для дальнейших рассуждений рассмотрим ось  $x$ , ориентированную параллельно продольной оси элемента.

Тогда ширина раскрытия трещины нормального отрыва между двумя бетонными блоками определяется как сумма взаимных смещений  $s(x)$  арматуры и растянутого бетона по длине зон перераспределения  $l$ , слева ( $l$ ) и справа ( $r$ ) от краев трещины:

$$w = \int_{-l_{(l)}}^{l_{(r)}} s(x)dx = \int_{-l_{(l)}}^{l_{(r)}} (\epsilon_s(x) - \epsilon(x))dx. \quad (2)$$

Для любого поперечного сечения блока суммарное усилие в растянутом бетоне  $N_c$  и арматурном стержне  $N_s$  постоянно на всей длине блока. Тогда условие равновесия усилий с учетом правила знаков на элементарном участке в пределах бетонного блока имеет вид:

$$d\sigma_{s,ad} \cdot A_{s,ad} + d\sigma_c \cdot A_{c,eff,red} = 0. \quad (3)$$

Исходя из условия равенства усилия в арматурном стержне диаметром  $\varnothing$  как результирующего от действия растягивающих нормальных напряжений  $\sigma_{s,ad}$ , распределенных по его площади поперечного сечения  $A_{s,ad}$ , и усилия от действия касательных напряжений  $\tau_b$  по площади контакта арматурного стержня с бетоном, а также разности относительных деформаций арматуры  $\epsilon_{s,ad}$  и бетона  $\epsilon_c$  как взаимного смещения  $s$ , закона сцепления  $\tau_b = f(s)$ , связывающего касательные напряжения по площади контакта арматурного стержня с бетоном и их взаимное смещение, учитывающего поперечное сжимающее давление от вертикального прижатия, можно записать:

$$d\sigma_{s,ad} \cdot \frac{\pi\varnothing^2}{4} = \pi\varnothing \cdot \Omega_{p,tr} \cdot \tau_b(s)dx, \quad (4)$$

$$(\epsilon_{s,ad} - \epsilon_c)dx = ds, \quad (5)$$

$$\Omega_{p,tr} \cdot \tau_b = f(s). \quad (6)$$

Коэффициент  $\Omega_{p,tr}$  к ординатам принятого закона сцепления арматуры с бетоном для учета влияния давления вертикального прижатия  $p_{tr}$  в окружающем арматуру бетоне средней прочности  $f_{cm,ad}$  принимаем в соответствии с предложениями [10] равным

$$\Omega_{p,tr} = 1 - \tanh\left(0,2 \frac{p_{tr}}{0,1f_{cm,ad}}\right). \quad (7)$$

График, иллюстрирующий принятый закон сцепления с учетом влияния поперечного давления прижатия  $p_{tr}$ , представлен на рисунке 1.

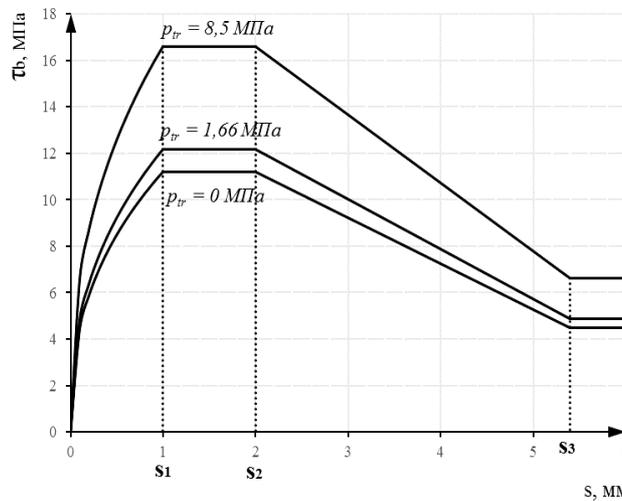


Рисунок 1. – График, иллюстрирующий закон сцепления с учетом влияния давления поперечного прижатия  $p_{tr}$

В случае достижения относительными деформациями арматуры значений, соответствующих пределу текучести,  $\epsilon_{s,ad} \geq \epsilon_{sy,ad}$ , к ординатам принятого закона сцепления арматуры с бетоном вводится понижающий коэффициент  $\Omega_y$  согласно [10]:

$$\Omega_y = 1,0 - 0,85 \cdot (1 - e^{-5a^b}), \quad (8)$$

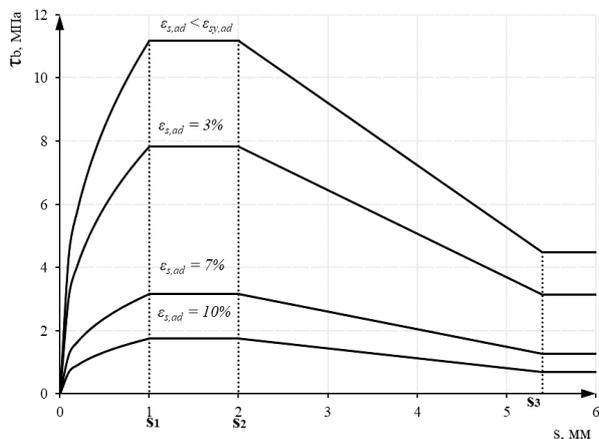
где  $a$  и  $b$  коэффициенты:

$$a = \frac{\epsilon_{s,ad} - \epsilon_{sy,ad}}{\epsilon_{su,ad} - \epsilon_{sy,ad}}, \quad b = \left[2 - \frac{f_{tm}}{f_{ym}}\right]^2; \quad (9)$$

$\epsilon_{su,ad}$  – относительные деформации, соответствующие пределу прочности (предельной растяжимости) дополнительной надпорной арматуры;  $f_{ym,ad}$  – среднее значение предела текучести арматуры при растяжении;  $f_{lm} = k \cdot f_{ym,ad}$  – среднее значение предела прочности арматуры при растяжении.

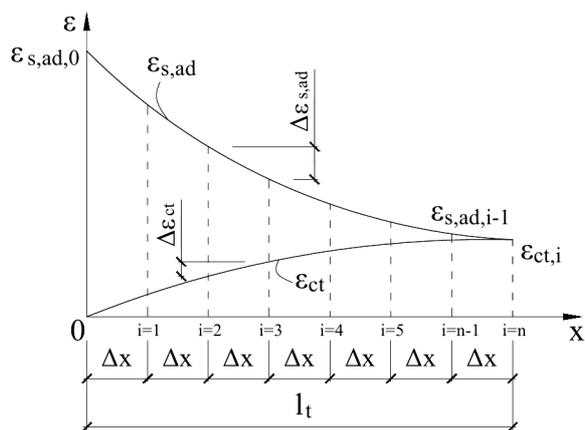
При  $\epsilon_{s,ad} < \epsilon_{sy,ad}$  коэффициент  $\Omega_y = 1$ .

График, иллюстрирующий принятый закон сцепления с учетом влияния текучести арматуры, представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2. – График, иллюстрирующий закон сцепления с учетом влияния относительных деформаций, соответствующих пределу текучести арматуры**

Для решения задачи получения распределения относительных деформаций арматуры и бетона центральный бетонный блок в растянутой зоне поперечного сечения высотой  $h_{eff}$ , выделенный соседними трещинами нормального отрыва, разделяем  $n$  поперечными сечениями на  $(n - 1)$  интервалов длиной  $\Delta x$  таким образом, чтобы границы интервала  $\Delta x_k$  совпадали с границами вертикального шва между торцами многпустотных плит (рисунок 3). При этом, принимая во внимание низкую адгезию бетона заполнения вертикального шва с бетоном плит, работу бетона на растяжение поперек шва в сечениях, совпадающих с его границами, не учитываем. Поэтому на интервале, равном длине вертикального шва  $\Delta x_k$ , принимаем эффективную площадь поперечного сечения растянутой зоны в бетоне за монолитивания  $A_{c,eff,ad}$  и диаграмму деформирования бетона за монолитивания.



**Рисунок 3. – Схема разделения центрального бетонного блока на интервалы  $\Delta x$**

Представим уравнения (3)–(9) в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} s = \epsilon_{s,ad} (\sigma_{s,ad}) - \epsilon_{ct} \left( \frac{N - \sigma_{s,ad} \cdot A_{s,ad}}{A_{c,eff,red}} \right); \\ \frac{d}{dx} \sigma_{s,ad} = \frac{4}{\varnothing} \cdot \Omega_y \cdot \Omega_{p,tr} \cdot \tau(s). \end{cases} \quad (10)$$

Как и для пролетных бетонных блоков, для центрального бетонного блока процесс трещинообразования проходит также две стадии. Особенностью для центрального блока (как отмечалось выше) является уменьшение площади бетона растянутой зоны в месте вертикального шва (в работе на растяжение участвует только бетон замоноличивания площадью  $A_{c,eff,ad}$ , что способствует появлению в конце первой стадии трещинообразования в месте контакта бетона плит и бетона замоноличивания поперечной трещины нормального отрыва).

Для поперечных сечений с трещинами нормального отрыва (по краям выделенного блока) значения напряжений  $\sigma_{s,ad,(l)}$  и  $\sigma_{s,ad,(r)}$  известны, а значения смещений  $s_{(l)}$  и  $s_{(r)}$  неизвестны.

Алгоритм решения системы уравнений (10) для центрального блока состоит в следующем:

1. Задаем начальные параметры итерационного процесса, в качестве которых выступают длина центрального бетонного блока  $\Delta L = 2 \cdot l$  ( $l$  – расстояние от оси платформенного стыка до трещины нормального отрыва по грани опоры), площадь дополнительной надопорной растянутой арматуры  $A_{s,ad}$ , эффективная площадь растянутого бетона  $A_{c,eff}$ , равная  $A_{c,eff,red}$  или  $A_{c,eff,ad}$ , усилие  $N$ , соответствующее усилию в растянутой зоне рассматриваемого центрального блока. Начальный параметр проскальзывания  $s_0$  в первом приближении принимаем равным произведению максимальной относительной деформации арматуры  $\epsilon_{s,ad(max)}$  в сечении с трещиной на длину блока  $\Delta L$ :

$$s_0 = \epsilon_{s,ad(max)} \cdot \Delta L. \quad (11)$$

2. Принимаем диаграммы деформирования  $\sigma = f(\epsilon)$  для бетона эффективной приведенной площади растянутой зоны составного поперечного сечения плит с базовыми точками, соответствующими приведенной прочности бетона плит и бетона замоноличивания  $f_{cm,red}$  и предельной растяжимости при изгибе  $\epsilon_{ctu,fl,red}$ , дополнительной надопорной арматуры, а также закон сцепления арматуры с бетоном  $\tau_b = f(s)$ . Кроме того, учитывая наличие эффектов вертикального прижатия бетонного блока и достижения арматурными стержнями предела текучести, вычисляем параметры  $\Omega_{p,tr}$  и  $\Omega_y$ , используя формулы (6), (7).

3. Разбиваем рассматриваемый центральный блок на конечное количество  $n$  элементов равной длины  $\Delta x$  слева и справа от вертикального шва таким образом, чтобы границы интервала  $\Delta x_k$  по оси платформенного стыка совпадали с границами вертикального шва между торцами многопустотных плит.

4. За начало координат принимаем сечение с трещиной ( $x = 0$ ), в котором известны напряжения в арматуре  $\sigma_{s,ad,0}$  и в растянутом бетоне ( $\sigma_{ct,0} = 0$ ). По принятому закону сцепления вычисляем касательные напряжения  $\tau_{b,0} = f(s_0)$ .

5. Вычисляем напряжения в арматурном стержне в первом ( $n = 1$ ) сечении на расстоянии  $\Delta x$  от начала координат по следующей формуле:

$$\sigma_{s,ad,i} = \sigma_{s,ad,i-1} - \frac{4}{\varnothing} \cdot \tau_{b,i-1} \cdot \Delta x. \quad \sigma_{ct,1} = \frac{(N - \sigma_{s,ad,1} \cdot A_{s,ad})}{A_{c,eff}}. \quad (12)$$

6. Вычисляем усилия в растянутом бетоне в рассматриваемом сечении по формуле

$$\sigma_{ct,1} = \frac{(N - \sigma_{s,ad,1} \cdot A_{s,ad})}{A_{c,eff}}. \quad (13)$$

7. По принятым диаграммам деформирования бетона и арматуры  $\sigma = f(\epsilon)$  определяем относительные деформации в дополнительной надопорной арматуре  $\epsilon_{s,ad,1}$  и бетоне эффективной приведенной площади растянутой зоны  $\epsilon_{ct,1}$ .

8. Вычисляем значение взаимного смещения арматуры и бетона для рассматриваемого сечения ( $n = 1$ ):

$$s_1 = s_0 - [(\epsilon_{s,ad,0} - \epsilon_{s,ad,1}) - (\epsilon_{c,1} - \epsilon_{c,0})] \Delta x. \quad (14)$$

9. По принятому закону сцепления устанавливаем напряжения сцепления  $\tau_{b,1} = f(s_1)$  в рассматриваемом сечении.

10. Далее итерационный алгоритм повторяется для последующих сечений. Для  $i$ -того сечения бетонного блока расчетные уравнения примут вид:

$$\sigma_{s,ad,i} = \sigma_{s,ad,i-1} - \frac{4}{\varnothing} \cdot \tau_{b,i-1} \cdot \Delta x; \quad (15)$$

$$\sigma_{ct,i} = \frac{(N - \sigma_{s,ad,i} \cdot A_{s,ad})}{A_{c,eff,red}}; \quad (16)$$

$$s_i = s_{i-1} - [(\epsilon_{s,ad,i-1} - \epsilon_{s,ad,i}) - (\epsilon_{c,i} - \epsilon_{c,i-1})] \Delta x. \quad (17)$$

Окончанием итерационного процесса является достижение относительными деформациями бетона растянутой зоны составного поперечного сечения плиты относительных деформаций, соответствующих предельной растяжимости ( $\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{ct,u,l,red}$ ), что свидетельствует об образовании новой трещины либо о достижении относительными деформациями бетона относительных деформаций арматуры ( $\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{s,ad}$ ), что свидетельствует об окончании зоны передачи напряжений и начале зоны совместных деформаций бетона и арматуры. На каждом шаге итерационного процесса получаем приращение величины смещения арматурного стержня относительно бетона.

Критерием сходимости итерационного процесса является достижение равенства суммарного приращения величины смещения  $\Delta s_i$  на всех этапах процесса (при  $i = n$ ) с начальной заданной величиной смещения  $s_0$ . При окончании итерационного процесса и невыполнении условия сходимости необходимо принять суммарное приращение величины смещения за начальное  $s_0$  и повторить итерационный процесс до достижения сходимости. Как только сходимость достигнута, итерационный процесс для данного уровня нагружения окончен.

После достижения сходимости итерационного процесса из расчетной блочной модели получаем распределения относительных деформаций дополнительной надопорной арматуры по длине блока  $\varepsilon_{s,ad}(x)$  и бетона растянутой зоны составного поперечного сечения  $\varepsilon_{ct}(x)$ .

Из решения системы уравнений (10) устанавливаются распределение относительных деформаций растянутой арматуры и бетона (рисунок 4) и далее вычисляются значения кривизн в  $i$ -том сечении по длине блока, выделенного трещинами нормального отрыва по формуле

$$\frac{1}{r_{c,i}} = \frac{\varepsilon_{s,ad,i}}{d - x_{c,i}}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon_{s,ad,i}$  – относительные деформации дополнительной надопорной арматуры в  $i$ -том сечении по длине блока;  $d$  – рабочая высота составного поперечного сечения;  $x_{c,i}$  – высота сжатой зоны бетона в  $i$ -том сечении по длине блока ( $x_{c,i}$  для промежуточных сечений бетонного блока вычисляется линейной интерполяцией изменения между  $x_{c(l)}$  и  $x_{c(r)}$  – значениями на концах блока).

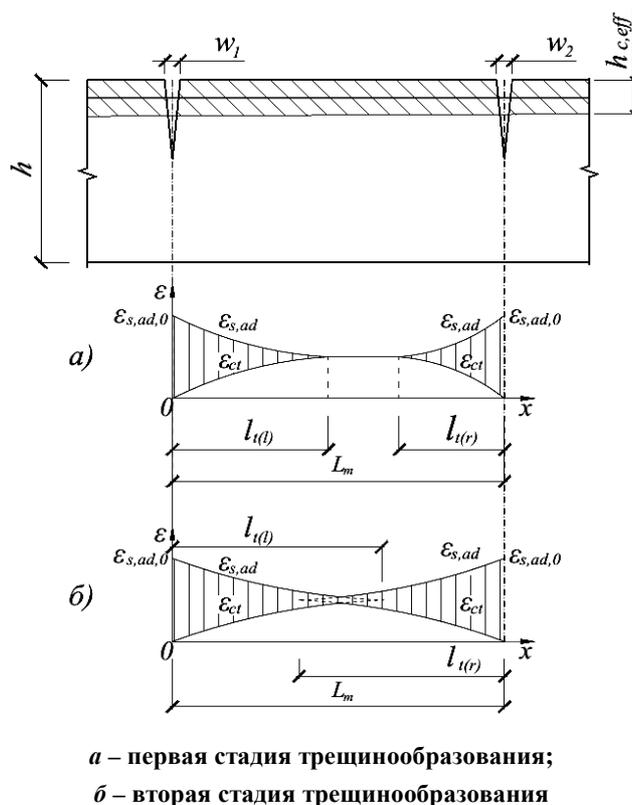


Рисунок 4. – Стадии трещинообразования и распределение относительных деформаций между бетоном и арматурой по длине блока

При известном распределении кривизны  $\frac{1}{r_c}(x)$  по длине рассматриваемого участка плит  $l_p$ , включающего один или несколько блоков, с началом у поперечного сечения плит с трещиной нормального отрыва по грани опоры в зоне платформенного стыка для данного уровня нагружения угол поворота  $\theta$  определяем интегрированием следующего уравнения:

$$\theta = \int_{l_p} \frac{1}{r_c}(x) dx. \quad (19)$$

Выполняя поэтапное нагружение, получаем зависимость «изгибающий момент – угол поворота», применяемую при нелинейных расчетах конструктивной системы.

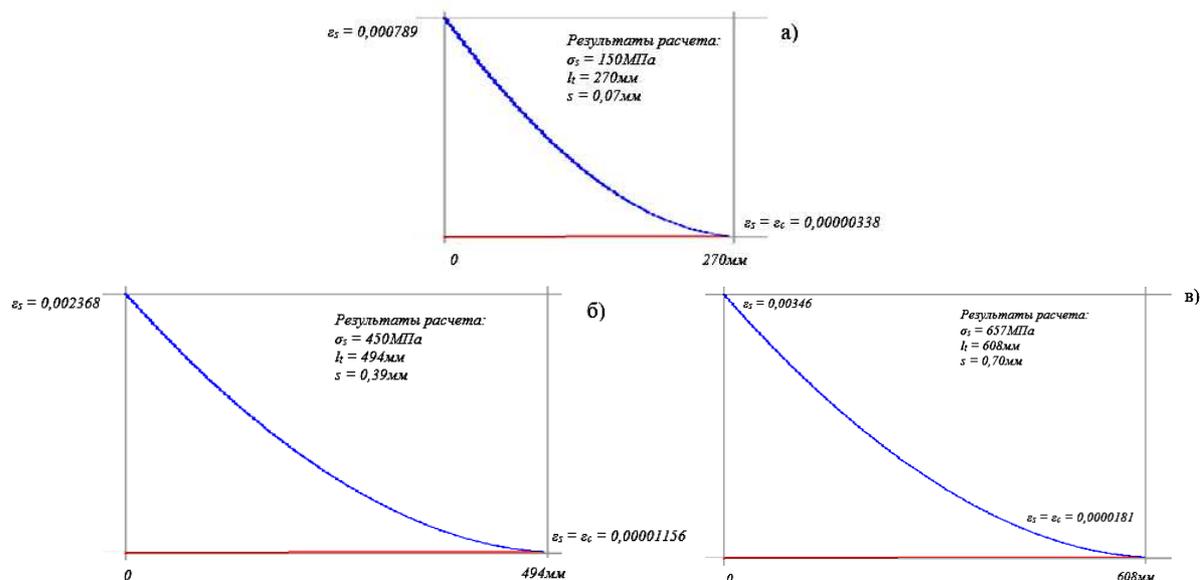
Сопоставление экспериментального максимального значения изгибающего момента с расчетным значением для опытных фрагментов предварительно напряженных многопустотных плит безопалубочного формования в составе платформенных стыков ПС-1 и ПС-2 приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Сопоставление экспериментального максимального значения изгибающего момента с его расчетным значением

Шифр опытного фрагмента	$M_u^{exp}$ , кН·м	$M_u^{clc}$ , кН·м	$M_u^{exp} / M_u^{clc}$
ПС-1	26,8	24,66	1,09
ПС-2	30,7	28,36	1,08
ПС-3	30,3	29,8	1,02
ПС-4	69,7	63,64	1,1
ПС-5	220,1	236,4	0,93
ПС-6	243,8	259,6	0,94

Сопоставление экспериментальных и расчетных изгибающих моментов при разрушении опытных фрагментов плит показывает их удовлетворительную сходимость.

Расчетные зависимости распределения относительных деформаций бетона и арматуры по длине бетонных блоков слева и справа от критической трещины нормального отрыва по оси платформенного стыка при различном уровне нагружения для фрагментов ПС-1 и ПС-2, приведены на рисунке 5.



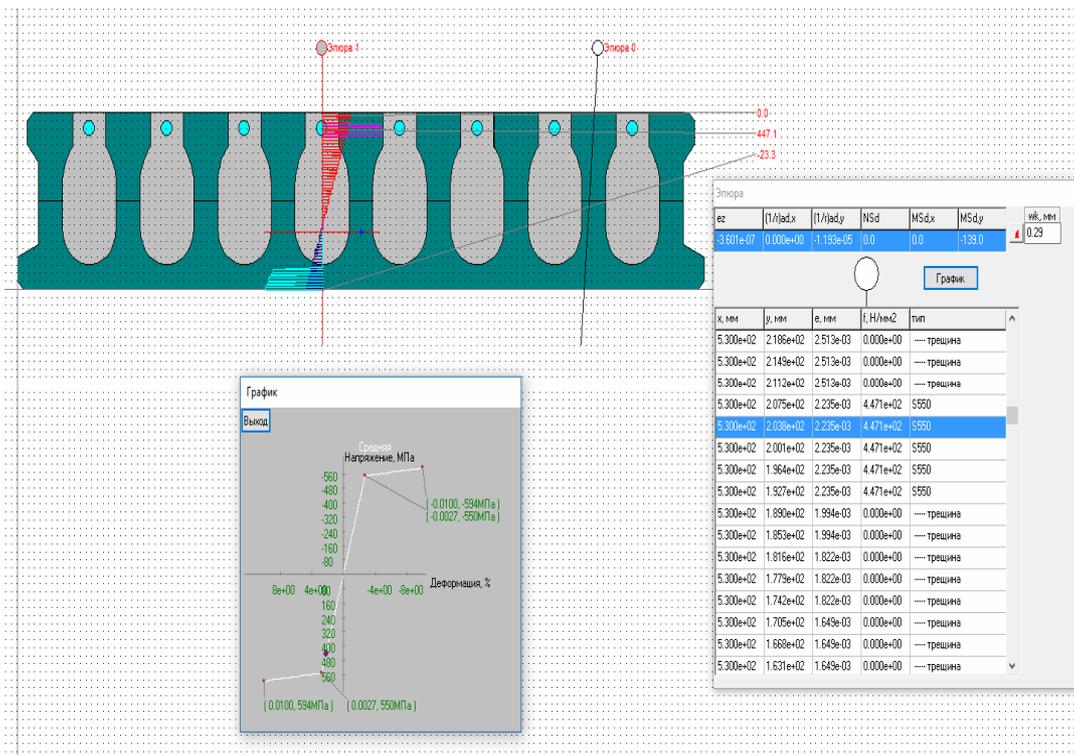
значения нормальных напряжений в верхней арматуре плиты:

а – 150 МПа; б – 450 МПа; в – 680 МПа

Рисунок 5. – Распределение относительных деформаций бетона (красный цвет) и арматуры (синий цвет) по длине зоны перераспределения пролетного бетонного блока опытных фрагментов ПС-1 и ПС-2

При этом относительные деформации дополнительной надпорной арматуры в бетоне замоноличивания в критической трещине нормального отрыва определяем на втором этапе расчета многопустотной плиты с замоноличенными пустотами и дополнительной надпорной арматурой в зоне платформенного стыка после приложения внешней нагрузки из расчета по общей деформационной модели.

Расчетное составное поперечное сечение многопустотной плиты перекрытия после установки дополнительной надпорной арматуры и замоноличивания пустот в месте платформенного стыка приведено на рисунке 6.



**Рисунок 6. – Окно программы расчета с расчетным составным поперечным сечением многопустотной плиты перекрытия после установки дополнительной арматуры и замоноличивания пустот с нормальными напряжениями в верхней и нижней арматуре и бетоне**

### Заключение

В результате проведенного исследования разработан алгоритм нелинейного расчета многопустотных предварительно напряженных плит перекрытий безопалубочного формования в составе платформенных стыков зданий. Предлагаемый алгоритм реализован в программном обеспечении расчета железобетонных элементов и верифицирован экспериментальными данными. Алгоритм позволяет получить адекватное распределение эффектов воздействий по длине пролетов с учетом выявленных схем образования упругопластических шарниров в стыковом соединении в зависимости от степени защемления (давления вертикального прижатия); рассчитать значения параметрических точек диаграмм «изгибающий момент – угол поворота», применяемых для описания упругопластических шарниров в зонах платформенных стыков, а также обоснованно назначить критерий для проверок предельных состояний несущей способности многопустотных плит перекрытия в виде предельного угла поворота в пластическом шарнире, образующемся в зоне платформенного стыка с учетом принятого конструктивного решения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. The Hollow Core Floor Design and Applications / Manual ASSAP. – 1 st Ed. – Verona, Italy. – 220 p.
2. Васильев, П.И. Раскрытие швов и трещин в массивных бетонных конструкциях / П.И. Васильев, Е.Н. Пересыпкин // Аннотации законченных в 1967 году научно-исследовательских работ по гидротехнике. – Л. : Энергия, 1968. – С. 292–294.

3. Белов, В.И. К вопросу исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных балок как систем, составленных из упругих блоков / В.И. Белов, П.И. Васильев, Е.Н. Пересыпкин // Вопросы прочности бетона и железобетонных конструкций : тр. координационных совещаний по гидротехнике. – Л., 1973. – Вып. 82. – С. 60–64.
4. Пересыпкин, С.Е. Внецентренное сжатие бетонных элементов с учетом влияния поперечных сил (расчет по деформированной схеме на основе блочной модели) : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / С.Е. Пересыпкин. – СПб. : СПбГТУ, 1995. – 124 с.
5. Починок, Ю.В. Блочная деформационная модель в расчетах железобетонных стержневых изгибаемых элементов с трещинами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Ю.В. Починок. – Ростов н/Д, 2004. – 241 с.
6. Бровкина, М.В. Прикладные методы расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов блочной структуры : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / М.В. Бровкина. – СПб. : С-ПбГПУ, 2004. – 194 с.
7. Clough, D.P. Considerations in the Design and Construction of Precast Concrete Diaphragms for Earthquake Loads / D.P. Clough // PCI Journal. – 1982. – March–April. – P. 78–93.
8. Borosnyói, A. Models for Flexural Cracking in Concrete : The State of the Art / A. Borosnyói, G.L. Balázs // Structural Concrete. – 2005. – Vol. 6. – P. 53–62.
9. Casanova, A. Bond Slip Model for the Simulation of Reinforced Concrete Structures / A. Casanova, L. Jason, L. Davenne // Engineering Structures. – 2012. – Vol. 39. – P. 66–78.
10. Cleland, N.M. Structural integrity and progressive collapse in large-panel precast concrete structural systems / N.M. Cleland // PCI Journal. – 2008. – July–August. – P. 55–61.
11. Глухов, Д.О. Усиление железобетонных многопустотных плит перекрытий дополнительной предварительно напряженной арматурой / Д.О. Глухов, Д.Н. Лазовский, Салех Али Хамуд // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, Ф. Строительство. Прикладные науки. – № 6. – 2004. – С. 1–10.
12. Глухов, Д.О. Предпосылки, методика и программа для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов / Д.О. Глухов, Е.Д. Лазовский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, Ф. Строительство. Прикладные науки. – № 16. – 2013. – С.

Поступила 05.06.2017

**ALGORITHM OF CALCULATION OF RESISTANCE TO BENDING  
OF PRECAST PRESTRESSED HOLLOW-CORE SLABS  
IN PLATFORM JOINTS OF BUILDINGS**

**A. LAZOVSKY; D. GLUKHOV; T. GLUKHOVA**

*In the article, a calculation model and an algorithm for calculating the stress-strain state of hollow-core slabs for the form-free molding in the platform joint zone based on the general deformation model (between concrete blocks in cross sections with normal detachment cracks) and the block fracture model (for concrete blocks with longitudinal reinforcement in the stretched zone between the fractures of normal separation).*

**Keywords:** calculation algorithm, hollow core slabs, formless shaping, platform joints of buildings.

УДК 624.04

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ С НАКЛОННЫМИ РЕБРАМИ ЖЕСТКОСТИ

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

Рассматривается численный метод расчета тонкостенных призматических стержней открытого профиля с наклонными ребрами жесткости и без ребер на скручивающую нагрузку. Моделирование и расчет производится в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Выполнен анализ полученных данных и вычислены значения коэффициента крутильной жесткости стержней, подкрепленных противокрутильными связями, по отношению к стержням, не имеющим подкрепления.

**Ключевые слова:** крутильная жесткость, наклонные ребра жесткости, выражения коэффициентов.

Для исследования использовались балки из прокатного профиля 12Б1 по СТО АСЧМ 20-39 с пролетами в 600, 800, 900, 1000, 1200 мм. Способ приложения нагрузки их значения, граничные условия, а также обоснование параметров рассматриваемых балок приняты на основании исследования [4–5] и запрограммированы в ANSYS (рисунок 1).

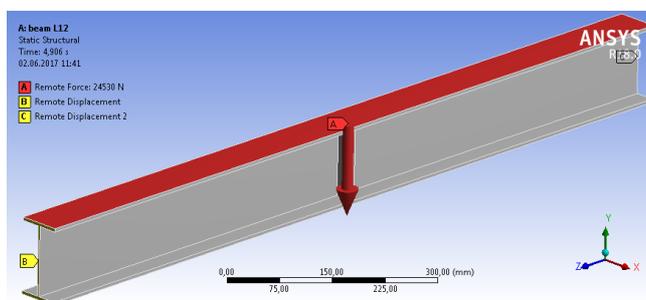


Рисунок 1. – Схема приложения нагрузки и граничных условий в ANSYS

Для описанных выше балок проведен численный расчет, выполненный с использованием программной системы конечно-элементного анализа ANSYS решателем Static Structural с учетом геометрической и физической нелинейности.

Учет физической нелинейности произведен при помощи задания реальных физико-механических свойств материала, полученных в исследовании [6], на основании проведенных испытаний плоских образцов на растяжение для определения предела текучести, модуля упругости и диаграммы работы материала испытываемых образцов, с последующим заданием этих параметров для испытываемых моделей через полилинейную диаграмму (рисунок 2).

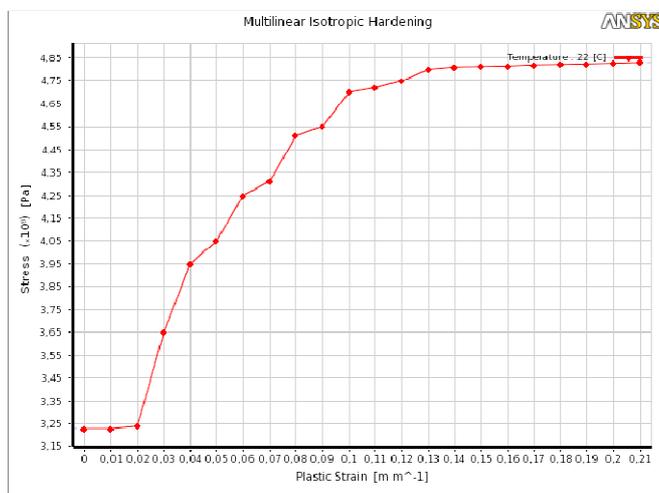


Рисунок 2. – Участок полилинейной диаграммы с пределом текучести

Стержень предварительно создавался в программе AutoCAD с последующим экспортированием в программную систему конечно-элементного анализа ANSYS.

Для расчета балки разбивались на систему конечных элементов типа тетраэдр, согласно рекомендациям для данного типа конструкции [7], с размером элемента 6,0 мм (рисунок 3).

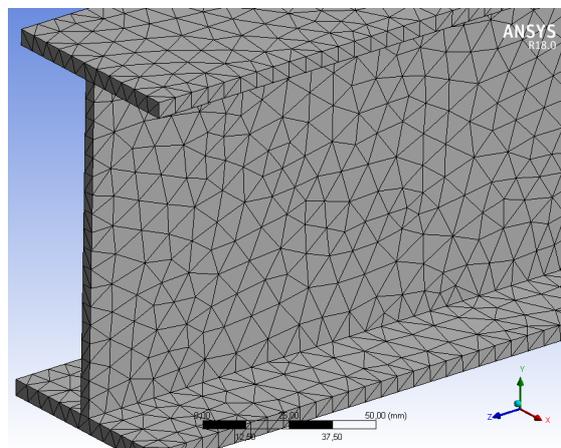


Рисунок 3. – Образец разбивочной сетки модели B12R

Далее проводилось моделирование граничных условий, нагружения и расчет балок, описанных в [1], а также балок с установленными ребрами жесткости (рисунки 4–5).

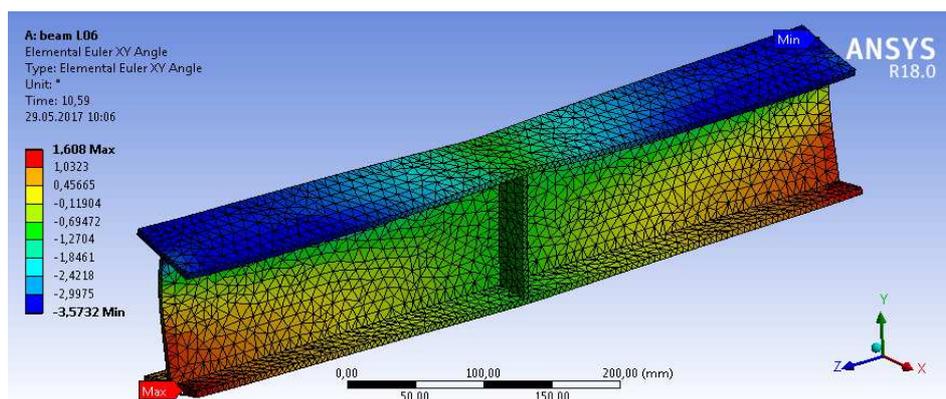


Рисунок 4. – Образец разбивки модели тонкостенного стержня B06

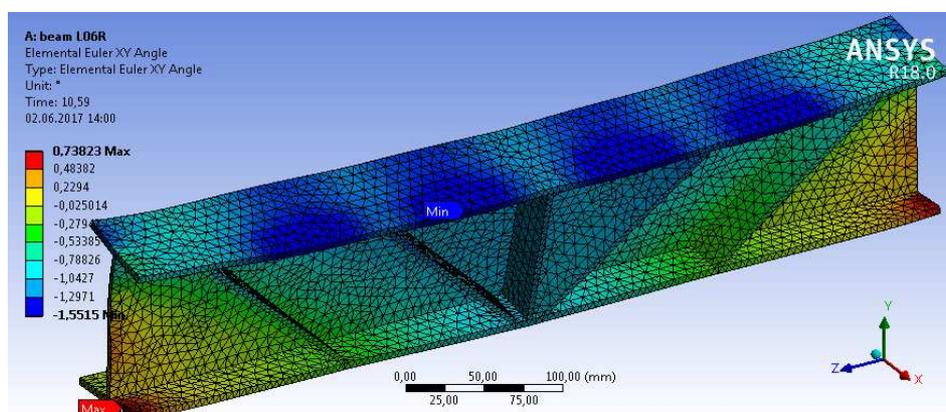


Рисунок 5. – Образец разбивки модели тонкостенного стержня B06R

По полученным данным определены углы закручивания балок при данном нагружении. Значения углов поворота и коэффициентов крутильной жесткости сведены в таблицы 1–6.

Таблица 1. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В06 и В06R

Нагрузка, Н	В06 $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	В06R $\theta_{\min}$ , град	Время, с	Нагрузка, Н	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m = \theta_0/\theta_p$ ) В06 и В06R
1000	-0,05599	1000	-0,02825	0,2	1000,0	1,9822
2000	-0,11206	2000	-0,05653	0,4	2000,0	1,9822
2064,3	-0,11567	4133,35	-0,09902	1,0	5000	1,9827
2128,65	-0,11928	5000	-0,14159	1,2	6000	1,9828
2225,1	-0,12469	6000	-0,17001	1,4	7000	1,9829
2369,8	-0,13282	7000	-0,19847	1,7	8500	1,9831
2586,85	-0,14500	8500	-0,24122	2	10000	1,9833
2912,45	-0,16329	10000	-0,28405	2,2	11000	1,9835
3400,8	-0,19073	11000	-0,31265	2,4	12000	1,9836
4133,35	-0,23193	12000	-0,34128	2,7	13500	1,9838
5000	-0,28073	13500	-0,38429	3	15000	1,9840
6000	-0,33710	15000	-0,42739	3,2	16000	1,9842
7000	-0,39355	16000	-0,45616	3,4	17000	1,9843
8500	-0,47837	17000	-0,48497	3,7	18500	1,9844
10000	-0,56336	18500	-0,52826	4	20000	1,9847
11000	-0,62013	20000	-0,57162	4,2	21000	1,9847
12000	-0,67696	21000	-0,60060	4,4	22000	1,9848
13500	-0,76236	22000	-0,62957	4,7	23500	1,9851
15000	-0,84793	23500	-0,67312	5	25000	1,9852
16000	-0,90509	25000	-0,71675	5,2	26000	1,9853
17000	-0,96231	26000	-0,74593	5,4	27000	1,9855
18500	-1,04830	27000	-0,77507	5,7	28500	1,9857
20000	-1,13450	28500	-0,81889	6	30000	1,9860
21000	-1,19200	30000	-0,86281	6,2	31000	1,9864
22000	-1,24960	31000	-0,89218	6,4	32000	1,9873
23500	-1,33620	32000	-0,92149	6,7	33500	1,9889
25000	-1,42290	33500	-0,96561	7	35000	1,9913
26000	-1,48090	35000	-1,00980	7,2	36000	1,9929
27000	-1,53890	36000	-1,03940	7,4	37000	1,9950
28500	-1,62610	37000	-1,06890	7,7	38500	1,9987
30000	-1,71350	38500	-1,11340	8	40000	2,0049
31000	-1,77220	40000	-1,15790	8,2	41000	2,0108
32000	-1,83130	41000	-1,18770	8,4	42000	2,0192
33500	-1,92050	42000	-1,21750	8,7	43500	2,0349
35000	-2,01080	43500	-1,26240	9	45000	2,0572
36000	-2,07140	45000	-1,30750	9,2	46000	2,0756
37000	-2,13250	46000	-1,33760	9,4	47000	2,0980
38500	-2,22530	47000	-1,36790	9,7	48500	2,1372
40000	-2,32150	48500	-1,41360	10	50000	2,1840
41000	-2,38820	50000	-1,45960	10,118	50590	2,2050
42000	-2,45840	50590	-1,47770	10,236	51180	2,2280
43500	-2,56890	51180	-1,49600	10,413	52065	2,2640
45000	-2,68980	52065	-1,52360	10,59	52950	2,3031
46000	-2,77630	52950	-1,55150			
47000	-2,86990					
48500	-3,02110					
50000	-3,18770					
50590	-3,25830					
51180	-3,33310					
52065	-3,44940					
52950	-3,57320					

Таблица 2. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В07 и В07R

Нагрузка, Н	В07 $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	В07R $\theta_{\min}$ , град	Время, с	Нагрузка, Н	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m = \theta_0/\theta_p$ ) В07 и В07R
1000	-0,056289	1000	-0,037255	0,2	1000	
2000	-0,112700	2000	-0,074581	0,4	2000	1,51111
3500	-0,197530	3500	-0,130700	0,7	3500	1,51132
5000	-0,282640	5000	-0,186980	1	5000	1,51161
6000	-0,339530	6000	-0,224590	1,2	6000	1,51178
7000	-0,396540	7000	-0,262280	1,4	7000	1,51190
8500	-0,482280	8500	-0,318930	1,7	8500	1,51218
10000	-0,568290	10000	-0,375760	2	10000	1,51237
11000	-0,625800	11000	-0,413730	2,2	11000	1,51258
12000	-0,683420	12000	-0,451770	2,4	12000	1,51276
13500	-0,770080	13500	-0,508980	2,7	13500	1,51299
15000	-0,857020	15000	-0,566350	3	15000	1,51323
16000	-0,915140	16000	-0,604690	3,2	16000	1,51340
17000	-0,973380	17000	-0,643100	3,4	17000	1,51357
18500	-1,061000	18500	-0,700870	3,7	18500	1,51383
20000	-1,148900	20000	-0,758800	4	20000	1,51410
21000	-1,207600	21000	-0,797520	4,2	21000	1,51419
22000	-1,266500	22000	-0,836310	4,4	22000	1,51439
23500	-1,355000	23500	-0,894640	4,7	23500	1,51458
25000	-1,443900	25000	-0,953140	5	25000	1,51489
26000	-1,503300	26000	-0,992240	5,2	26000	1,51506
27000	-1,562800	27000	-1,031400	5,4	27000	1,51522
28500	-1,652400	28500	-1,090300	5,7	28500	1,51555
30000	-1,742200	30000	-1,149400	6	30000	1,51575
31000	-1,802400	31000	-1,188900	6,2	31000	1,51602
32000	-1,862700	32000	-1,228500	6,4	32000	1,51624
33500	-1,953600	33500	-1,288000	6,7	33500	1,51677
35000	-2,045000	35000	-1,347700	7	35000	1,51740
36000	-2,106300	36000	-1,387600	7,2	36000	1,51794
37000	-2,167900	37000	-1,427700	7,4	37000	1,51846
38500	-2,260700	38500	-1,488000	7,7	38500	1,51929
40000	-2,354300	40000	-1,548700	8	40000	1,52018
40968	-2,415300	40968	-1,588200	8,1936	40968	1,52078
41936	-2,476800	41936	-1,627900	8,3872	41936	1,52147
43388	-2,570200	43388	-1,687800	8,6776	43388	1,52281
44840	-2,665600	44840	-1,748200	8,968	44840	1,52477

Таблица 3. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В08 и В08R

Нагрузка, Н	В08 $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	В08R $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	Время, с	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m = \theta_0/\theta_p$ ) В08 и В08R
1000	-0,06090	1000	-0,04730	1000	0,2	1,287677605
2000	-0,12196	2000	-0,09472	2000	0,4	1,287625242
3500	-0,21386	3500	-0,16608	3500	0,7	1,287692678
5000	-0,30611	5000	-0,23772	5000	1	1,287691402
6000	-0,36784	6000	-0,28565	6000	1,2	1,287729739
7000	-0,42971	7000	-0,33370	7000	1,4	1,287713515
8500	-0,52283	8500	-0,40602	8500	1,7	1,287695187
10000	-0,61632	10000	-0,47862	10000	2	1,287702144
11000	-0,67888	11000	-0,52719	11000	2,2	1,287733075
12000	-0,74158	12000	-0,57589	12000	2,4	1,287711195
13500	-0,83596	13500	-0,64918	13500	2,7	1,287716812
15000	-0,93072	15000	-0,72276	15000	3	1,287730367
16000	-0,99413	16000	-0,77200	16000	3,2	1,287733161
17000	-1,05770	17000	-0,82135	17000	3,4	1,287757959
18500	-1,15330	18500	-0,89564	18500	3,7	1,287682551
20000	-1,24940	20000	-0,97024	20000	4	1,287722625
21000	-1,31370	21000	-1,02020	21000	4,2	1,287688688
22000	-1,37810	22000	-1,07020	22000	4,4	1,287703233
23500	-1,47510	23500	-1,14550	23500	4,7	1,287734614
25000	-1,57250	25000	-1,22110	25000	5	1,287773319
26000	-1,63770	26000	-1,27180	26000	5,2	1,287702469
27000	-1,70300	27000	-1,32250	27000	5,4	1,287712665
28500	-1,80140	28500	-1,39890	28500	5,7	1,28772607
30000	-1,90010	30000	-1,47560	30000	6	1,287679588
31000	-1,96620	31000	-1,52690	31000	6,2	1,287707119
32000	-2,03260	32000	-1,57840	32000	6,4	1,287759757
33500	-2,13260	33500	-1,65590	33500	6,7	1,287879703
35000	-2,23320	35000	-1,73370	35000	7	1,28811213
35782	-2,28590	35782	-1,77450	35782	7,1564	1,288193857
36564	-2,33880	36564	-1,81550	36564	7,3128	1,288240154
37737	-2,41860	37737	-1,87720	37737	7,5474	1,288408268
38910	-2,49880	38910	-1,93940	38910	7,782	1,288439724

Таблица 4. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В09 и В09R

Нагрузка, Н	В09 $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	В09R $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	Время, с	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m = \theta_0/\theta_p$ ) В09 и В09R
1000	-0,06875	1000	-0,05839	1000	0,2	1,17747902
2000	-0,13774	2000	-0,11698	2000	0,4	1,177466234
3500	-0,24162	3500	-0,20523	3500	0,7	1,177313258
5000	-0,34603	5000	-0,29394	5000	1	1,177213037
6000	-0,41596	6000	-0,35336	6000	1,2	1,177156441
7000	-0,48609	7000	-0,41295	7000	1,4	1,177115874
8500	-0,59171	8500	-0,50273	8500	1,7	1,176993615
10000	-0,69788	10000	-0,59298	10000	2	1,1769031
11000	-0,76899	11000	-0,65344	11000	2,2	1,176833374
12000	-0,84031	12000	-0,71408	12000	2,4	1,176772911
13500	-0,94774	13500	-0,80544	13500	2,7	1,176673619
15000	-1,05570	15000	-0,89729	15000	3	1,176542701
16000	-1,12810	16000	-0,95883	16000	3,2	1,176538072
17000	-1,20060	17000	-1,02060	17000	3,4	1,176366843
18500	-1,30990	18500	-1,11350	18500	3,7	1,176380781
20000	-1,41980	20000	-1,20710	20000	4	1,176207439
21000	-1,49340	21000	-1,26970	21000	4,2	1,17618335
22000	-1,56720	22000	-1,33260	22000	4,4	1,176046826
23500	-1,67840	23500	-1,42720	23500	4,7	1,176008969
25000	-1,79020	25000	-1,52250	25000	5	1,175829228
26000	-1,86520	26000	-1,58630	26000	5,2	1,175817941
27000	-1,94030	27000	-1,65030	27000	5,4	1,175725626
28500	-2,05350	28500	-1,74670	28500	5,7	1,175645503
30000	-2,16740	30000	-1,84370	30000	6	1,175570863
30812	-2,22940	30812	-1,89650	30812	6,1624	1,175533878
31624	-2,29160	31624	-1,94940	31624	6,3248	1,175541192
32842	-2,38540	32842	-2,02910	32842	6,5684	1,175595091
34060	-2,47970	34060	-2,10920	34060	6,812	1,175659018

Таблица 5. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В10 и В10R

Нагрузка, Н	В10 $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	В10R $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	Время, с	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m = \theta_0/\theta_p$ ) В10 и В10R
1000	-0,07901	1000	-0,06987	1000,0	0,2	1,130749635
1500	-0,11867	2000	-0,14006	2000,0	0,4	1,130872483
1750	-0,13852	3500	-0,24585	5000,0	1,0	1,130761807
1875	-0,14845	5000	-0,35232	6000	1,2	1,130504555
2000	-0,15839	6000	-0,42374	7000	1,4	1,130434783
2187,5	-0,17330	7000	-0,49542	8500	1,7	1,130327434
2468,75	-0,19569	8500	-0,60348	10000	2	1,130236999
2679,7	-0,21250	10000	-0,71224	11000	2,2	1,130191154
2890,65	-0,22933	11000	-0,78523	12000	2,4	1,130126854
3207,05	-0,25460	12000	-0,85847	13500	2,7	1,130056044
3681,65	-0,29256	13500	-0,96889	15000	3	1,12989538
4393,55	-0,34964	15000	-1,08010	16000	3,2	1,129903871
5000	-0,39839	16000	-1,15470	17000	3,4	1,129890199
6000	-0,47904	17000	-1,22950	18500	3,7	1,12976758
7000	-0,56004	18500	-1,34240	20000	4	1,129661424
8500	-0,68213	20000	-1,45610	21000	4,2	1,12959217
10000	-0,80500	21000	-1,53250	22000	4,4	1,129583592
11000	-0,88746	22000	-1,60900	23500	4,7	1,129486808
12000	-0,97018	23500	-1,72450	25000	5	1,129400261
13500	-1,09490	25000	-1,84080	26000	5,2	1,129286087
15000	-1,22040	26000	-1,91900	27000	5,4	1,129274521
16000	-1,30470	27000	-1,99730	28500	5,7	1,129189317
17000	-1,38920	28500	-2,11550	30000	6	1,129111658
18500	-1,51660	30000	-2,23450	30062	6,0124	1,129124436
20000	-1,64490	30062	-2,23970	30124	6,0248	1,129160169
21000	-1,73110	30124	-2,24450	30217	6,0434	1,129085258
22000	-1,81750	30217	-2,25200	30310	6,062	1,129105072
23500	-1,94780	30310	-2,25940			
25000	-2,07900					
26000	-2,16710					
27000	-2,25550					
28500	-2,38880					
30000	-2,52300					
30062	-2,52890					
30124	-2,53440					
30217	-2,54270					
30310	-2,55110					

Таблица 6. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В12 и В12R

Нагрузка, Н	В12 $\theta_{\min}$ , град	Нагрузка, Н	В12R $\theta_{\min}$ , град	Время, с	Нагрузка, Н	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m = \theta_0/\theta_p$ ) В12 и В12R
1000	-0,10723	1000	-0,09675	0,2	1000	1,108274593
1061,25	-0,11417	1042,9	-0,10113	0,20858	5000	1,109459432
1122,5	-0,12078	1085,75	-0,10530	0,21715	6000	1,1095707
1214,4	-0,13070	1150,05	-0,11156	0,23001	7000	1,109773935
1352,2	-0,14559	1246,55	-0,12095	0,24931	8500	1,109926257
1558,9	-0,16795	1391,25	-0,13505	0,27825	10000	1,110050251
1869	-0,20154	1608,3	-0,15621	0,32166	11000	1,110190329
2334,1	-0,25204	1933,85	-0,18801	0,38677	12000	1,110334498
3031,8	-0,32803	1954,8	-0,19006	0,39096	13500	1,110603829
4078,3	-0,44257	1975,75	-0,19211	0,39515	15000	1,110641948
5000	-0,54409	2007,15	-0,19518	0,40143	16000	1,11077549
6000	-0,65468	2054,25	-0,19979	0,41085	17000	1,111040426
7000	-0,76631	2124,95	-0,20670	0,42499	18500	1,111193398
8500	-0,93468	2230,95	-0,21708	0,44619	20000	1,111392528
10000	-1,10450	2389,95	-0,23266	0,47799	20906	1,111565258
11000	-1,21910	2628,45	-0,25605	0,52569	21812	1,11171771
12000	-1,33440	2986,2	-0,29120	0,59724	23171	1,111952407
13500	-1,50820	3522,85	-0,34406	0,70457	24530	1,112097973
15000	-1,68340	4327,85	-0,42365	0,86557		
16000	-1,80190	5000	-0,49041	1		
17000	-1,92110	6000	-0,59003	1,2		
18500	-2,10060	7000	-0,69051	1,4		
20000	-2,28180	8500	-0,84211	1,7		
20906	-2,39320	10000	-0,99500	2		
21812	-2,50470	11000	-1,09810	2,2		
23171	-2,67280	12000	-1,20180	2,4		
24530	-2,84230	13500	-1,35800	2,7		
		15000	-1,51570	3		
		16000	-1,62220	3,2		
		17000	-1,72910	3,4		
		18500	-1,89040	3,7		
		20000	-2,05310	4		
		20906	-2,15300	4,1812		
		21812	-2,25300	4,3624		
		23171	-2,40370	4,6342		
		24530	-2,55580	4,906		

Для удобства анализа значений изменения коэффициента крутильной жесткости в зависимости от величины нагрузки, а также размеров и формы расположения этих ребер для шести образцов построена диаграмма изменения коэффициентов увеличения крутильной жесткости  $m$  от нагрузки, полученная на основании численного расчета и представленная на рисунке 6.

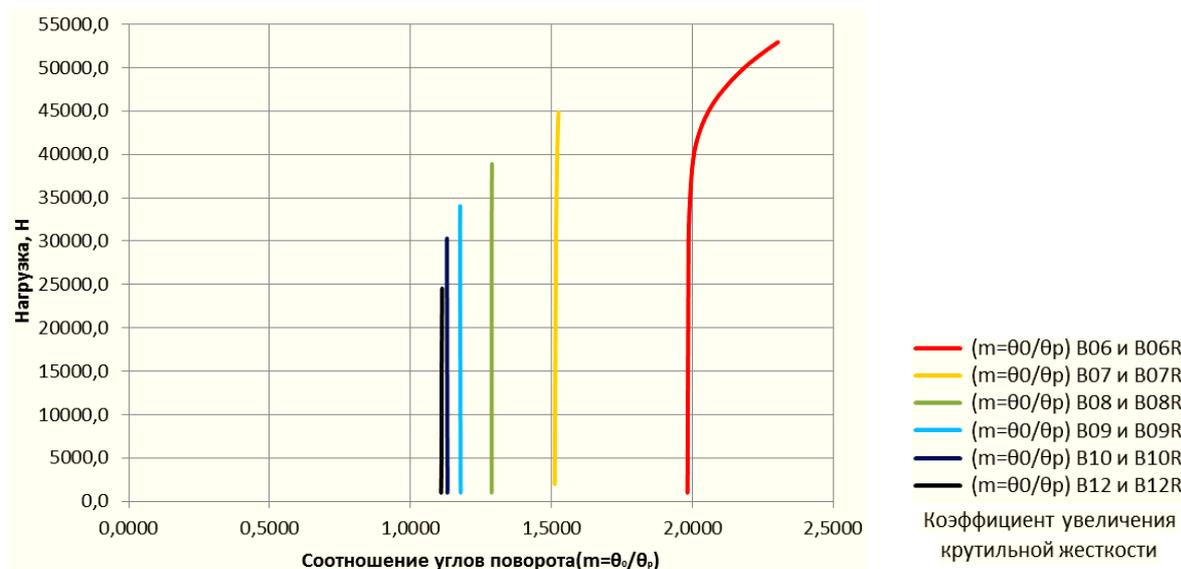


Рисунок 6. – Изменения значения коэффициента крутильной жесткости  $m$  с ростом нагрузки

**Выводы.** В результате проведенного исследования получены значения коэффициентов крутильной жесткости, а также выражения углов закручивания для стержней с противокрутильными связями при данном способе закрепления опоры, приложения нагрузок, а также вида противокрутильной связи. В задаче произведен учет физической и геометрической нелинейности рассматриваемых тонкостенных призматических стержней. Моделирование производится с использованием объемных призматических элементов. В качестве конкретного примера используются данные экспериментальных исследований А.Р. Туснина и М. Прокича Московского государственного строительного университета [6]. На основании полученных результатов получено, что установка наклонных ребер жесткости увеличивает крутильную жесткость в диапазоне значений от 1,1 до 2.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование стальных конструкций : ТКП EN 1993-1-1-2009\* (02250). Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий / М-во стр-ва и архитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2014.
2. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни / В.З. Власов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Физматлит, 1959. – 568 с.
3. Киселев, В.Н. Влияние наклонных ребер жесткости на величину крутильной жесткости стержня / В.Н. Киселев, И.А. Давыденко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, F. Строительство. – Прикладные науки. – 2016. – № 16. – С. 130–140.
4. Лалин, В.В. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем / В.В. Лалин, В.А. Рыбаков, С.А. Морозов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 1(27). – С. 53–73.
5. Li, Z. Modal identification for shell finite element models of thin-walled members in nonlinear collapse analysis / Z. Li, S. Adany, B.W. Schafer // Thin-Walled Structures. – 2013. – Vol. 67. – P. 15–24.
6. Туснин, А.Р. Экспериментальные исследования работы балок двутаврового сечения при действии изгиба и кручения / А.Р. Туснин, М. Прокич // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 1. – С. 24–31.
7. Бруяка, В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench / В.А. Бруяка. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

Поступила 05.06.2017

#### NUMERICAL METHOD OF CALCULATION THIN-WALLED OPEN PROFILE PRISMATIC BARS WITH INCLINED STIFFENERS

V. KISELYOV, I. DAVYDENKO

*A numerical method for calculating thin-wall prismatic rods of an open profile with inclined stiffeners and without ribs for a torsional load is considered. Modeling and calculation is performed in the program system of finite element analysis ANSYS. The analysis of the obtained data is carried out and the values of the coefficient of torsional stiffness of the rods reinforced by anti-roll connections with respect to the rods having no reinforcement are calculated.*

**Keywords:** torsional stiffness, the inclined ribs of expression ratios.

УДК 624.131.35: 624.154.1

## УТОЧНЁННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЙ СВАЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

канд. техн. наук **Б. МОРАДИ САНИ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Представлен уточненный метод оценки при проектировании несущей способности оснований свай по результатам статического зондирования в песках посредством более достоверных корреляционных зависимостей с поправочными коэффициентами, исходя из принятой активной зоны и учета характера опрессовки окружающего грунта за счет особенностей технологии устройства и размеров свай. Предлагаемый метод определения в песчаных грунтах несущей способности оснований свай по результатам статического зондирования позволяет учитывать технологию устройства свай (набивные и забивные свай), диаметры их стволов и глубину погружения в несущие слои.*

**Ключевые слова:** основания свай, песчаные грунты, несущая способность, уточненная методика, поправочные коэффициенты.

**Введение.** Проблемы проведения изысканий при проектировании усиления фундаментов связаны с необходимостью получения достоверной информации в минимально возможные сроки и в стесненных условиях. Этим условиям отвечают методы скоростных изысканий, в частности статическое зондирование.

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

В данной статье представлена уточненная методика определения несущей способности забивных и набивных свай в песчаных грунтах на основании результатов статического зондирования (зонды II и III типов). Сущность предлагаемого метода, разработанного на базе синтеза существующих методов и собственных исследований, заключается в использовании известных формул с введением в них поправочных коэффициентов, а также схем выполнения зондирования грунтов. Уточненный метод проверен по данным сопоставления этих результатов с полученными при испытании 67 натуральных свай статическими нагрузками на двух объектах [3; 4].

**Несущая способность свай.** Несущую способность песчаных грунтов в основании сваи со стволом постоянного сечения определяем по следующей формуле:

$$Q = Q_b + Q_s = k_c \cdot \bar{q}_c \cdot A_b + k_f \cdot f_p \cdot A_s, \quad (1)$$

где  $Q_b$  – сопротивление грунта под нижней пятой сваи, кН;  $Q_s$  – сопротивление грунта вдоль ствола сваи, кН;  $k_c$  – поправочный коэффициент условий работы грунта под пятой сваи;  $\bar{q}_c$  – среднее значение сопротивления грунта в пределах активной зоны у пяты сваи по данным статического зондирования, МПа;  $A_b$  – площадь поперечного сечения ствола или пяты сваи в месте наибольшего ее уширения,  $\text{м}^2$ ;  $k_f$  – поправочный коэффициент условий работы грунта вдоль боковой поверхности ствола сваи, безразм.;  $f_p$  – среднее значение сопротивления грунта сдвигу вдоль боковой поверхности ствола сваи, МПа;  $A_s$  – площадь боковой поверхности ствола сваи,  $\text{м}^2$ .

В случае наличия уширения вдоль стволов свай следует дополнительно учитывать доли сопротивления грунтов под их кольцевыми опорными поверхностями на соответствующих глубинах.

Поправочные коэффициенты  $k_c$  и  $k_f$ , согласно исследованиям автора, предлагается определять по следующим формулам [5]:

$$k_c = \alpha \left( \frac{\bar{q}_c}{P_A} \right)^{-0,455} \quad \text{и} \quad k_f = \left( \frac{A_o}{2A_s} \right)^{-0,455}, \quad (2)$$

где  $A_o$  – площадь боковой поверхности на единицу длины ствола сваи,  $A_o = 1 \text{ м}^2$ ;  $A_s$  – площадь боковой поверхности ствола сваи,  $\text{м}^2$ ;  $P_A$  – сопротивление грунта,  $P_A = 1 \text{ МПа}$ ;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий технологию погружения свай, глубину ее погружения в несущий слой грунта с его мощностями в уплотненной зоне выше и ниже пяты свай, принимаем 1,9 для всех схем, кроме схемы II, для которой коэффициент  $\alpha$  определяем его по таблице 1.

При назначении коэффициентов  $k_c$  и  $k_f$  используем следующие условия: при  $\bar{q}_c > 25$  МПа принимаем  $\bar{q}_c = 25$  МПа; при  $\bar{f}_p > 0,125$  МПа принимаем  $k_f = \left(\frac{A_0}{A_s}\right)$ .

Таблица 1. – Значение  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $\alpha$  для разных глубин погружения в несущий слой грунта ( $h_d$ ) при разных видах свай и диаметрах их стволов

Глубина погружения конца свай в несущий слой грунта	Вариант схемы II	$l_1$	$l_2$	Набивные сваи		Забивные сваи
				$D = 0,36$ м	$D = 0,9$ м	$D = 0,3$ м
				$\alpha$		
$h_d < 8D$	1	$1,5D$	$1,5D$	1,9	1,15	1,9
$h_d \geq 8D$	2	$2D$	$4D$	1,9	1,5	2,5
	3	$1D$	$2D$	1,5	1,5	2,5

**Среднее значение сопротивления грунта в пределах активной зоны у пяты свай.** Среднее сопротивление грунта под конусом зонда в пределах уплотненной (активной) зоны у конца свай определяется по следующей формуле:

$$\bar{q}_c = \frac{1}{A+B} \int_{h-A}^{h+B} q_c(h) \cdot dh, \quad (3)$$

где  $A$  – толщина  $i$ -го слоя грунта выше конца свай в пределах активной зоны, м;  $B$  – толщина  $i$ -го слоя грунта ниже конца свай в пределах активной зоны, м;  $q_c$  – среднее значение удельного сопротивления  $i$ -го слоя грунта под наконечником зонда, МПа;  $h$  – длина свай, м.

Пределы активных зон ( $A$ ) и ( $B$ ) определяются в соответствии со схемами расположения слоев грунта возле нижних концов свай. В рассматриваемом автором случае выделено пять видов схем [5]:

**Схема I** (рис. 1) – расположение свай в однородном грунте. При этом толщина  $i$ -го слоя грунта выше ее пяты в пределах активной зоны принимает значение четырехкратного диаметра свай ( $A = 4D$ ), а толщина  $i$ -го слоя грунта ниже пяты в пределах активной зоны равна диаметру свай, т.е.  $B = 1D$  ( $D$  – диаметр ствола свай, м).

**Схема II** (рис. 2) – неоднородные грунты, которые в конце свай имеют несущий слой песчаного грунта, причем под нижним концом ствола располагаются слои с большими значениями сопротивлений, выше – с меньшими их значениями. В данной схеме  $A$  и  $B$  принимают значения  $l_1$  и  $l_2$  соответственно. Расчет по схеме II осуществляется по трем вариантам, при этом значения  $l_1$  и  $l_2$  зависят от высоты погружения конца свай в несущий слой и от варианта схемы.

Далее приведем описание трех возможных вариантов схемы II:

- **вариант 1** (рис. 2.1) – глубина погружения свай в несущий слой грунта не превышает восьми диаметров свай. В этом варианте толщины  $i$ -х слоев грунта выше и ниже конца свай в активной зоне одинаковы со значением  $A = B = 1,5D$ ;

- **вариант 2** (рис. 2.2) – глубина погружения свай в несущий слой грунта превышает  $8D$ , а ее конец находится в слабо- или среднеуплотненных песках. При этом в пределах активной зоны толщина  $i$ -го слоя грунта выше конца свай составляет  $A = 2D$ , ниже его –  $B = 4D$ . Однако в отличие от варианта 1 схемы II в данном случае принимается измененное значение коэффициента  $\alpha$ , который учитывает технологию погружения и диаметр свай (табл. 2);

- **вариант 3** (рис. 2.3) – глубина погружения свай в несущий слой грунта превышает  $8D$ , а ее конец находится в сильноуплотненном песке. При этом в пределах активной зоны толщины  $i$ -х слоев грунта принимают значения выше конца свай  $A = 1D$ , а ниже его –  $B = 2D$ .

В целом для схемы II при определении несущей способности свай по данным статического зондирования следует принимать значения  $l_1$ ,  $l_2$ , а для разных глубин (высот) погружения в несущий слой грунта ( $h_d$ ) при разных видах свай и диаметрах их стволов согласно таблице 1.

**Схема III** (рис. 3) представляет собой особый случай схемы II, когда ниже конца свай имеются слои грунта с большими значениями сопротивлений конуса, а выше залегают слои слабых грунтов (ил, торф и др.). По данной схеме в пределах активной зоны выше конца свай толщины  $i$ -х слоев грунта принимают значения: в конце свай толщины несущего слоя  $A = S$  ( $S$  – толщина несущего грунта в конце свай), а ниже ее конца в пределах активной зоны  $B = 1D$ . При этом пределы зоны ( $A$ ) не охватывают несущий грунт.

**Схема IV** (рис. 4) применяется в неоднородном грунте, когда ниже конца свай залегают грунты с меньшими, а выше – с большими значениями сопротивлений конуса. В этом случае толщины  $i$ -х слоев грунта в пределах активной зоны принимают значения: выше конца свай  $A = 2D$ , а ниже его –  $B = 4D$ .

**Схема V** (рис. 5) применяется в неоднородном грунте, когда ниже конца свай залегают грунты с большими значениями сопротивления конуса, в то же время выше и ниже имеются слои грунта с меньшими значениями сопротивлений конуса.

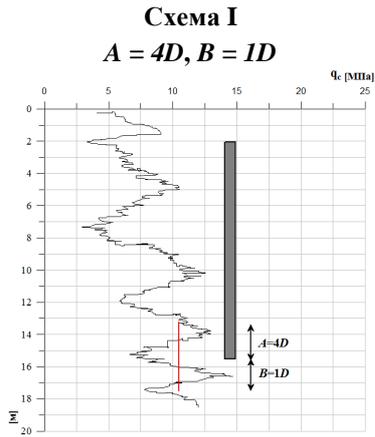
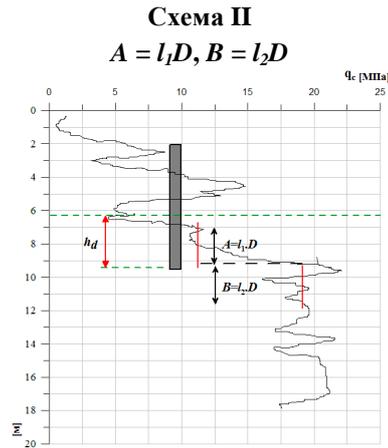


Рисунок 1. – Однородный грунт



$D$  – диаметр сваи;  $h_d$  – заглубленная часть сваи погружена в несущий слой

Рисунок 2. Неоднородный грунт, ниже конца сваи располагаются слои грунта с большими значениями сопротивлений, выше – с меньшими их значениями:

**Варианты для схемы II**

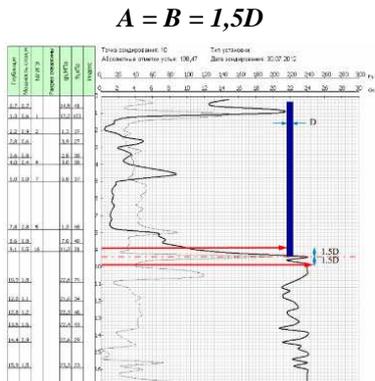


Рисунок 2.1. – Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают слои грунтов с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

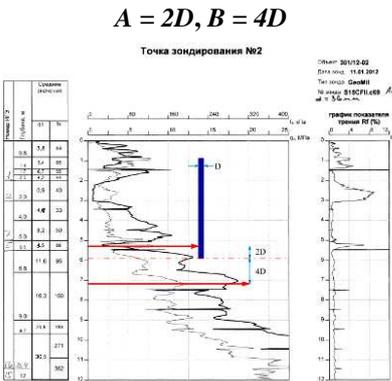


Рисунок 2.2. – Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают грунты с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

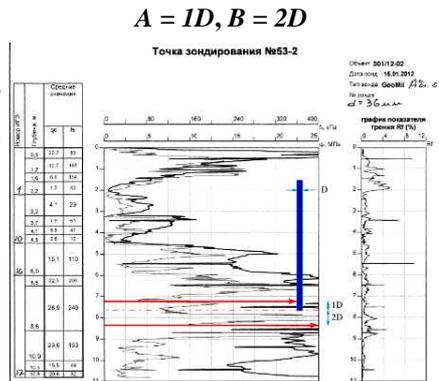


Рисунок 2.3. – Неоднородный грунт, ниже конца сваи залегают грунты с большими, а выше – с меньшими значениями сопротивлений конуса

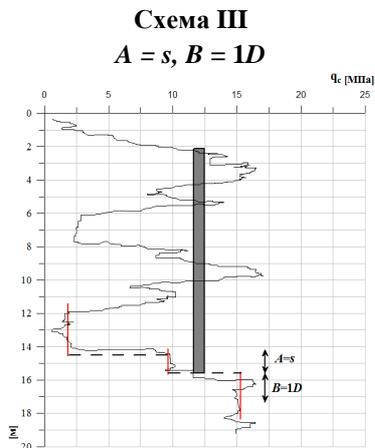


Рисунок 3. – Ниже конца сваи залегают грунты с большими значениями сопротивлений конуса, а выше – слои слабых грунтов (ил, торф и др.)

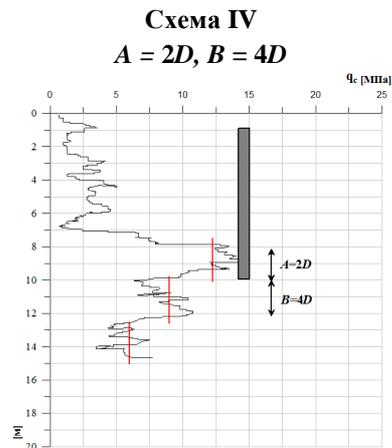


Рисунок 4. – Неоднородный грунт с наличием ниже конца зонда слоя с меньшими, а выше залегают слои с большими значениями сопротивлений конуса

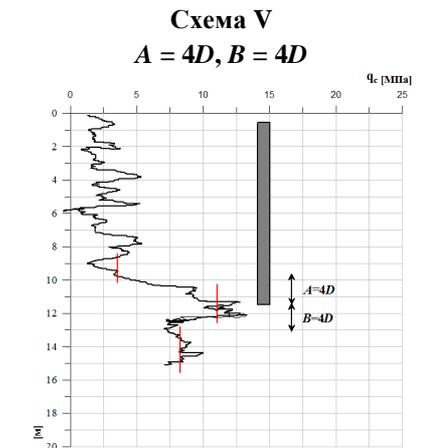


Рисунок 5. – Неоднородный грунт с наличием ниже конца зонда слоев с большими, а ниже залегают слои грунта с меньшими значениями сопротивлений конуса

В схеме V толщины  $i$ -х слоев грунта в пределах активной зоны выше и ниже конца свай принимают одинаковые значения, т.е.  $A = B = 4D$ .

Для определения сопротивления вдоль боковой поверхности ствола сваи используем следующую формулу[5]:

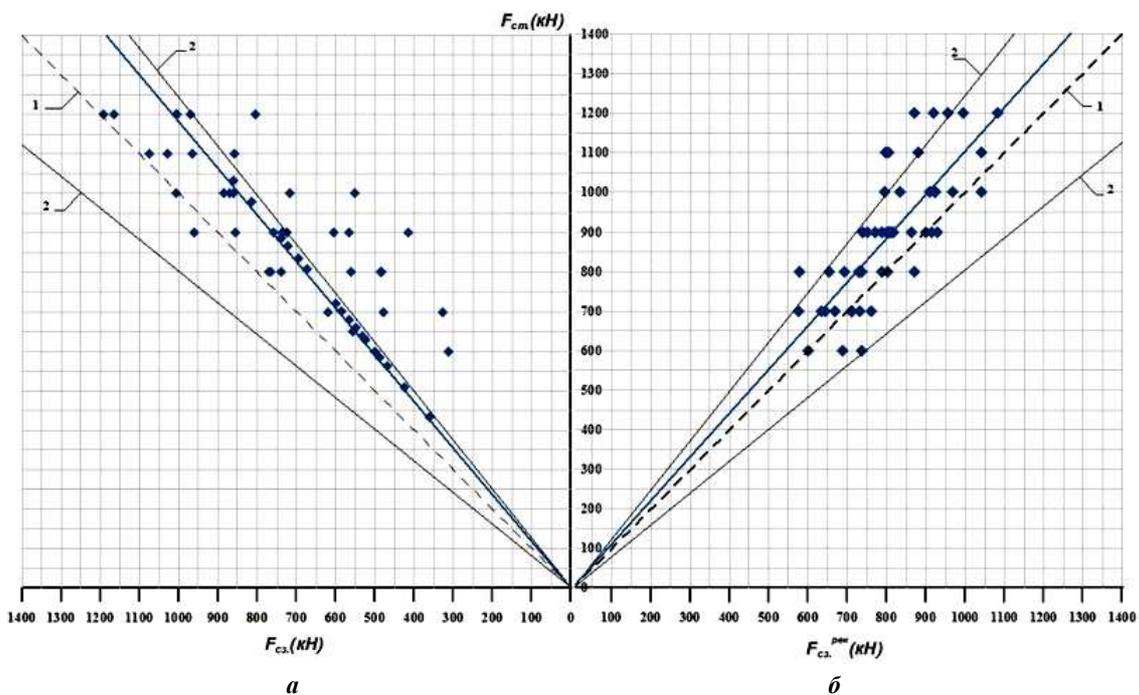
$$f_p = \frac{\bar{q}_c}{k_s}, \quad (4)$$

где  $k_s$  – эмпирический коэффициент, значение которого зависит от разновидности грунта вдоль сваи и технологии ее заглубления, согласно Бустаманте и Гианцелли (LCPC), определяется по таблице 2.

Таблица 2. – Значения коэффициента  $k_s$

Грунт	$q_c$ , МПа	$k_s$			
		I		II	
		A	B	A	B
Глина (clay)	< 1,0	30	90	90	30
	1,0...5,0	40	80	40	80
	> 5,0	60	120	60	120
Пылеватый грунт (silt)	≤ 5,0	60	150	60	120
	> 5,0	60	120	60	120
Песок (sand)	< 5	60	150	60	120
	5,0...12,0	100	200	100	200
	> 12	150	300	150	200

**Анализ результатов статического зондирования на объектах.** Для оценки достоверности предложенного метода расчета несущей способности набивных и забивных свай по данным статического зондирования также проведен статистический анализ данных и сравнение с применяемой в Республике Беларусь методикой оценки несущей способности свай на базе статического зондирования, результаты которых показаны на рисунке 6.



$a$  – по ПН-2000 к СНБ;  $b$  – по предлагаемому уточненному методу;  
1 – линии абсолютной сходимости; 2 – линии отклонений на  $\pm 20\%$

Рисунок 6. – Сопоставление предельных сопротивлений свай, определенных путем статических испытаний ( $F_{ст.исп.}$ ) и рассчитанных по результатам статического зондирования ( $F_{сз.}$ )

Таблица 3. – Статистический анализ результатов определения прогнозируемых значений несущих способностей буронабивных и забивных свай по предлагаемому уточненному методу и по методу, применяемому в Республике Беларусь

Наименование статистических показателей		Осредненное значение показателей при расчетах несущей способности свай по статическому зондированию и испытаниям статической нагрузкой набивных и забивных свай	
Методы определения несущих способностей свай		П 2-2000 к СНБ	по предлагаемому методу
Диаметр свай, м		от 0,3 до 0,9	
Количество определений		67	67
Среднее значение отношения $F_{сз.}/F_{ст.исп.}$		0,78	0,92
Среднее квадратическое отклонение $F_{сз.}/F_{ст.исп.}$		0,175	0,110
Средняя относительная погрешность при определении $F_{сз.}/F_{ст.исп.}$ , %		4,78	3,38
Коэффициент асимметрии ( $A_s$ )		-0,01	0,35
Количество значений отношений $F_{сз.}/F_{ст.исп.}$ (в %), находящихся в пределах $\pm 20\%$ от значения $F_{сз.}/F_{ст.исп.} = 1$	в сторону завышения	–	2
	в сторону занижения	55	14

Из рисунка 6 и таблицы 3 [5] видно, что практически в большинстве случаев несущие способности свай, определенные с использованием предлагаемой методики, находятся в пределах  $\pm 20\%$  от линии абсолютной сходимости.

На базе такой обработки при коэффициенте детерминации  $R^2 = 0,986$  для набивных и забивных свай с диаметрами от 0,3 до 0,9 м получаем следующую расчетную формулу:

$$F_{ст.} = 1,08F_{сз.}, \quad (5)$$

где  $F_{ст.}$  – несущая способность свай по результатам их испытаний статической нагрузкой, кН;  $F_{сз.}$  – прогнозируемая несущая способность свай по результатам статического зондирования, рассчитанная предлагаемым методом, кН.

Исходя из полученных результатов делаем вывод, что предлагаемый метод дает нам более точный прогноз несущей способности по сравнению с П2-2000 к СНБ [1].

Апробация результатов исследований при проектировании реальных объектов в грунтовых условиях Республики Беларусь подтвердила их эффективность, выраженную в снижении стоимости устройства свай не менее чем на 10...20% за счет уменьшения их длины или количества в плане фундамента, обоснованных более точной оценкой их несущей способности в песчаных грунтах.

**Заключение.** В результате проведенного исследования *усовершенствован метод расчета забивных и набивных свай* по первой группе предельных состояний посредством использования экспериментально обоснованных расчетных схем их оснований с уточненными активными зонами, учитывающими напряженно-деформируемое состояние, свойств и характеристик грунта, что позволяет по сравнению с известными методиками повысить точность расчетов оснований свай не менее чем на 10% [5].

Впервые для грунтовых условий Республики Беларусь на основе выполненного вероятностно-статистического анализа и систематизации результатов параллельных статических испытаний оснований различных типов забивных и набивных свай и их грунта способом статического зондирования, *получены новые экспериментально обоснованные данные об оптимальных размерах активной зоны в уровне нижнего конца свай.* Это дает возможность уточнить расчетные схемы оснований забивных и набивных свай для определения несущей способности по результатам статического зондирования с учетом их напряженно-деформируемого состояния и прочностных характеристик, различных по свойствам, гранулометрическому составу, характеру напластований, однородности песчаного грунта, и, как следствие, повысить качество проектирования фундаментов [5].

*Рекомендуется* для повышения достоверности прогнозируемых значений несущей способности свай по результатам статического зондирования при наличии песчаных грунтов в основании применять методику, предложенную автором, в проектной практике при прогнозировании несущей способности [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование забивных и набивных свай по результатам зондирования грунтов : пособие П2-2000 к СНБ 5.01.01-99 / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2001. – 23 с.
2. Моради Сани, Б. Предварительная оценка несущей способности песчаных оснований одиночных свай по международным стандартам / Б. Моради Сани // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 62–70.
3. Строительство многофункционального комплекса по проспекту Победителей в г. Минске : объект № 301/11-02 / ООО «Тектонит». – Минск, 2012–2013.
4. Штаб-квартира Национального олимпийского комитета : объект № 2733/07-02 / УП «Геосервис». – Минск, 2010.
5. Моради Сани, Б. Несущая способность песчаных оснований свай по результатам статического зондирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Б. Моради Сани ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – 21 с.
6. Фундаменты и подземные сооружения, возводимые с использованием струйной технологии. Правила проектирования и устройства : ТКП 45-5.01-45-2006 (02250) / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 33 с.

*Поступила 06.06.2017*

#### **IMPROVED METHODOLOGY OF DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF PILE FOUNDATIONS IN SANDS USING CONE PENETRATION TESTS DATA**

***B. MORADI SANI***

*Presented a refined method for estimating the bearing capacity of pile foundations by using the results of static cone penetration tests in sands. This carried out by means of reliable correlations of correction factors, based on the active zone and taking into account the nature of the surrounding soil, which formed due to the features of the device technology of pile installation and pile sizes. The proposed method for determining the bearing capacity of pile foundations in sandy soils based on the results of static cone penetration tests makes it possible to take into account the technology of piling (cast in place and driving piles), the diameters of piles and the depth of immersion in the bearing layers.*

***Keywords:*** Foundation piles, sandy soils, bearing capacity, adjusted methodology, correction factors.

УДК 624.014

## МЕТОД ЭФФЕКТИВНОЙ ШИРИНЫ ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ЕВРОКОДА 3

канд. техн. наук **В.В. НАДОЛЬСКИЙ**; **М.Г. ДЕРГАЧЕВ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Рассматриваются конструкции из холодноформованных элементов, применение которых в настоящее время нельзя назвать интенсивным, несмотря на ряд технологических и эксплуатационных преимуществ перед горячекатаными конструкциями, особенно в определенных областях. Показаны основные причины этого: недостаточная изученность, специфические особенности работы элементов под нагрузкой, отсутствие нормативных документов. Введение Еврокода 3 на территории Республики Беларусь сыграло благоприятную роль при внедрении эффективных конструктивных решений на основе холодноформованных профилей. В данном исследовании акцент сделан на расчете эффективных характеристик сечения, учитывающих потерю устойчивости частей сечения (традиционный отечественный термин – местная устойчивость) и формы сечения. Проведен сравнительный анализ методов определения эффективных характеристик сечения согласно требованиям Еврокода (ТКП EN 1993) и норм Северной Америки.*

**Ключевые слова:** тонкостенные профили, холодноформованные профили, эффективные характеристики сечения, закритическая работа пластин, потеря местной устойчивости, потеря устойчивости формы сечения, оцинкованные профили, элементы жесткости.

**Введение.** Стальные холодноформованные элементы – это элементы, изготовленные путем изгибания или прокатывания плоского стального листа таким образом, чтобы полученная новая форма выдерживала большую нагрузку, чем плоский лист [1]. Особенностью холодноформованных элементов является небольшая толщина в сравнении с горячекатаным прокатом. Например, американский стандарт [2] распространяется на элементы толщиной от 0,378 до 25,4 мм, европейский стандарт [3] – на элементы толщиной от 0,5 до 15 мм и на соединения толщиной от 0,5 до 4 мм. К сталям предъявляется дополнительное требование – пригодность для профилирования [3].

Конструкции из холодноформованных элементов хорошо зарекомендовали себя при строительстве универсальных производственных зданий, малоэтажных жилых и гражданских зданий, логистических центров, магазинов и торговых павильонов, надстроек и пристроек существующих зданий и сооружений. В последнее время холодноформованные элементы начали активно применяться в ограждающих конструкциях (термопанели, сэндвич-панели), в конструкциях вентилируемых фасадов и кровель.

Среди преимуществ холодноформованных конструкций следует отметить легкий вес, быстроту изготовления, высокую скорость строительства, всесезонность монтажа. К недостаткам можно отнести более сложную работу тонкостенных элементов под нагрузкой в сравнении с горячекатаным прокатом, что требует высокой квалификации проектировщиков. Также особого внимания требуют вопросы обеспечения коррозионной стойкости и сопротивления огневому воздействию.

Основными факторами, сдерживающими применение холодноформованных тонкостенных конструкций, являются недостаточная изученность, специфические особенности работы элементов под нагрузкой, отсутствие нормативных документов. Уровень подготовки проектировщиков в этом направлении остается низким. Как следствие, попытки применения данного вида конструкций зачастую сопровождаются ошибками на стадии проектирования и возведения.

Нами рассмотрены теоретические основы учета закритической стадии работы элемента после потери местной устойчивости посредством расчета эффективных характеристик сечений, уделено внимание особенностям работы тонкостенных элементов. Приведены результаты сравнительного анализа методов определения эффективных характеристик, которые реализованы в нормативных документах. Наиболее актуальным и имеющим практическое значение представляется сравнение моделей сопротивления по ТКП EN 1993-1-5 [4] и AISI S100-12 [2] (нормы Северной Америки). В связи с тем, что на территории Республики Беларусь в 2010 году введен ТКП EN 1993-1-5-2009 «Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций», детально рассмотрены основные теоретические предпосылки, заложенные в основу этого документа.

**Нормативное обеспечение.** В 1940 году в США принято решение о разработке стандартов в области холодноформованных конструкций. Первый документ вышел в 1946 году под названием Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members. Последняя редакция этого документа AISI S100-12 «North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members» [2] вышла в 2012 году (с исправлениями документ переиздан в 2014 году) при поддержке Американского института чугуна и стали (AISI).

В Европе к разработке данного стандарта приступили позже, за основу были приняты исследования американских ученых [5]. Первый прообраз нормативного документа по расчету холодноформованных элементов разработан при поддержке организации European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) в 1987 году [6]. Эти документы легли в основу европейского стандарта EN 1993-1-3 (Еврокода) [3]. Следует отметить, что параллельно проводились исследования в каждой стране, в результате этого в европейских странах действовали нормативные документы, касающиеся холодноформованных конструкций. СНиП II-23-81 «Стальные конструкции» и актуализированные нормативные документы России, Украины и Казахстана не рассматривают особенности проектирования конструкции из холодноформованных тонкостенных элементов, что является причиной столь позднего развития холодноформованных тонкостенных конструкций на территории стран бывшего СССР.

**Особенности работы.** К особенностям тонкостенных элементов можно отнести:

- разнообразные формы потери устойчивости и возможные их комбинации (взаимодействие). Для холодноформованных элементов выделяют три основных типа потери устойчивости: местная (local buckling), устойчивость формы поперечного сечения (distortional buckling) и общая (global buckling). При этом к общей относятся изгибная (flexural), крутильная (torsional) и изгибно-крутильная (flexural-torsional) формы потери устойчивости;

- склонность сечений к кручению. Основные виды холодноформованных элементов имеют несимметричное сечение. В этом случае центр сдвига не совпадает с центром тяжести сечения. Если нагрузка не приложена в центре сдвига, чтобы обеспечить изгиб без кручения, любое отклонение от этой оси вызывает кручение элемента [6];

- смятие, искривление, потеря устойчивости стенки элементов в местах приложения локальной нагрузки;

- чувствительность к начальным несовершенствам. Различают следующие виды наиболее характерных несовершенств холодноформованных элементов: геометрические несовершенства, остаточные напряжения и изменение свойств стали при изготовлении (в местах закругления происходит увеличение предела текучести и (незначительно) временного сопротивления стали [1]);

- работа только в упругой стадии, что является следствием предрасположенности элемента к потере устойчивости (особенность сечения класса 4);

- нетрадиционные и более сложные узловые соединения;

- закритическая стадия работы элемента при потере местной устойчивости.

Далее более подробно рассмотрены особенности метода эффективных характеристик применительно к учету закритической стадии работы элемента при потере местной устойчивости и потере устойчивости формы сечения.

**Закритическая стадия работы пластин и понятие о приведенной (эффективной) ширине.**

Критические напряжения потери местной устойчивости для холодноформованных элементов, как правило, составляют очень малую долю от предела текучести, что не позволяет в полной мере использовать прочностные характеристики материала.

Экспериментально и теоретически установлена возможность увеличения нагрузки на холодноформованный элемент после потери местной устойчивости [7]. В этом случае рассматривают закритическую стадию работы, при которой часть поперечного сечения (стенки и/или полки) теряет устойчивость. Такой подход позволяет учесть значительный резерв сопротивления.

До достижения значений критических напряжений потери местной устойчивости сжимающие напряжения, как правило, распределяются по сечению линейно. Увеличение сжимающих напряжений за пределы критических значений приводит к нелинейному перераспределению напряжений по поперечному сечению пластины. На примере прямоугольной пластины, подкрепленной с двух сторон, нелинейность распределения напряжений заключается в уменьшении напряжений в средней части пластины и увеличении на крайних участках (рисунок 1). Сжимающие напряжения на крайних участках будут увеличиваться до тех пор, пока не достигнут предела текучести стали.

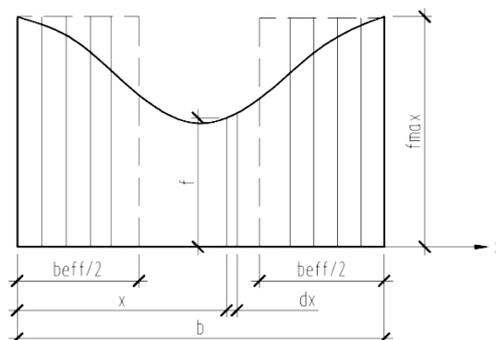


Рисунок 1. – Распределение напряжений по сечению сжатой пластины

На основании этого явления Т. Карман в 1932 году предложил экспериментально-теоретический метод расчета пластин в закритической стадии, основанный на предположении, что в момент разрушения напряжения на краях пластины достигли предела текучести и уравниваются с полной нагрузкой. В это же время средняя искривленная часть пластины считается ненапряженной, т.е. неэффективной.

Классическое решение Т. Кармана позволяет определить отношение части ширины сечения  $b_{eff}$ , которая воспринимает напряжения, равные пределу текучести, к полной ширине сечения  $b$ , которая воспринимает критические напряжения потери местной устойчивости, в следующем виде:

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}}. \quad (1)$$

Следует отметить, что часть сечения шириной  $b_{eff}$  принято называть эффективной частью сечения пластины, то есть та часть сечения, которая не теряет местную устойчивость при напряжениях, равных пределу текучести.

В 1933 году Е.Е. Sechler провел серию опытов, с целью проверить справедливость гипотезы Т. Кармана. Результаты показали, что отношение частей сечения  $b_{eff} / b$  зависит не только от  $\sigma_{cr} / f_y$ , но также от отношения полной ширины сечения к его толщине ( $b / t$ ). В 1946 году Г. Винтер экспериментальным путем уточнил формулу (1):

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \left( 1 - 0,25 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_{max}$  – максимальные краевые напряжения в пластине, которые могут быть меньше, чем предел текучести.

С 1946 по 1968 год расчет эффективных характеристик проводился в соответствии с формулой (2). За это время было накоплено множество экспериментальных данных, которые позволили ее уточнить. В нормах [4] она приняла вид:

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \left( 1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \right). \quad (3)$$

Отмеченные рассуждения лежат в основе метода эффективной (редуцированной, приведенной) ширины. В иностранных нормативных документах этот метод является основным при расчете элементов на местную устойчивость и устойчивость формы сечения [8]. В соответствии с этим методом сечение рассматривается как набор отдельных пластин с различными условиями опирания по контуру. Для каждой пластины определяются эффективные участки, способные воспринимать нагрузку. Не эффективные участки исключаются из поперечного сечения.

**Эффективная ширина пластины согласно ТКП EN 1993-1-5.** Согласно ТКП EN 1993-1-5 [4] эффективная ширина пластины выражена через коэффициент потери устойчивости  $\rho$  в следующем виде:

$$b_{eff} = \rho b, \quad (4)$$

где

$$\rho = \frac{1 - 0,22 / \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}}}}{\sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}}}} = \frac{1 - 0,22 / \lambda}{\lambda} \leq 1,$$

где  $\lambda$  – условная гибкость пластины

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{max} [12(1 - \nu^2)(b/t)^2]}{k\pi^2 E}} = \left( \frac{1,052}{\sqrt{k}} \right) \left( \frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{E}}.$$

Следует отметить, что коэффициенты редуцирования откорректированы на основании эмпирических данных, что ограничивает широкое применение этого метода и требует уточнения для отдельных видов напряженно-деформируемого состояния. Также этот метод отличается повышенной трудоемкостью. Преимущество учета закритической стадии работы пластин демонстрируется на следующем примере. Для равномерно сжатой пластины шириной 400 мм и толщиной 1,2 мм на основании классической формулы равновесия пластины [5] критическое напряжение равно 6,67 МПа, при этом значение критической силы составит 3,2 кН. На основании формул (4), (5), (6) для предела текучести стали 350 МПа эффективная ширина сечения пластины составит 52 мм, при этом сжимающая сила равна 21,84 кН. То есть зна-

чение силы, при которой напряжения на устойчивых (эффективных) частях пластины достигнут предела текучести, превышает значение критической силы потери устойчивости в 6,8 раз.

**Учет потери устойчивости формы сечения при расчете холодноформованных элементов.** Для предотвращения потери местной устойчивости наиболее эффективным методом является уменьшение ширины тонкостенного элемента или его подкрепление по свободной стороне посредством элемента жесткости. Элементы жесткости – это одинарные (а) или двойные (б) отгибы на свесах сечения либо промежуточные гофры (в) (рис. 2).

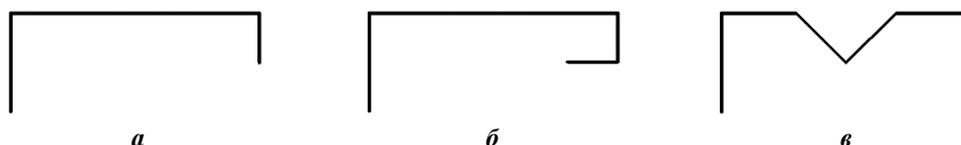


Рисунок 2. – Типы элементов жесткости

Для обеспечения устойчивости элемента жесткости, его размеры должны находиться в пределах, указанных в [3, п. 5.2]. Наличие элементов жесткости в сечении позволяет повысить величину нагрузки, которую может воспринять тонкостенный элемент. При этом возможно возникновение потери устойчивости формы сечения. Данный тип потери устойчивости характеризуется тем, что устойчивость теряют непосредственно элементы жесткости.

Определение сопротивления потере устойчивости формы сечения основано на допущении, что элемент жесткости ведет себя как сжатый стержень с непрерывным частичным раскреплением [5]. В расчетной схеме это раскрепление представлено в виде упругоподатливой связи (пружины) (рис. 3).

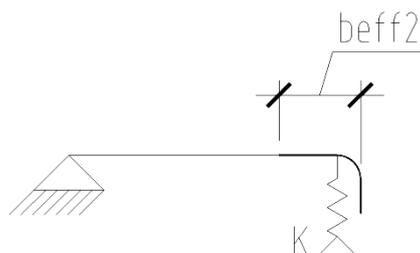


Рисунок 3. – Эквивалентная схема раскрепления элемента жесткости

Жесткость этой связи должна определяться путем приложения единичной нагрузки  $u$  на единицу длины. Жесткость связи  $K$  можно определить по формуле:

$$K = \frac{u}{\delta}, \quad (7)$$

где  $\delta$  – перемещение элемента жесткости от единичной нагрузки  $u$ , действующей в центре тяжести эффективной части поперечного сечения  $b_{eff2}$  (рис. 4).

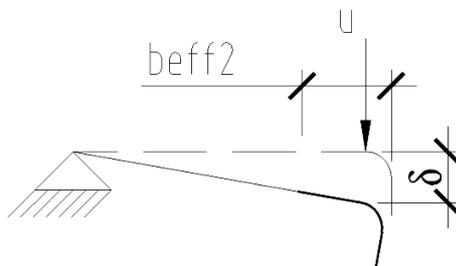


Рисунок 4. – Определение жесткости связи

После определения жесткости связи  $K$  определяются критические напряжения потери устойчивости элемента жесткости в упругой стадии:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s}, \quad (8)$$

где  $I_s$  – момент инерции эффективного сечения элемента жесткости, определенный для эффективной площади  $A_s$ .

Используя критические напряжения потери устойчивости элемента жесткости определяют коэффициент снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения  $\chi_d$  в зависимости от относительной гибкости  $\lambda_d$ :

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}. \quad (9)$$

Таким образом, учет влияния элемента жесткости сводится к определению его эффективных размеров, а также к определению коэффициента снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения (т.е. элемента жесткости)  $\chi_d$ . Потерю устойчивости формы сечения учитывают путем уменьшения толщины элемента жесткости, умножая ее полное значение на коэффициент  $\chi_d$ .

**Особенности применения метода приведенной ширины в соответствии с EN.** В соответствии с [3] все типы сечений классифицируются в зависимости от предрасположенности их частей к потере местной устойчивости. Как правило, сечение тонкостенных холодноформованных элементов относится к классу 4, то есть потеря местной устойчивости или устойчивости формы сечения наступает до достижения напряжениями предела текучести. Приняв такое предположение, основной задачей расчета становится определение эффективного (редуцированного) сечения.

Говоря об эффективном сечении элемента, проектировщик или исследователь должен понимать, что «эффективное сечение» не отображает реального распределения напряжений в сечении элемента и служит лишь инструментом, который позволяет определить несущую способность конструкции.

Распределение сжимающих напряжений для одного и того же сечения может быть различно, при разном характере работы элемента (изгиб, сжатие). Соответственно и геометрические характеристики сечения будут различаться для разного типа напряженного состояния. Для асимметричного сечения геометрические характеристики будут даже зависеть от знака действия момента. Поэтому важно рассчитывать эффективные характеристики для каждого конкретного случая. Также при расчете эффективных характеристик следует учитывать наличие отверстий, причем для разного типа напряженного состояния может быть разное критичное расположение отверстий.

Документ [3] распространяется на холодноформованные элементы с сечением, отношение «ширины к толщине» которых находится в диапазоне, приведенном в [3, таблица 5.1]. Для приведенных значений накоплен достаточный опыт и выполнена проверка испытаниями. Допускается использование элементов с отношением размеров, превышающих приведенные величины. Но в этом случае их прочность и жесткость должны быть подтверждены результатами испытаний либо более обоснованными расчетами [3].

При определении эффективных геометрических характеристик в соответствии с [3] учитывают следующие аспекты:

1) *толщина холодноформованного элемента.* Действие ТКП EN [3] распространяется на элементы толщиной от 0,5 до 15 мм и на соединения толщиной от 0,5 до 4 мм. Под этой толщиной принимается толщина элемента без учета покрытия [3]. Толщина металла без покрытия равна номинальной толщине листа после холодного формования за вычетом толщины покрытия;

2) *срединная линия.* В соответствии с ТКП EN [3] при определении эффективных геометрических характеристик используется теоретическая ширина элементов. Под теоретической шириной понимают расстояние между точками пересечений срединных линий сечения. Как правило, длина срединной линии равняется длине части сечения (стенки, полки, элемента жесткости) за вычетом либо толщины элемента (для стенки и полки с элементом жесткости), либо половине толщины элемента (для элемента жесткости и полки без элемента жесткости). Изначально радиусы закругления не принимаются в расчет. В результате получают идеализированное сечение, состоящее из прямоугольных элементов.

3) *влияние углов закругления.* ТКП EN [3] позволяет применять приближенную процедуру для определения геометрических характеристик. Допускается не учитывать влияние закруглений углов сгиба на сопротивление сечения, если выполняются условия  $r < 5t$  и  $r < 0,1b_p$ , где  $b_p$  – это теоретическая ширина сечения,  $r$  – радиус сгиба. Если условия не выполняются, сечение может быть также рассмотрено как состоящее из плоских элементов с острыми углами, но геометрические характеристики должны быть уточнены с помощью понижающих коэффициентов [3]. При определении жесткостных характеристик влияние углов сгиба следует учитывать всегда;

4) *предел текучести.* При расчете на прочность с учетом местной потери устойчивости предел текучести  $f_y$  принимается как  $f_{yb}$  для случая определения эффективной ширины сжатых элементов согласно [3].

5) *эффективные характеристики при расчете на эксплуатационную пригодность.* Для оценки эксплуатационной пригодности эффективная ширина сжатого элемента определяется по сжимающему напряжению  $\sigma_{com,Ed,ser}$  соответствующему проверкам предельных состояний эксплуатационной пригодности.

**Сравнение методик определения эффективных характеристик по EN и AISI.** Поскольку американские стандарты в части тонкостенных элементов легли в основу европейских стандартов, методики определения эффективных характеристик имеют одну теоретическую базу, которой является метод приведенной ширины. Стоит отметить, что в качестве альтернативы методу приведенной ширины американские стандарты допускают использовать метод прямого определения несущей способности (Direct-StrengthMethod).

*Главные отличия между американским и европейским стандартом:*

1. Расчетная ширина элемента сечения  $w$

При определении эффективных характеристик по американскому стандарту AISI S100-12 [2] сразу учитываются углы сгиба. При этом считается, что местной потере устойчивости подвержены прямолинейные участки сечения  $w$ , заключенные между углами сгиба. Как и ТКП EN [3] AISI S100-12, лимитирует максимальное отношение прямолинейных участков к их толщине [2, п. В1.1].

2. Учет потери устойчивости формы сечения

При расчете по ТКП EN [3] потеря устойчивости формы сечения учитывалась путем уменьшения толщины элемента жесткости. При расчете по AISI S100-12 потеря устойчивости формы сечения учитывается путем дополнительного уменьшения ширины элемента жесткости. При этом возможны два варианта:

- отношение прямолинейной части сжатой полки  $w$  к ее толщине  $t$  не превышает  $0,328S$ , где  $S$  определяется в соответствии с формулой Eq.B4-7[2]. В этом случае потеря устойчивости формы сечения исключена, и элемент жесткости рассчитывается как равномерно сжатая пластина с односторонним подкреплением;

- отношение прямолинейной части сжатой полки  $w$  к ее толщине  $t$  превышает  $0,328S$ , где  $S$  определяется в соответствии с [2, ф. Eq.B4-7]. В этом случае в соответствии с формулами Eq.B4-8 и Eq.B4-10 [2] необходимо определить предельный и фактический моменты инерции элемента жесткости. Затем коэффициент, равный отношению этих моментов, дополнительно умножается на эффективную ширину элемента жесткости. При этом эффективная ширина элемента жесткости также определяется как для равномерно сжатой пластины с односторонним подкреплением.

Для численного сравнения двух методов были взяты несколько типоразмеров С-образных профилей с элементами жесткости в виде одинарного отгиба. В данной работе не рассматриваются вопросы, связанные с оценкой уровня надежности моделей сопротивления, поэтому частные коэффициенты безопасности были исключены из расчетных формул.

Для возможности сопоставления результатов анализа, прочностные характеристики стали приняты равными между собой. Результаты вычислений сведены в таблицу.

Сравнение эффективных характеристик по EN и AISI

Характеристика	EN	AISI	EN/AISI	EN	AISI	EN/AISI	EN	AISI	EN/AISI
	16×47×150×41×16×1,0			6×47×150×47×6×1,0			10×37×195×37×10×1,0		
Полная площадь, мм <sup>2</sup>	255,4	49,8	1,022	241,9	236,3	1,024	273,6	268	1,021
Конечное значение коэффициента $\chi_d$	0,633/0,697	–	–	0,331	–	–	0,532	–	–
Эффективная площадь, мм <sup>2</sup>	117,7	138,4	0,85	91,9	99,2	0,93	99,9	111,9	0,89

**Заключение.** С введением в 2009 году Еврокодов на территории Беларуси появилась возможность нормативно закреплённого расчета холодноформованных элементов. Но уровень подготовки проектировщиков в этом направлении остается низким. Часто встречается, что в конструкции используют тонкостенный элемент, а его расчет ведут без учета эффективных характеристик. Это приводит к тому, что реальная несущая способность сечения гораздо ниже планируемой. Стоит отметить, что одним из минусов Еврокодов является отсутствие ярко выраженной инженерной методики расчетов. Существующие пояснительные книги, методички, публикации пока не переведены на русский язык.

Настоящая работа была проведена для освещения и объяснения основных особенностей работы тонкостенных холодноформованных элементов. Акцент сделан на расчете эффективных характеристик сечения, учитывающих потерю устойчивости частей сечения и формы сечения. Выполнен качественный и численный анализ методики определения эффективных характеристик по EN и AISI. Для анализа были рассмотрены холодноформованные швеллерообразные профили. Расчет показал разницу в значениях от 10 до 20%. Заметим, что для рассмотренного частного случая (центрально-сжатого стержня) опреде-

ление эффективных характеристик является менее трудоемким по методу, приведенному в AISI. Также следует отметить условность данного анализа расчетных методик на основании только сравнения эффективных характеристик сечений. Для точного анализа необходимо сравнение сопротивления элементов, что в данной статье не рассмотрено и требует дополнительно изучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Yu W.-W. Cold-formed steel design: fourth edition / Wei-Wen Yu, R.A. LaBoube. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2010. – 491 с.
2. AISI S100-12. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. – Washington: American Iron and Steel Institute, 2014. – 174 с.
3. ТКП EN 1993-1-3-2009\* (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов (EN 1993-1-3:2006, EN 1993-1-3:2006/AC:2009, ИДТ). – Минск : Минстройархитектуры, 2014. – 119 с.
4. ТКП EN 1993-1-5-2009\* (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. (EN 1993-1-5:2006, EN 1993-1-5:2006/AC:2009, ИДТ). – Минск : Минстройархитектуры, 2014. – 51 с.
5. Семко, В.А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / В.А. Семко. – Киев : Украинский Центр Стального Строительства (УЦСС), 2015. – 143 с.
6. Dubina, D. Design of Cold-formed Steel Structures / Dan Dubina, Viorel Ungureanu, Raffaele Landolfo. – Mem Martins : ECCS, 2012. – 654 с.
7. Нехаев, Г.А. Легкие металлические конструкции / Г.А. Нехаев. – Тула : ООО «ПрофСтальПроект», 2012. – 90 с.
8. Гарифуллин, М.Р. Устойчивость тонкостенного холодногнутого профиля при изгибе : краткий обзор публикаций / М.Р. Гарифуллин, Н.И. Ватин. – СПб., 2014. – 57 с.

Поступила 27.02.2017

**EFFECTIVE WIDTH METHOD  
FOR THIN-WALLED COLD-FORMED ELEMENTS  
IN ACCORDANCE WITH EUROCODE 3**

**V. NADOLSKI, M DZERHACHOU**

*Despite a series of technological and service advantages compared to hot rolled structures, especially in certain fields, the use of cold formed structural elements now cannot be called intense. The main reason is insufficient knowledge about this kind of specific structural elements, features of work elements under load and the absence of normative documents. Introduction of Eurocode 3 in the Republic of Belarus played a favorable role in the implementation of effective constructive solutions on the basis of cold formed profiles. In the article emphasis is placed on the calculation of the effective cross-section characteristics, taking into account the platebuckling (traditional domestic term – local buckling) and distortional (cross-section) buckling. A comparative analysis of the methods of determining effective cross-section according to the requirements of Eurocode (EN 1993) and North American standards are carried out.*

**Keywords:** thin-walled elements, cold-formed elements, effective sections, post-critical strength of thin plates, local buckling, distortional buckling, galvanized elements, stiffeners.

УДК 624.012.45

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ СИСТЕМА ПОПЕРЕЧНОГО АРМИРОВАНИЯ  
МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ****д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ; И.И. ПЕРЕДКОВ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Представлена разработанная авторами усовершенствованная система поперечного армирования, основанная на применении пространственного арматурного каркаса. Такая форма изделия позволяет сократить временные затраты на монтаж и повысить точность позиционирования поперечной арматуры в конструкции. Предлагаемый пространственный каркас получают путем объединения отдельных гнутых деталей в единое изделие при помощи вязальной проволоки, что позволяет исключить сварные соединения. Гнутую деталь получают из стержневой арматуры, которая является широко распространенным материалом и имеет относительно невысокую стоимость. Форма гнутой детали обеспечивает сокращение расхода материала и надежную работу узла при действии расчетных нагрузок. Проанализирована возможность изготовления гнутых деталей усовершенствованной системы поперечного армирования с использованием наиболее распространенных гибочных станков.*

**Ключевые слова:** плита перекрытия монолитная, поперечное армирование, арматура стержневая, вязанный пространственный арматурный каркас, гнутые детали, гибочные станки.

**Введение.** Применяемые в настоящее время изделия поперечного армирования обладают рядом недостатков, связанных с часто встречающимися дефектами сварных соединений, высокой материалоемкостью изделий, трудоемкостью и низкой точностью монтажа. Наилучшие по совокупности показателей изделия имеют высокую стоимость, для их изготовления требуется дорогостоящее специальное оборудование. Предлагаемая разработка направлена на снижение стоимости, сокращение сроков строительства и улучшение показателей качества продукции строительного комплекса. Она относится к возведению зданий с монолитным каркасом или других видов железобетонных конструкций, в которых согласно требованиям проекта необходимо выполнить установку поперечного армирования.

Строительство зданий с монолитным каркасом – одно из наиболее востребованных направлений деятельности строительной отрасли, так как данная технология позволяет получить продукцию высокого качества при наличии современных средств проектирования и производства работ. Совершенствование технологии строительства таких зданий является важнейшей научно-технической задачей.

Узел сопряжения монолитного перекрытия с колонной (торцом или углом диафрагмы жесткости) требует особого внимания при расчете и конструировании. При необеспечении его прочности происходит хрупкое разрушение бетона с высокой вероятностью дальнейшего прогрессирующего обрушения. Повреждение участка перекрытия над опорой в результате местного среза (продавливания) не сопровождается постепенным образованием трещин с ростом ширины их раскрытия и нарастанием прогиба плиты, а происходит в достаточно коротком промежутке времени. При этом вследствие перераспределения увеличиваются срезающие усилия на соседних опорах.

Таким образом, необеспечение прочности при продавливании на единственной опоре способно повлечь за собой обрушение всего диска перекрытия. Примером такой ситуации может служить обрушение конструкций чаши плавательного бассейна в г. Краснодаре 31 июля 2013 года, где при проведении гидравлических испытаний произошло продавливание днища чаши бассейна и ее последующее обрушение. Кроме того, была частично разрушена одна из стен здания. В итоге бассейн пришел в негодность, а здание спортивного комплекса было повреждено, что привело к невозможности сдачи объекта к установленному сроку.

Цель исследования – поиск конструктивного решения поперечного армирования, обладающего такими свойствами, как:

- высокая надежность узла, соответствие его конструктивного решения действующим ТНПА;
- минимально возможный расход металла;
- минимальные трудозатраты на изготовление деталей;
- минимальное время монтажа готового изделия;
- отказ от выполнения сварных соединений, дефекты которых оказывают негативное влияние на работу элемента армирования;
- снижение количества сварных соединений, выполняемых с целью формирования пространственного каркаса, качество которых не влияет на прочность конструкции;
- снижение энергетических затрат за счет отказа от выполнения сварных соединений или уменьшения их количества;
- использование местных производственных мощностей, возможность производства изделий в условиях завода и арматурного цеха непосредственно на строительной площадке.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие конструктивные решения, определить их достоинства и недостатки и определить степень соответствия перечисленным выше свойствам;
- разработать изделия поперечного армирования из широко применяемых материалов с минимальной стоимостью, определить оптимальную форму изделия, позволяющую наиболее эффективно использовать прочностные свойства материала при минимальном его количестве;
- выполнить поиск конструктивного решения, позволяющего выполнить изготовление деталей несколькими различными способами, с использованием нескольких различных видов оборудования как из отгружаемого заводом-изготовителем материала, так и из отходов (обрезков), получаемых на строительной площадке;
- рассмотреть возможность армирования узла укрупненными элементами (пространственными каркасами) с целью сокращения времени монтажа;
- определить конструктивное решение детали, обеспечивающее ее работу согласно требованиям ТНПА Республики Беларусь при отсутствии сварных соединений, дефекты которых способны снизить прочность детали;
- определить наиболее эффективный способ производства изделий, размер готового изделия и заготовки с учетом удобства выполнения технологических операций по его изготовлению как в построечных условиях, так и в условиях заводского цеха.

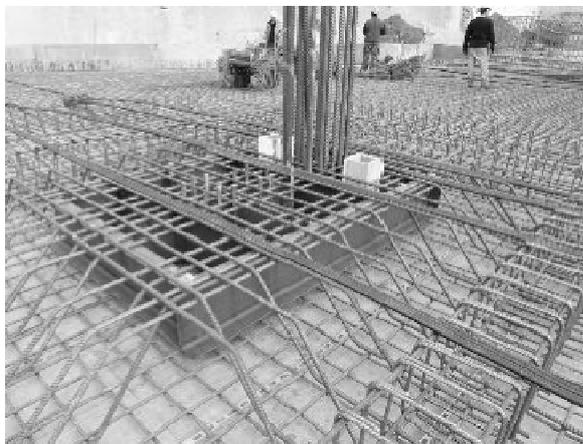
**Применяемые конструктивные решения узла сопряжения монолитной плиты перекрытия с колонной (торцом или углом диафрагмы жесткости).** Устройство капителей и подколонников, позволяющее в ряде случаев отказаться от установки поперечного армирования, а также переход к балочной конструктивной схеме плиты перекрытия увеличивает общую толщину конструкции, что зачастую нежелательно с точки зрения эффективности использования внутреннего объема здания, размещения инженерных коммуникаций и стоимости. Увеличение поперечного сечения колонн и утолщение плит повышает стоимость и увеличивает сроки строительства не только за счет большего расхода бетона, но также из-за более высокого собственного веса каркаса и возрастающих нагрузок на конструкции фундамента. Зависимости рекомендуемых размеров сечений элементов монолитного каркаса от величины пролета и действующей нагрузки приведены в ряде литературных источников [1] и могут быть использованы для сравнения различных вариантов конструктивного решения каркаса на начальном этапе проектирования.

Применяемые в настоящее время конструктивные решения предполагают использование в качестве поперечной арматуры плит различных сварных каркасов и изделий, изготовление и монтаж которых достаточно трудоемки. Поперечное армирование плит предполагает наличие рабочих стержней, располагаемых наклонно или вертикально в приопорных зонах, и устройств, служащих для их анкеровки. К таким устройствам могут относиться как сформированные непосредственно на подвергнутом нагреву стержне утолщения, так и привариваемые к поперечным стержням элементы в виде пластин, полос либо стержней. В первом случае для формирования высаженной головки на конце стержня необходимо специальное оборудование, которое отличается высокой стоимостью при узкой специализации и доступно лишь крупным предприятиям отрасли. Установка такого оборудования на строительной площадке не всегда возможна и целесообразна. Примером такого решения может служить система поперечного армирования Peikko PSB Reinforcement System. С учетом того, что удельный вес поперечного армирования в общем объеме арматуры на плиту относительно невелик (до 15...17%), целесообразность покупки узкоспециализированного дорогостоящего станка выглядит сомнительной тратой.

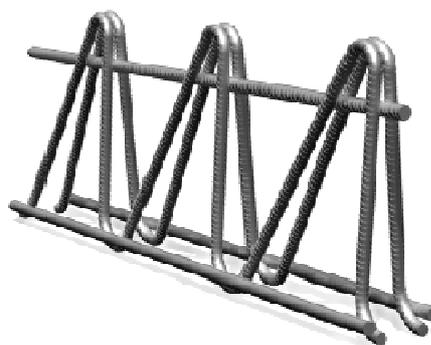
Также известны конструктивные решения, предполагающие использование в качестве поперечной арматуры плиты стальной полосы. Примером такого решения могут служить изделия Lenton Steel Fortress Punching Shear Reinforcement System. Недостатком такого решения является применение в качестве исходного материала полосы с перфорациями, являющимися концентраторами напряжений в растянутом элементе в случае некачественной обработки кромок отверстия. Кроме того, стоимость такого изделия повышается относительно аналогичного, изготовленного из арматуры периодического профиля. Также недостатком подобной системы выступает затрудненный монтаж при большом количестве стержней продольной арматуры в растянутой зоне плиты над опорой. Анкеровка нижних петель элементов армирования недостаточна ввиду отсутствия их непосредственного закрепления к стержням арматуры сжатой зоны у опоры.

Готовые изделия (рисунок 1) имеют высокую стоимость, поэтому проектировщики и производители работ применяют аналог в виде стержней с приваренными на концах квадратными пластинами либо полосами. Приварка стержня поперечной арматуры для обеспечения высокой прочности стыка должна выполняться в раззенкованные отверстия полос и пластин, но зачастую такая схема крепления упрощается без ведома проектировщика до приварки встык, что негативно сказывается на фактической прочности изделия.

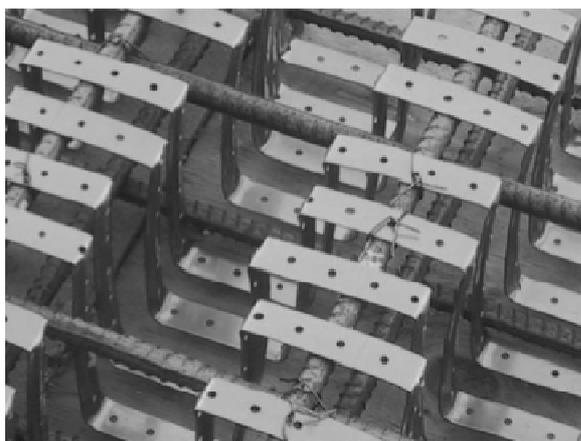
Применяют также плоские арматурные каркасы, в которых для анкеровки используют поперечно приваренный стержень большего диаметра. Данные решения достаточно экономичны и просты в изготовлении в сравнении с изделиями типа Peikko, Lenton или Halfen, однако фактическое качество сварных соединений зачастую можно охарактеризовать как крайне низкое, что не позволяет говорить о работе стержня поперечного армирования с его расчетным сопротивлением.



a



b



c



d

**Peikko CUBO column cap (a) – сварное изделие из пластин и швеллеров;**  
**Lenton Steel Fortress (c) – гнутые пластины с перфорациями;**  
**Halfen Filigran FDB II (d) – пространственный каркас на основе гнутых стержней;**  
**Peikko PSB (z) – изделия с высаженными головками**

**Рисунок 1. – Поперечное армирование, готовые изделия заводского изготовления**

Исследования эффективных способов армирования монолитных железобетонных дисков перекрытий в зоне опирания на колонны выполняются сотрудниками кафедры «Железобетонные конструкции» БНТУ, что отмечено рядом публикаций [2–4].

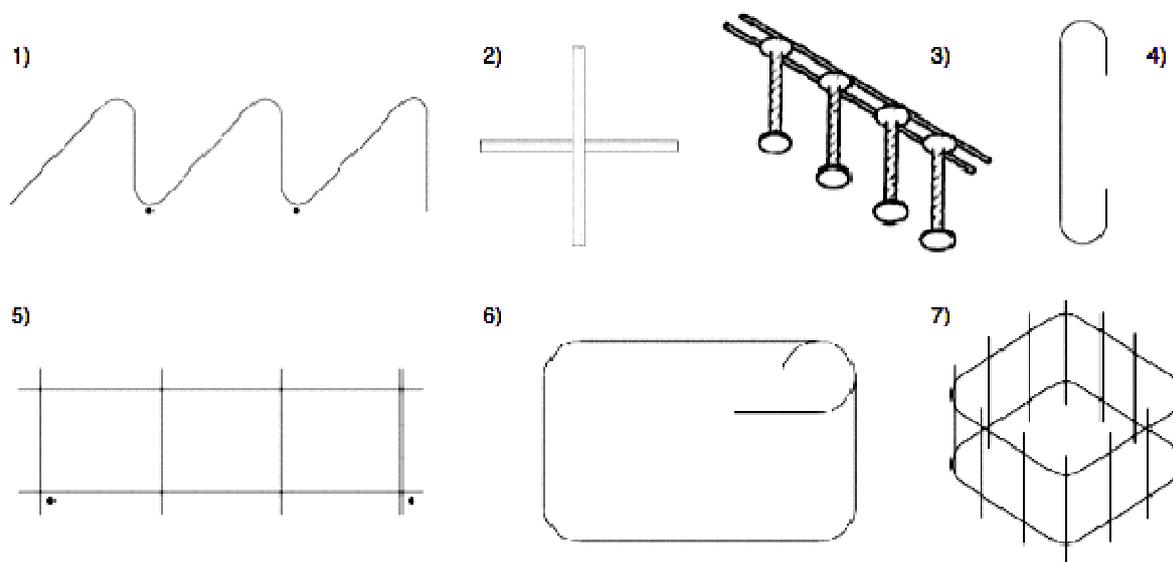
Разработана классификация систем поперечного армирования по следующим признакам [4]:

- согласно применяемым материалам – с применением жесткой арматуры и без нее;
- согласно схеме армирования – направленные и ненаправленные;
- по схеме расположения дополнительной поперечной арматуры – с дополнительным поперечным армированием в радиальном направлении и дополнительным балочным армированием.

Выделены следующие основные виды систем:

- элементы с жесткой арматурой в виде прокатных профилей;
- единичные или сгруппированные вертикальные стержни;
- хомуты;
- плоские каркасы;
- пространственные каркасы.

Авторами [4] выполнен расчет и сравнение семи вариантов поперечного армирования, среди которых (рисунок 2): гнутые стержни – змейки; жесткая арматура – швеллеры; стержни с высаженными головками; отдельные стержни; хомуты; плоские каркасы; пространственные каркасы.



1 – гнутые стержни-змейки; 2 – жесткая арматура – швеллера;  
3 – стержни с высаженными головками; 4 – отдельные стержни;  
5 – хомуты; 6 – плоские каркасы; 7 – пространственные каркасы

Рисунок 2. – Виды поперечного армирования в сравнении [4]

На основании выполненного сравнения сформулированы следующие *выводы*:

- самыми экономичными вариантами армирования оказались стержни с высаженными головками, гнутые стержни – «змейки», плоские каркасы и пространственные каркасы;
- самым неэкономичным вариантом оказался вариант армирования жесткой арматурой и хомутами;
- сравнивались различные варианты армирования узлов лишь по расходу поперечной арматуры, без учета продольного армирования, что в случае с применением жесткой арматуры существенно увеличило бы расход металла;
- в стоимость строительства входит не только стоимость металла, а также стоимость производства изделия и их монтажа. Исходя из этой позиции, стержни с высаженными головками менее экономичны, а установка отдельных стержней и хомутов усложняет монтаж, что ведет к существенному удорожанию стыка;
- самым экономичным вариантом, с учетом всех аспектов, является вариант армирования гнутыми стержнями – «змейками».

Независимо от авторов приведенных выше публикаций, аналогичные выводы были сделаны авторами данной работы в декабре 2014 года в процессе поиска более совершенного способа поперечного армирования плит перекрытия группы многоквартирных домов.

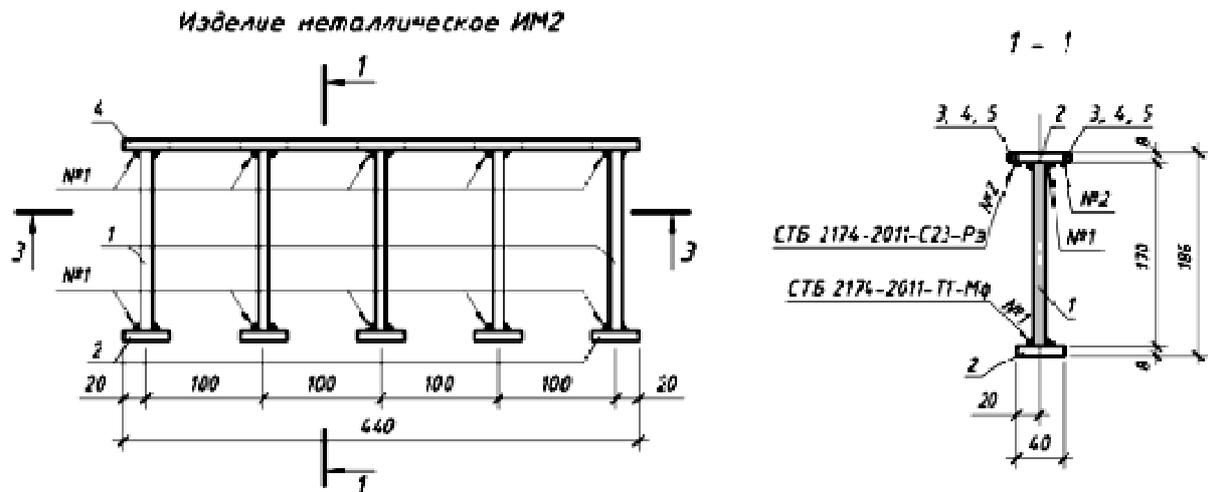
Опыт авторского надзора за строительством позволил выявить недостатки:

- высокий процент брака (рисунок 3) широко применяемых сварных изделий (каркасы и другие детали);
- кроме того, распространенной проблемой оказалась сложность правильного позиционирования поперечной арматуры при густом верхнем армировании;
- плоские же сварные каркасы зачастую не были установлены вертикально.

Указанные недостатки были отмечены в журналах авторского надзора вместе с предложениями по их устранению.

Существовавший опыт применения гнутых изделий («змеек», [4]) на ряде объектов в городе Минске показал высокую сложность вязки армирования, так как анкеровка вертикальных стержней «змеек» выполнялась путем зацепления их за нижнее и верхнее продольное армирование. В данном случае особенно важно выполнить установку элементов армирования плиты в правильной последовательности. При нарушении данной последовательности монтаж поперечной арматуры значительно усложняется.

Таким образом, с учетом всех перечисленных факторов авторами данной работы была предложена усовершенствованная система поперечного армирования, описанная далее.



1 – вид изделия согласно проекту (вверху);  
2 – дефекты сварных соединений (внизу)

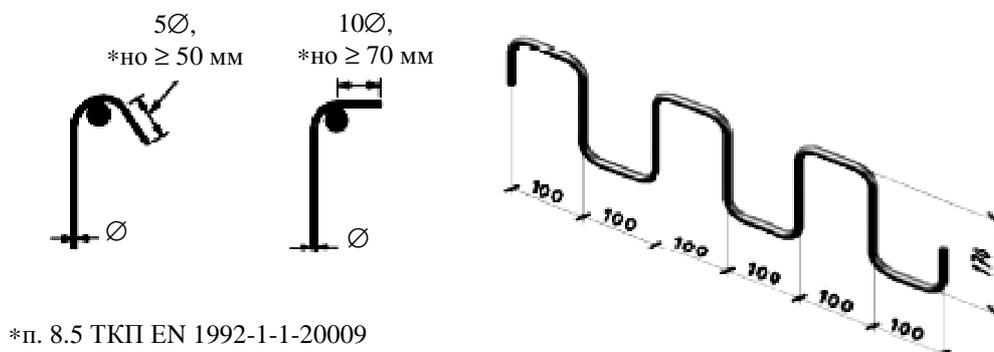
Рисунок 3. – Дефекты сварных соединений в изделиях

**Выбор материала и формы плоского изделия усовершенствованной системы поперечного армирования.** Анализ существующих решений показал, что оптимальным материалом для поперечного армирования является стержневая арматура диаметром от 10 до 12 мм, согнутая в плоское либо пространственное изделие. Данный материал широко распространен, в качестве заготовок для гнутья могут использоваться, в том числе, обрезки мерной арматуры, которые образуются на строительной площадке в значительном количестве.

Форма сгиба должна отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать позиционирование вертикальных стержней поперечного армирования в соответствии с проектом;
- обеспечивать возможность надежной анкеровки поперечного армирования;
- учитывать то, что сгиб стержней должен выполняться не под прямым углом с минимальной кривизной изгиба, а вокруг цилиндрической оправки гибочного станка;
- обеспечивать возможность изготовления деталей на различных станках (ручных типа СГА из отдельных стержней, автоматических с ЧПУ из стержней и арматуры в бухтах);
- быть оптимальной по расходу материала;
- быть универсальной и позволять изготавливать детали различных типоразмеров без коренного изменения формы деталей или заготовок;
- способствовать технологичности монтажа.

Авторами выполнен анализ различных форм сгиба для плоского изделия, в том числе рассмотрена форма, предложенная в [4]. Оптимальной на данном этапе исследований оказалась форма сгиба, показанная на рисунке 4. Критериями оценки качества той или иной формы явились: расход материала; технологичность процесса производства; возможность соблюдения требований ТНПА в области изготовления арматурных изделий; соответствие изложенным в ТНПА положениям по расчету и конструированию поперечного армирования.



**Рисунок 4. – Форма плоского гнутого изделия и некоторые требования к анкеровке**

В первом приближении предполагалось выполнить анкеровку петель плоских изделий путем зацепления за дополнительные анкерующие стержни снизу и навеску на продольную верхнюю арматуру плиты. Для реализации такого решения разработан комплект документации на поперечное армирование плиты перекрытия многоквартирного жилого дома с детальной проработкой узлов (рисунки 5, 6). Выполнено сравнение расхода металла на поперечное армирование плиты типового этажа для данного варианта. В качестве конкурирующего решения рассматривались сварные изделия с приваренными квадратными пластинами (так называемые «самодельные дехи»). Вариант армирования гнутыми изделиями оказался экономичнее по расходу материала на 18%.

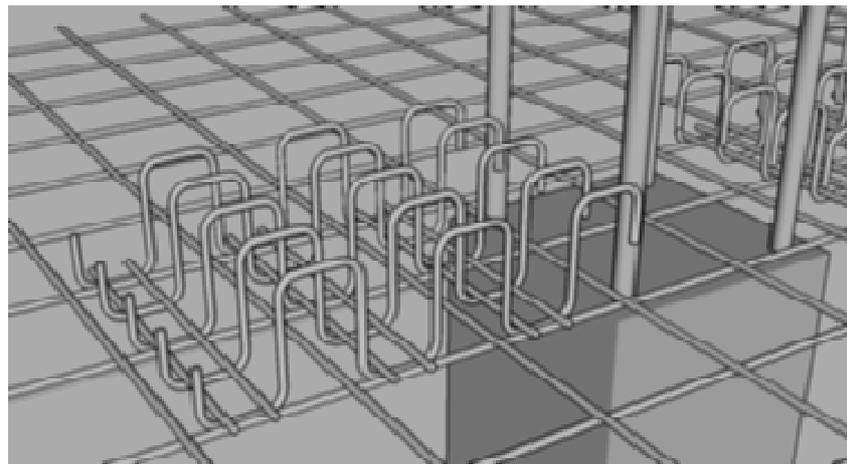
Опыт армирования плиты типового этажа гнутыми изделиями показал их экономичность. Предложено объединить ряд плоских изделий в пространственный каркас, перевязав их с нижними анкерующими стержнями или приварив дополнительные поперечные стержни на концах крайних крюков, если вязаный каркас не будет иметь достаточную прочность и жесткость.

Для того чтобы определить фактическую прочность вязаного пространственного каркаса, необходимость приварки каких-либо стержней или принятия каких-либо иных мер для подачи изделия к месту монтажа без повреждений, в состоянии, соответствующем всем требованиям, были изготовлены образцы изделий. Далее с учетом опыта изготовления образцов и в целях облегчения монтажа была скорректирована их форма, выявлены типичные ошибки при производстве гнутых деталей и намечены дальнейшие шаги по совершенствованию системы поперечного армирования.

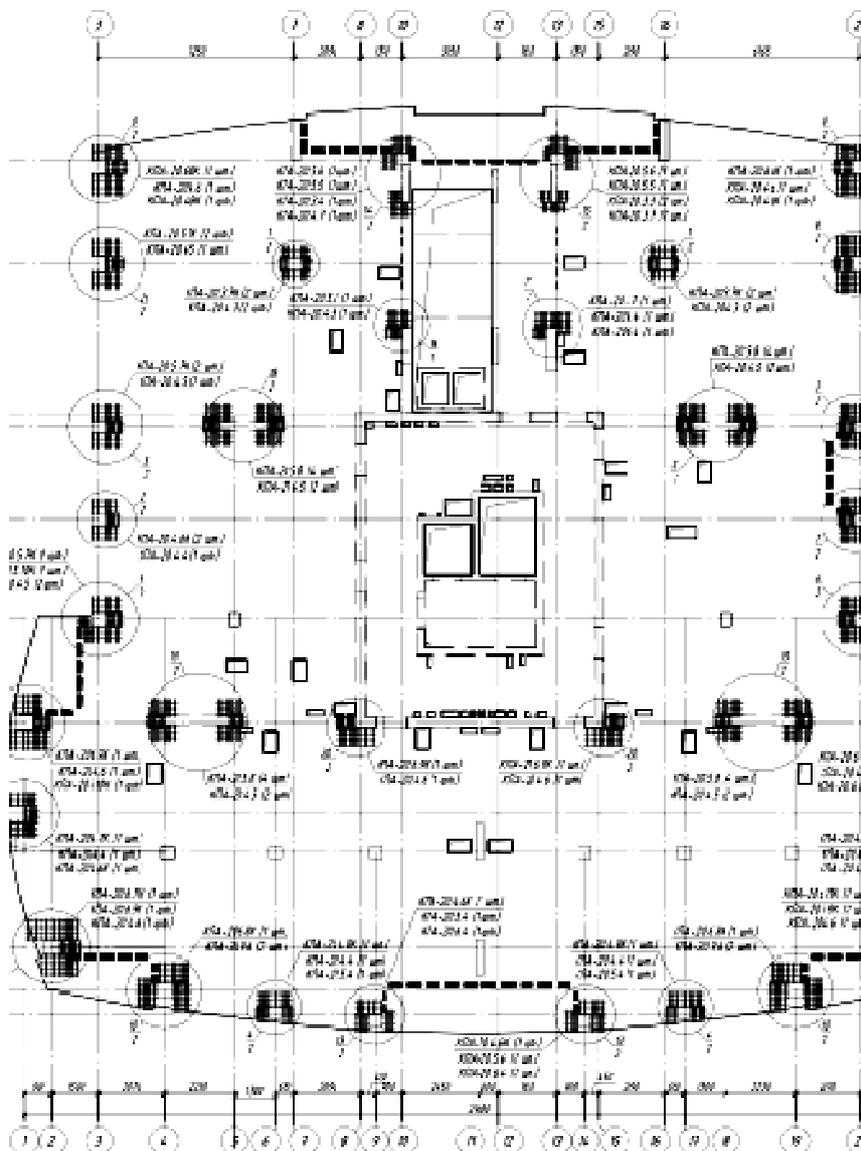
**Разработка формы пространственного каркаса.** Для сокращения сроков монтажа и более точного позиционирования поперечной арматуры целесообразно объединить гнутые изделия в пространственный каркас. Предполагается изготовление пространственных каркасов в заводских условиях либо в арматурном цехе строительной площадки путем вязки из отдельных деталей. Далее выполняется подача изделий к месту монтажа. Во время всех манипуляций с пространственными каркасами должна быть обеспечена их достаточная прочность и жесткость, при этом желателен отказ от сварки или максимальное возможное сокращение ее количества.

На начальном этапе разработки системы предполагалось выполнить анкеровку поперечной арматуры каркаса путем установки анкерующих стержней в нижней части и навески на верхнюю продольную арматуру (см. рисунок 6). Данный способ оптимален с точки зрения расхода материала, количества конструктивно устанавливаемых стержней, однако при такой форме каркаса необходимо строго соблюдать очередность монтажа арматуры плиты. В случае если все плоские изделия сориентированы в одном направлении (как показано на схеме, представленной на рисунке 5), очередность монтажа будет следующей:

- нижняя арматура обоих направлений;
- лягушки и маячные стержни;
- верхняя арматура первого направления основная;
- пространственные каркасы поперечного армирования;
- верхняя дополнительная арматура первого направления;
- верхняя арматура второго направления;
- прочие детали.



*a*



*б*

Рисунок 5. – Принципиальный вид пространственного каркаса поперечного армирования (*a*) и схема расстановки каркасов плиты типового этажа жилого многоквартирного дома (*б*)

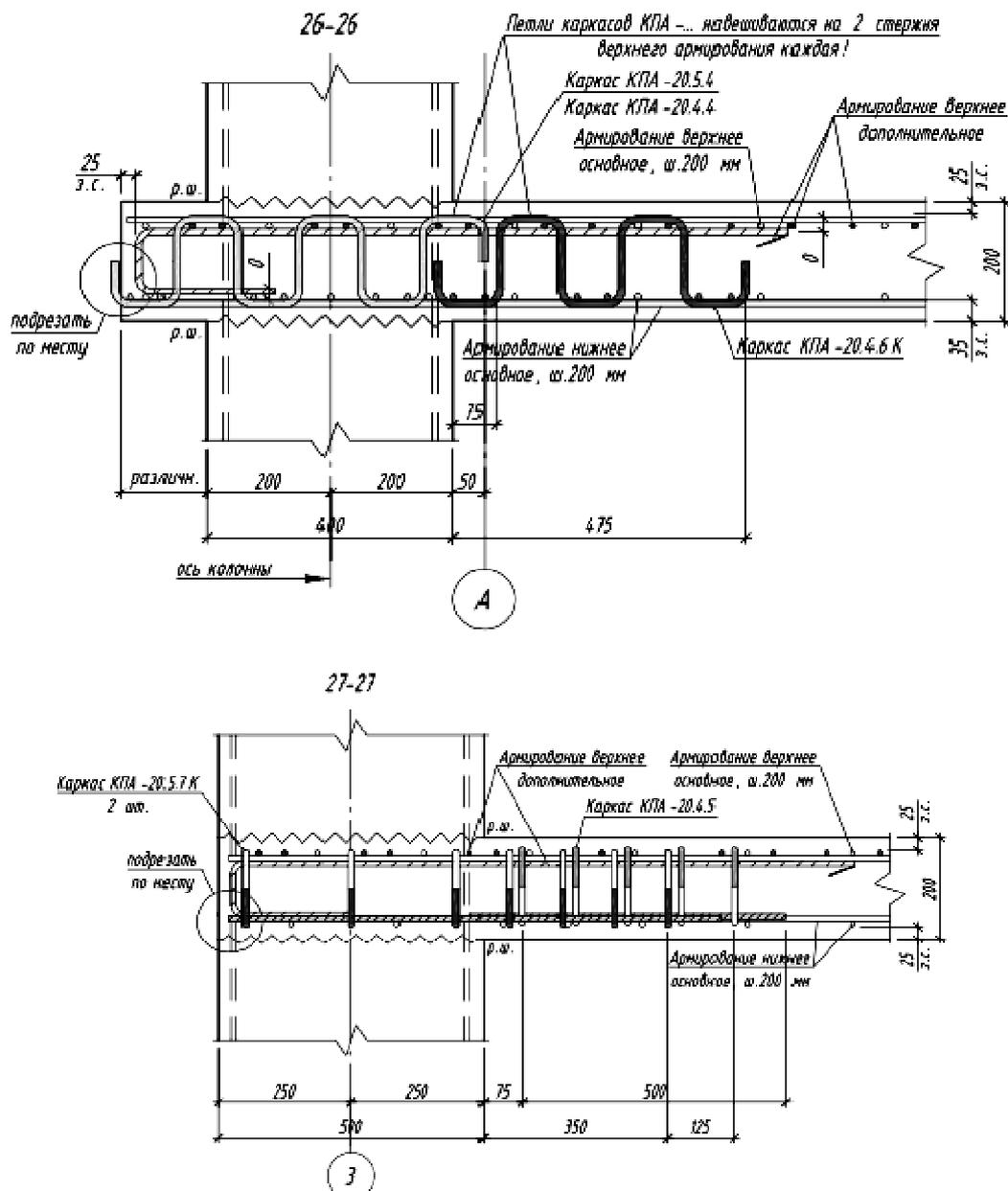


Рисунок 6. – Узел поперечного армирования плиты перекрытия типового этажа

В случае если пространственные каркасы ориентированы в обоих направлениях, очередность монтажа дополнительно усложняется, возникает необходимость пропускать часть верхней арматуры внутрь петель каркаса поперечного армирования. Следует заметить, что данные операции вполне выполнимы в построечных условиях, но требуют от производителя работ точного соблюдения очередности монтажа. С высокой долей вероятности можно прогнозировать возникновение ошибок монтажа на первых плитах, которые способны сформировать ложное негативное мнение о предлагаемой системе поперечного армирования.

Ввиду общей высокой экономичности системы и того, что добавление нескольких анкерующих арматурных стержней лишь незначительно увеличивает расход стали, принято решение отказаться от анкерки зацеплением за продольную арматуру.

Данное изменение в конструкции каркаса позволило:

- выполнять монтаж пространственных каркасов между операциями по установке нижнего и верхнего продольного армирования, не разбивая при этом установку верхней продольной арматуры на дополнительные этапы;
- свободно раскладывать верхнее армирование без необходимости пропуска стержней в петли каркасов;

- ориентировать каркасы в одном или двух направлениях по желанию проектировщика без усложнения монтажа;
- при нечетном количестве периметров каркас симметричен, при регламентированном положении критических периметров в плане его можно перевернуть по месту для увязки с другими деталями;
- наличие верхних и нижних анкерующих стержней, подвязываемых на стадии изготовления каркаса, повышают его прочность и жесткость и обеспечивают его надежность при транспортировании;
- при изготовлении деталей рабочими арматурного цеха предложено получить исходное изделие изгибом в 2 плоскостях (рисунок 7), что привело к еще большему упрочнению и увеличению жесткости пространственного каркаса, повышению его устойчивости в проектном положении и полному отказу от сварки при равнозначных трудозатратах на изготовление.

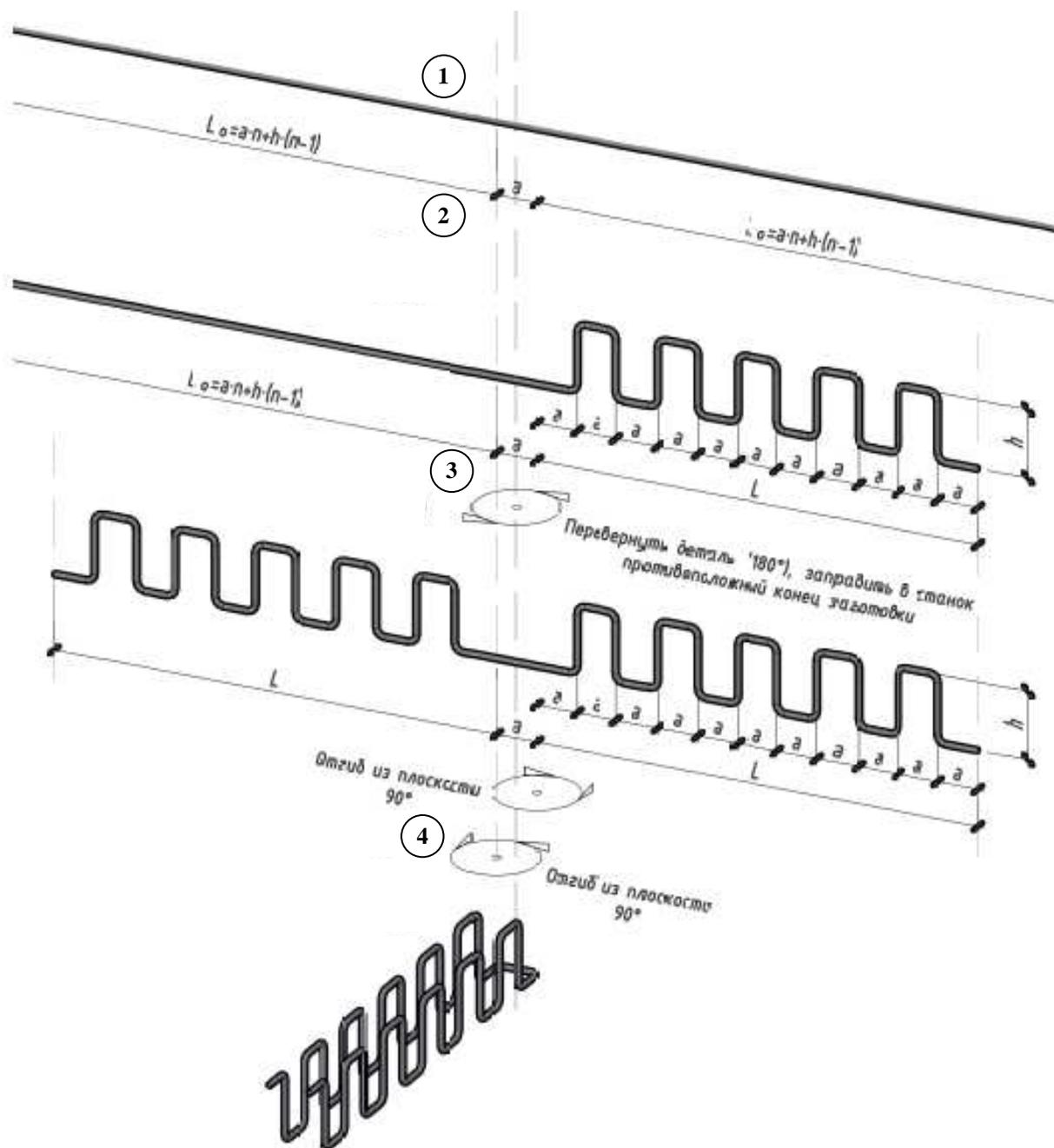


Рисунок 7. – Последовательность изготовления исходного гнутого изделия

Таким образом, исходное изделие приобрело вид, как показано на рисунке 7, расположение каркаса (рисунок 8) относительно прочих элементов армирования – между верхней и нижней вязаными сетками (рисунок 9).

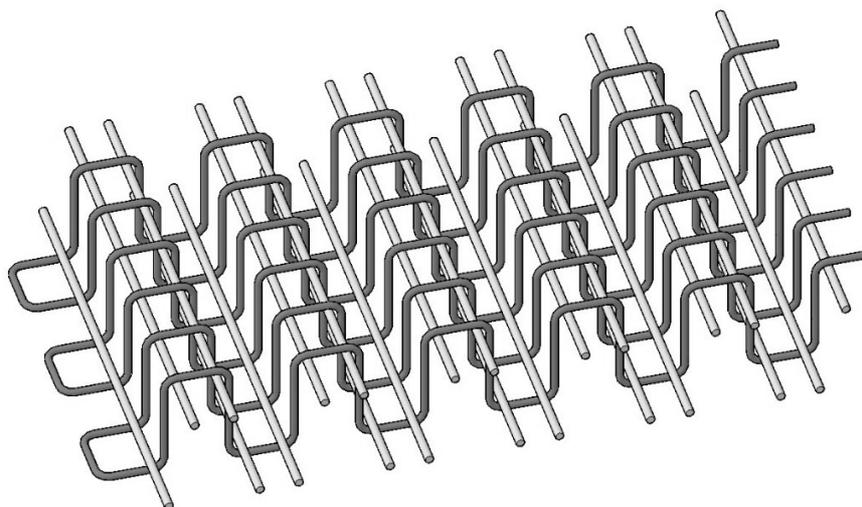


Рисунок 8. – Общий вид вязаного пространственного каркаса

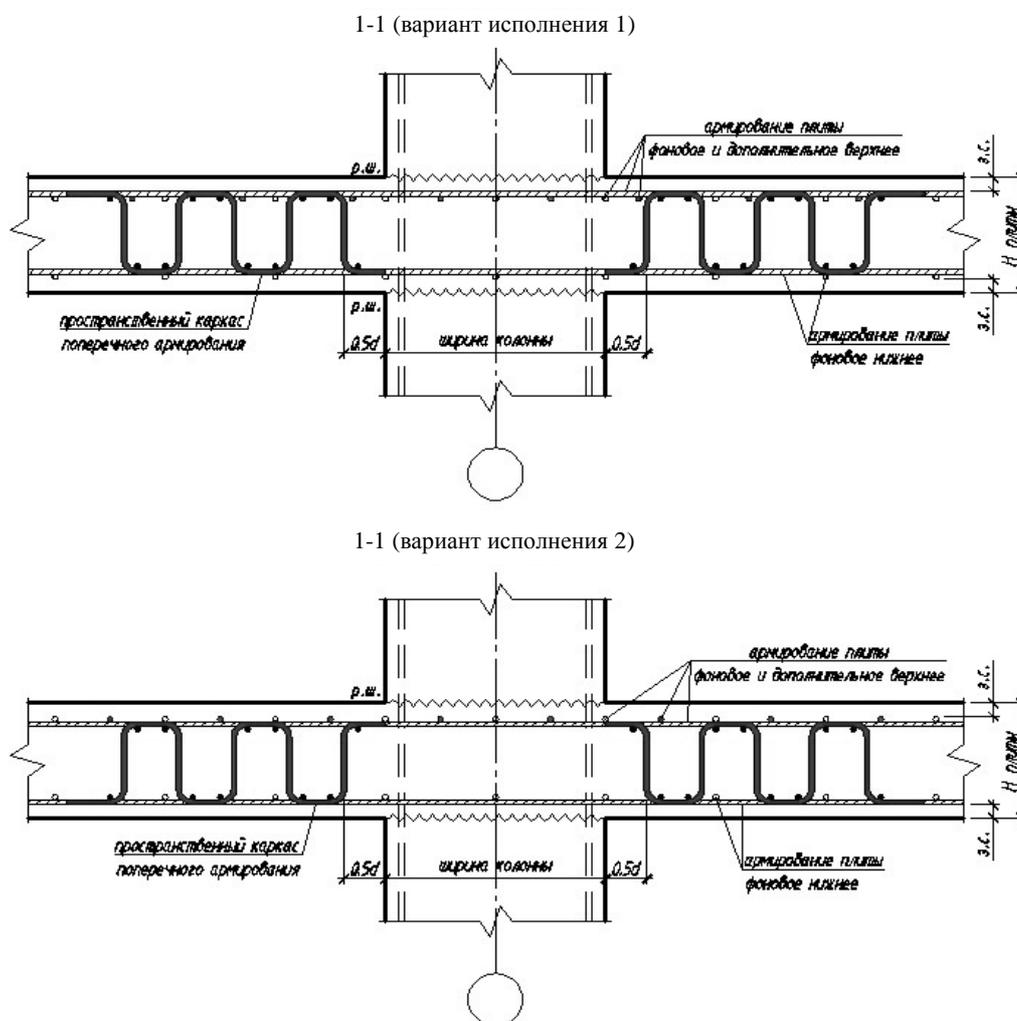


Рисунок 9. – Каркасы поперечного армирования в зоне сопряжения плиты и колонны

Для унификации типоразмеров гнутых изделий и наиболее удобного монтажа рекомендуется принять расположение сеток плиты по рисунку 9. Такое решение позволяет также унифицировать детали обрамления и гнутые стержни (П-образные и Г-образные), что значительно упрощает конструирование, производство деталей и монтаж.

Как было сказано выше, при нечетном количестве периметров поперечной арматуры пространственный каркас симметричен, поэтому рекомендуется в процессе проектирования округлять количество периметров поперечного армирования в большую сторону, до ближайшего нечетного. Увеличение расхода стали на поперечное армирование можно нивелировать сокращением количества верхней продольной арматуры, если она устанавливается для обеспечения прочности при местном срезе.

#### **Изготовление гнутых изделий**

Для обеспечения проектной прочности поперечной арматуры необходимо соблюдать следующие требования к ее изготовлению:

- гибка арматуры должна выполняться вокруг цилиндрических оправок радиусов, указанных в проектной документации, сгиб арматуры без радиуса со смятием и охрупчиванием металла внутри сгиба не допускается;

- не допускается нагрев (отпуск) арматурного стержня или любое другое воздействие, изменяющее его физико-механические свойства;

- процесс производства гнутых арматурных изделий должен отвечать требованиям действующих ТНПА.

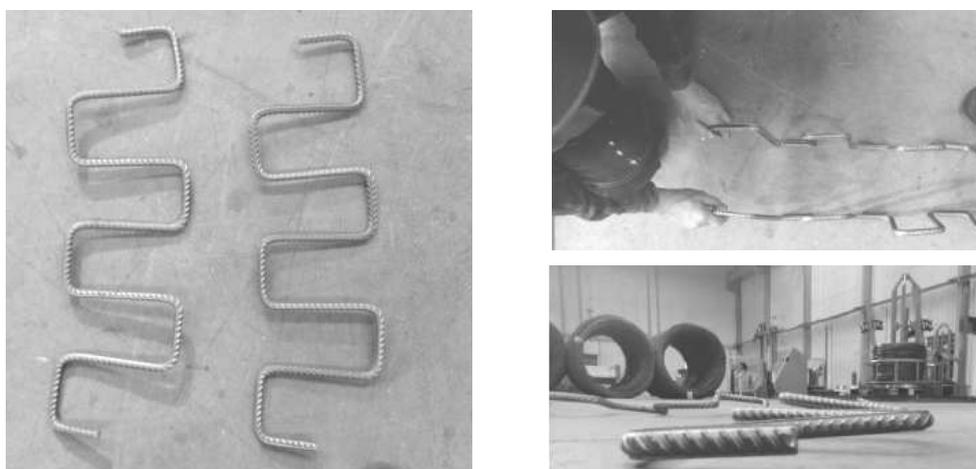
Последовательность операций по сгибу заготовки на ручном станке типа СГА показана на рисунке 7. Для точного соблюдения геометрии целесообразно выполнить разметку на рабочей плоскости, непосредственно на стержне или изготовить специальный шаблон.

Наиболее технологичным видится производство плоских заготовок для деталей на гибочных станках с блоком ЧПУ в заводских условиях и импортом параметров заготовки из ВМ-модели. Изгиб во второй плоскости выполняется на станке типа СГА. Такой способ производства деталей обладает всеми преимуществами поточного способа организации производства: имеет высокую степень автоматизации, повышается производительность труда и качество изделий, сокращаются трудозатраты, повышаются темпы строительства. Пригодное для такого способа производства оборудование установлено на ряде заводоизготовителей железобетонных конструкций и изделий в Беларуси, подвернутых модернизации.

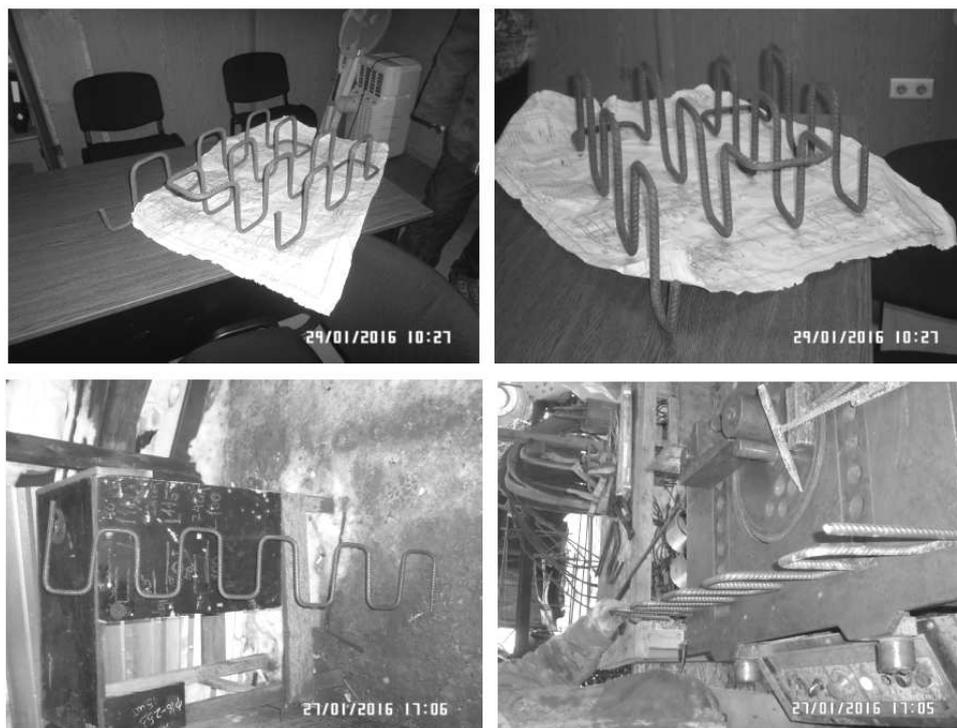
Следует отметить, что станки типа Pedax, Stema, Schnell, Мер и другие пригодны для производства большинства гнутых арматурных изделий (П- и Г-образные стержни, шпильки, хомуты и т.д.), имеют высокую производительность и стоимость. При небольших объемах строительства данное оборудование избыточно по своим характеристикам и неоправданно дорого.

Точность геометрии гнутых изделий при производстве на станках типа СГА зависит в первую очередь от квалификации рабочего персонала. Так, при производстве образцов деталей значительный процент изделий, изготовленных различными организациями, имел недопустимые дефекты геометрии, которые не позволили бы установить такую деталь по месту (рисунок 10). В то же время уровень мастерства отдельных рабочих оказался достаточным для производства деталей и более сложных форм (рисунок 11). Даже с учетом отладки процесса, подготовки рабочими вспомогательных приспособлений типа шаблонов можно говорить о том, что лишь немногие производители способны получить изделия надлежащего качества на стандартном оборудовании.

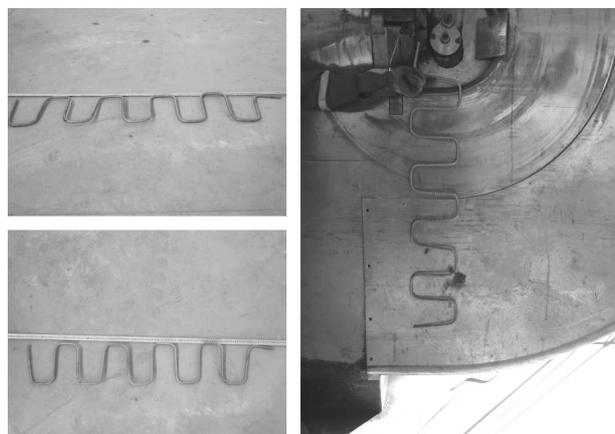
Изделия, полученные на станке Pedax Twinmaster (рисунок 12), имели некоторые отклонения от проектных геометрических размеров. Данные дефекты обусловлены колебаниями выходящей из станка детали. Для их устранения необходимо опытным путем определить оптимальную скорость подачи стержня, выполнить отладку процесса гибки.



**Рисунок 10. – Гнутые изделия с дефектами геометрии, полученные на станке типа СГА**



**Рисунок 11. – Плоские и пространственные гнутые изделия с допустимыми отклонениями от геометрических размеров, полученные на станке типа СГА**



**Рисунок 12. – Гнутые изделия с дефектами геометрии, полученные на станке Pedax Twinmaster (данные отклонения могут быть устранены путем точной настройки станка)**

При всех достоинствах предложенной системы (высокая надежность, экономичность, отсутствие сварных соединений, простота монтажа) производство деталей на практике оказывается достаточно сложной задачей. Учитывая, что качество гнутых элементов зачастую не соответствует предъявляемым требованиям, необходимо разработать комплексное решение, позволяющее повысить качество как производимых изделий в данный момент, так и производимых в будущем. Используя технологию точной обработки арматурного стержня, возможно производство различных закладных изделий, в том числе для устройства деформационных швов, узлов сопряжения в монолитных конструкциях при опережающем бетонировании и т.д.

На современном этапе наиболее рациональными решениями проблемы повышения качества гнутых арматурных изделий являются:

- централизованное производство арматурных изделий на предприятиях, оснащенных современным оборудованием, удовлетворяющим техническим условиям производства;
- разработка отечественного оборудования, имеющего невысокую относительно зарубежных аналогов стоимость и производительность, оптимальную для использования его при небольших объемах строительства.

**Заключение.**

Разработанная авторами усовершенствованная система поперечного армирования обладает следующими свойствами:

- высокой надежностью узла сопряжения монолитной плиты с колонной (торцом или углом диафрагмы), что обеспечивается конструкцией деталей и отсутствием подверженных дефектам сварных соединений;
- уменьшенным относительно применяемых в настоящее время решений расходом стали, что подтверждено сравнительным расчетом;
- снижением трудозатрат на изготовление деталей за счет отсутствия сварки и возможности применения универсального высокопроизводительного оборудования;
- сниженным временем монтажа деталей, что достигается применением объемных каркасов;
- снижением энергетических затрат за счет отказа от выполнения сварных соединений;
- использованием местных производственных мощностей, возможностью производства изделий в условиях завода (наиболее целесообразно – на автоматических станках) и арматурного цеха непосредственно на строительной площадке (при высокой квалификации рабочих на станках типа СГА или на другом оборудовании).

Цель дальнейших исследований – *подготовка усовершенствованной системы поперечного армирования к широкому ее применению* – может быть достигнута путем оптимизации процесса производства деталей, поиска и устранения не выявленных на данном этапе исследований недостатков системы, разработки документации для проектирования конструкций с поперечным армированием и производства работ.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Economic concrete frame elements to Eurocode 2 / С.Н. Goodchild [et al]. – МРА : The Concrete Centre, 2009. – 182 p.
2. Пецольд, Т.М. Напряженно-деформированное состояние узла сопряжения монолитных дисков перекрытия с колоннами / Т.М. Пецольд, Е.А. Козловский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф. Т. 2. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 255.
3. Рак, Н.А. Оценка надежности методов расчета железобетонных элементов с поперечной арматурой при продавливании / Н.А. Рак, С.Ю. Тамкович // Строительная наука и техника. – 2011. – № 6. – С. 15–20.
4. Козловский, Е.А. Эффективные способы армирования монолитных железобетонных дисков перекрытий в зоне опирания на колонны / Е.А. Козловский // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства : материалы науч.-метод. конф., Минск, 27–28 мая 2014 г. : в 2 ч. Ч. 1 / редкол.: В.Ф. Зверев, С.М. Коледа, С.Н. Делендик. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 74–79.

*Поступила 11.05.2017*

**THE IMPROVED CROSS-REVERSING SYSTEM  
OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE PLATES**

**S. LEONOVICH, I. PEREDKOV**

*The developed advanced cross-reinforcement system based on the use of a spatial reinforcement skeleton is given. This form of the product allows to reduce time costs for installation and improve the accuracy of positioning the transverse reinforcement in the structure. The proposed spatial frame is obtained by combining individual bent parts into a single product with the help of a knitting wire, which allows to exclude welded joints. The bent part is made from rod reinforcement, which is a widespread material and has a relatively low cost. The shape of the bent part ensures a reduction in material consumption and reliable operation of the unit under the action of design loads. Pro-analyzed the possibility of manufacturing bent parts of an advanced cross-reinforcement system using the most common bending machines.*

**Keywords:** *monolithic slab, transverse reinforcement, reinforcement rod, woven spatial reinforcing cage, the zone mate, bending parts, bending machines.*

УДК 669.7: 624.01

## СНИЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

*чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО;  
канд. техн. наук, доц. О.В. ШУМОВ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск);  
канд. техн. наук А. ХЕЙДАРИ МОНФАРЕД*

*При помощи методов численного моделирования исследуются процессы дуговой сварки стыкового соединения тонколистовых образцов из аустенитной стали. Для определения значений температурного поля свариваемых образцов решено дифференциальное уравнение теплопроводности в частных производных с начальными и граничными условиями. Величины остаточных напряжений в металле при дуговой сварке с различной интенсивностью охлаждения были рассчитаны с использованием модели изотропного упрочнения. Исследовано влияние технологических параметров дуговой сварки на напряжения в металле при изготовлении стыкового соединения. В результате расчетов определены функциональные зависимости напряжения в тонколистовых образцах от ширины зоны действия охлаждающей среды в условиях сварки с охлаждением. Полученные зависимости могут быть использованы для подбора технологических режимов с целью минимизации деформаций при дуговой сварке с принудительным охлаждением тонколистовых заготовок из различных марок стали.*

**Ключевые слова:** дуговая сварка, стыковое соединение, моделирование сварки, аустенитная сталь, принудительное охлаждение, снижение напряжений.

**Введение.** Для изготовления оболочковых конструкций используются листовые заготовки из углеродистых, низколегированных и высоколегированных сталей, медных и алюминиевых сплавов и т.п. При производстве ответственных конструкций широко применяются коррозионно-стойкие высоколегированные стали аустенитного класса. Данные стали имеют хорошую свариваемость и обладают высокими эксплуатационными свойствами, однако низкая теплопроводность и высокие значения температурного расширения обуславливают возникновение значительных напряжений и деформаций при сварке, что может привести к недопустимым искажениям размеров и формы конструкций, снизить их качество и надежность [1; 2]. Увеличение объема производства и расширение области использования оболочковых конструкций из аустенитных сталей предопределяет актуальность разработки эффективных подходов по повышению качества сварки путем повышения точности сварочного производства, например, за счет снижения напряжений и деформаций.

Существующие конструктивные и технологические методы уменьшения напряжения и деформаций при сварке тонколистовых конструкций включают предварительное механическое воздействие, уменьшение теплового потока в металл, управление термическими напряжениями и деформациями за счет сочетания нагрева и охлаждения элементов конструкции и т.п. [3]. Одними из наиболее эффективных методов уменьшения напряжений и деформаций при сварке является принудительное охлаждение высокотемпературной области металла, но данный метод требует применения специальной технологической оснастки и зачастую не обеспечивает снижения напряжений и деформаций до необходимого уровня, так как требует установления большого количества технологических параметров, основанных на эмпирических данных [4; 5].

**Основная часть.** В данной работе предлагается схема сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного соединения и соответствующий расчет некоторых технологических параметров, позволяющих существенно снизить напряжения при дуговой сварке тонколистовых заготовок из аустенитной стали. В процессе исследований были рассчитаны значения температур и определены величины напряжений и деформаций при дуговой сварке встык листовых деталей из стали 12Х18Н9Т толщиной 4 мм как при обычных условиях, так и в условиях сварки с принудительным охлаждением высокотемпературной области сварного шва.

При выборе технологических режимов дуговой сварки для снижения деформаций возможно применить метод термического растяжения металла. При данном методе нагрев свариваемых деталей на определенном расстоянии от дуги ведет к возникновению растягивающих напряжений в области сварного шва и сжимающих напряжений в области нагрева. Таким образом, растягивающие напряжения в области сварки компенсируют сжимающие напряжения впереди и позади сварочной дуги, в результате чего обеспечивается снижение деформаций металла в областях, прилегающих к зоне сварки [6].

Использование численного моделирования при выборе технологических режимов дуговой сварки позволяет применить метод термического растяжения более эффективно. Подбирая некоторые параметры процесса сварки, например, температуру нагрева и ширину области нагрева свариваемого металла,

расстояние от зоны действия охлаждающей среды до зоны сварки, ширину области действия охладителя и т.д., возможно обеспечить значительную компенсацию напряжений и, соответственно, снизить деформации при сварке металла [7; 8].

Для подбора оптимального комплекса технологических параметров выполнен несовместный термомеханический анализ, который проводился в два этапа. На первом этапе определялась тепловая история всех узлов анализируемого пространства на основе моделирования тепловых процессов. На втором этапе рассчитывались напряжения и деформации в процессе упругопластического термического анализа на основе данных о динамике температурного поля. На этом этапе исследований анализировалось напряженно-деформированное состояние, в котором поля напряжений и деформаций ставились в соответствие с температурным полем через тепловую деформацию и зависящие от температуры свойства металла свариваемых деталей.

В процессе сварки в конструкциях возникают остаточные напряжения в результате температурных и пластических деформаций, деформаций ползучести и т.п. Так как при сварке тонколистовых конструкций имеет место быстрое охлаждение, то ползучестью можно пренебречь и не учитывать температурные деформации после охлаждения.

В работе для вычисления деформаций при стыковой сварке тонколистовых материалов была применена модель, использующая принципы изотропного упрочнения. В данной модели двухмерное напряженное состояние материала было представлено в виде равномерного расширения начальной поверхности текучести, которая сохраняет свою форму, но увеличивается в размере пропорционально величине пластической деформации.

Напряжения в металле для упругой области определялись по формуле:

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon^e\} = [D] (\{\epsilon^p\} - \{\alpha\}(T - T_\alpha)),$$

где  $\alpha$  – коэффициент термического расширения,  $C^{-1}$ ;  $T_\alpha$  – исходная температура, °C;  $T$  – текущая температура, °C;  $\epsilon^p$  – пластические деформации;  $\epsilon^e$  – упругие деформации;  $[D]$  – матрица материала, описывающая упругопластическое состояние.

Для малых деформаций приращения напряжений выражались в виде:

$$\{d\sigma\} = [dD]\{\epsilon^e\} + [D](\{d\epsilon\} - \{\alpha\}dT - (T - T_\alpha)\{d\alpha\}),$$

где  $[dD]$  – приращение матрицы материала, соответствующее изменению температуры  $dT$  за время  $dt$ .

Напряжения для пластической области определялись по формуле:

$$\{d\sigma\} = [dD]\{\epsilon^e\} + [D](\{d\epsilon\} - \{\alpha\}dT - (T - T_\alpha)\{d\alpha\} - \{\epsilon^p\}),$$

Для малых деформаций приращения напряжений выражались в виде

$$\{d\sigma\} = [dD]\{\epsilon^e\} + [D](\{d\epsilon\} - \{\alpha\}dT - (T - T_\alpha)\{d\alpha\} - \{d\epsilon^p\}),$$

Для определения приращения напряжений (деформаций) при различных температурах в качестве критерия выбиралось начало текучести в виде функции напряжения и геометрических особенностей деформируемой поверхности:  $F(\sigma_{ij}) = 0$ , где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений,  $F(\sigma_{ij})$  – функция, зависящая от напряжений.

Для напряжений по Мизесу можно записать следующие выражения:

$$F(\sigma_{ij}) = \sigma_e(\sigma_{ij}) - \sigma_s = 1,5 \cdot \{S\}^T [L] \{S\} - \sigma_s = 0,$$

$$\sigma_e = (0,5 \cdot (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2))^{0,5},$$

$$\{S\} = \{\sigma\} - \sigma_h [111000],$$

$$\sigma_h = 3^{-1} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}),$$

где  $\sigma_e$  – напряжение по Мизесу;  $\{S\}$  – девиаторная часть тензора напряжений;  $\sigma_h$  – гидростатическое напряжение;  $\sigma_s$  – предел текучести.

Для изотропного упрочнения материала можно записать:

$$F(\sigma_{ij}, k(\epsilon_{ij}^p, T)) = 0,$$

где  $k(\epsilon_{ij}^p, T)$  – функция пластичности.

С учетом напряжений, по Мизесу, для начала текучести получим:

$$F(\sigma_{ij}, k(\epsilon_{ij}^p, T)) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_f(\epsilon_{ij}^p, T) = 1,5 \cdot \{S\}^T [L] \{S\} - \sigma_f(\epsilon_{ij}^p, T) = 0,$$

где  $\sigma_f(\epsilon_{ij}^p, T)$  – размер поверхности текучести.

Так как в процессе дуговой сварки происходит релаксация напряжений при температурах, близких к температуре плавления, то при моделировании этот процесс учитывался посредством очистки информации о напряжениях в узлах модели при достижении в них определенной температуры. В противном случае при расчетах модели происходило бы накопление напряжений и деформаций в наиболее нагретых областях конструкции, что противоречит реальной картине. С учетом требуемой точности и для ограничения продолжительности вычислений значение температуры для очистки информации о напряжениях принималось равным 1300 °С.

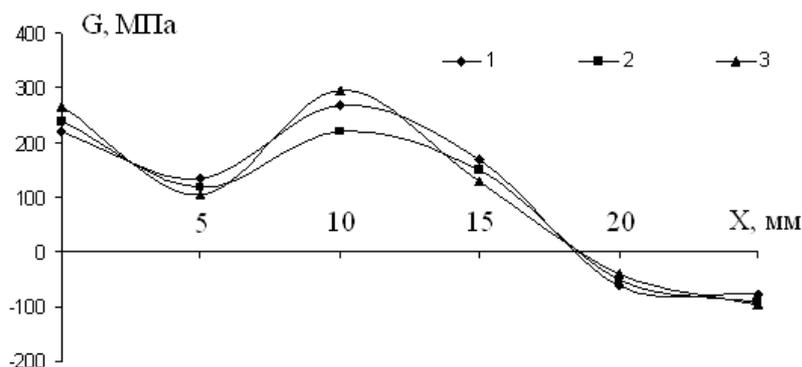
Чтобы учесть непрерывное формирование сварного шва за счет осаждения слоев с различной жесткостью, процесс образования сварного соединения описывался на основании предположения, что охлаждающийся металл остается мягким до конца моделирования в случае, если интенсивность источника тепла была недостаточна для его плавления. Также сварной шов рассматривался сформированным из материала с модулем упругости и модулем текучести, равным 1 МПа. Данное допущение исключает какое-либо значительное влияние сварного шва на жесткость собираемой конструкции.

Таким образом, процесс моделирования сварки включал следующие операции:

- создание сетки конечных элементов в программном комплексе ANSYS с использованием элементов типа 164 [9];
- создание необходимых групп конечных элементов в программе LS-PREPOST, а также задание материала шва, элементов оболочки теплопередачи, траектории сварки;
- идентификация групп конечных элементов и узлов сетки с использованием программы HYPER MESH;
- задание свойств материалов, интенсивности источников тепла и его параметров, проверка механических и термических граничных условий и вычисление параметров модели в программном комплексе SYSWELD [10].

В результате упругопластического термического анализа были определены остаточные напряжения и деформации, возникающие при дуговой сварке встык тонколистовых заготовок из аустенитной стали. Проведенные исследования показали, что в момент времени, равный 20 с, в рассматриваемом сечении металла возникали сжимающие напряжения, что связано с тем, что данное сечение располагалось перед сварочной дугой. По истечении 40 с металл в рассматриваемом сечении обладал достаточной жесткостью в результате охлаждения, и в данной области металла возникали растягивающие напряжения, которые компенсировали остаточные сжимающие напряжения, появившиеся в прилегающих областях металла. На 60-й секунде наблюдений произошло дальнейшее снижение остаточных продольных растягивающих напряжений в зоне сварки и остаточных сжимающих напряжений в прилегающих областях металла, что связано с дальнейшим охлаждением и снятием закрепления деталей.

Значения остаточных напряжений на поверхности исследуемых образцов (в поперечном сечении) в зависимости от расстояния до сварочной дуги для разных величин ширины зоны охлаждения приведены на рисунке.



**Распределение остаточных напряжений (G)  
на поверхности исследуемых образцов в зависимости  
от расстояния (X) до сварочной дуги  
(ширина зоны охлаждения: 1 – 10 мм; 2 – 15 мм; 3 – 20 мм)**

Приведенные данные свидетельствуют о наличии оптимального значения одного из параметров дуговой сварки с охлаждением – ширины зоны охлаждения. Очевидно, что в случае использования данного значения при проектировании технологического процесса и изготовлении конструкции из тонколистовых заготовок, это позволит существенно (до 20%) уменьшить величину остаточных напряжений и, в конечном счете, будет способствовать снижению деформаций сварных изделий, повышению качественных характеристик сварных соединений и надежности конструкции в целом.

В заключение проведенного исследования по снижению напряжений при дуговой сварке можно сделать следующие **выводы**:

- определена рациональная последовательность операций по трехмерному моделированию дуговой сварки стыкового соединения с принудительным охлаждением тонколистовых заготовок из аустенитной стали. Данная последовательность включает создание сетки конечных элементов, формирование групп конечных элементов и их идентификацию, задание технологических параметров дуговой сварки, разработку механизма формирования сварного шва за счет использования метода «мягкого материала», задание начальных и граничных условий сварочного процесса, определение теплофизических свойств свариваемых материалов;

- проведено исследование процесса дуговой сварки при выполнении стыкового соединения с использованием модели изотропного упрочнения. Для этого на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности определено температурное поле, данные о котором были поставлены в соответствие с полями напряжений и деформаций в соединяемых образцах при помощи теплофизических свойств свариваемой стали;

- использование методов численного моделирования позволяет подобрать технологические параметры дуговой сварки, обеспечивающие существенное (до 20%) уменьшение величины остаточных напряжений при выполнении стыкового соединения тонколистовых заготовок из аустенитной стали. Данные результаты могут найти применение для минимизации сварочных напряжений и деформаций при разработке технологических процессов изготовления оборудования, машин и аппаратов химической промышленности, транспортного машиностроения и т.п.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Parmar, K.S. Welding engineering and Technology / K.S. Parmar // Khanna Publishers, 2005. – 270 p.
2. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng // Woodhead Publishers, 2005. – 343 p.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
4. Сагалевич, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевич. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
5. Винокуров, В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций / В.А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
6. Цяо, Г. Бездеформационная сварка с использованием эффектов термического растяжения для соединения материалов малой толщины / Г. Цяо // Автоматическая сварка. – 2006. – № 12. – С. 3–13.
7. Пантелеенко, Ф.И. Снижение поверхностных деформаций путем термической обработки в процессе стыковой сварки / Ф.И. Пантелеенко, А. Хейдари Монфаред // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
8. Куликов, В.П. Технология сварки плавлением / В.П. Куликов. – Минск: Дизайн ПРО, 2001. – 256 с.
9. ANSYS 5.7 Advanced Analysis Techniques Guide. ANSYS Inc, 2003.
10. ESI Group, 2000. SYSTUS 2000 Analysis Reference Manuals – Shelby Township. ML : ESI North America.

Поступила 09.06.2017

#### DECREASING STRESSES IN THE COURSE OF ARC WELDING

*F. PANTELEENKO, A. SHUMAV, A. HEIDARI MONFARED*

*In this work the research of arc welding of butt weld of the sheet specimens by numerical simulation has been accomplished. It has been solved the partial differential equation of heat conduction with the initials and boundary conditions to estimate the temperature field. The stresses value in the course of arc welding in the different intensity of cooling has been calculated by the use of isotropic reinforcement model. The influence of process variables on the stresses of metal in the course of butt welding has been estimated. As a result it has been calculated the stresses of the sheet specimens as the function of width of cooling zone in the course of arc welding. These functions may be used to calculate the process variables of arc welding of the sheet pieces with the force-cooling to minimize the deformation.*

**Keywords:** arc welding, butt weld, welding simulation, austenitic steel, force-cooling, decreasing stresses.

УДК 624.953

**МЕСТНОЕ ВЫПУЧИВАНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
КВАДРАТНЫХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ В ПЛАНЕ С ШАРНИРНЫМ ОПИРНИЕМ  
НА ПРИМЕРЕ МОДУЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОЖАРНЫХ-СПАСАТЕЛЕЙ**

**В.Н. АГАЕВ; канд. физ.-мат. наук Т.М. МАРТЫНЕНКО  
(Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск);  
канд. физ.-мат. наук С.А. ПРОНКЕВИЧ; канд. физ.-мат. наук И.М. МАРТЫНЕНКО  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

*Представлена созданная математическая модель для расчета прямоугольных и квадратных в плане конструкций с неизменяемой геометрией, при комбинированном нагружении, основанная на методе начальных параметров. Полученная зависимость позволяет определить поля напряженно-деформированного состояния при моделировании модульного тренажерного комплекса для подготовки пожарных-спасателей и его механического поведения под воздействием собственного веса. Проведены виртуальные испытания в пакете ANSYS. Показаны опасные площади при оценке деформаций при местном выпучивании в соответствии с минимальным критическим напряжением.*

**Ключевые слова:** оболочечные конструкции, математическая модель, модульный тренажерный комплекс, комбинированное нагружение, критические нагрузки.

Научно-технический прогресс в области создания металлических конструкций связан с поиском новых типов и геометрических форм, совершенствованием уже известных конструкций, определением их оптимальных параметров, совершенствованием методов их расчета. При правильном использовании достижений науки и техники возможно снизить материалоемкость строительных металлических сооружений примерно на 10...20%. В повышении уровня современного строительства важнейшее место отводится внедрению легких металлических элементов. Уменьшение массы приводит к снижению материалоемкости, затрат на изготовление и транспортировку. Становится возможным и предварительная сборка, и блочный монтаж. Дальнейшее совершенствование процессов проектирования, изготовления, комплексной поставки и монтажа легких металлических конструкций промышленных зданий требует сочетания оптимальных показателей массы с минимальной трудоемкостью механизированного поточного изготовления. Стремление сочетать эти факторы делает рациональным применение пространственных конструкций, в основе которых лежат однотипные многократно повторяющиеся элементы из наиболее эффективных профилей (трубчатых, тонкостенных, гнутых).

Современная цивилизация использует все более сложные конструкции, обеспечение прочности и надежности которых имеет первостепенное значение. Конструкции, одновременно работающие на силовые воздействия, широко применяются в различных отраслях народного хозяйства: будь то выплавка чугуна и стали, термообработка металла, изготовление и переработка нефтепродуктов и химических удобрений, сушка и обжиг строительных материалов, выпуск продуктов пищевой промышленности и т.д. Проектирование таких объектов должно в первую очередь базироваться на современных методах расчета, позволяющих удовлетворять всем обозначенным требованиям.

В настоящее время обширный круг инженерных конструкций самого разного назначения классифицируют как сложные структуры, проектный анализ которых даже при использовании специальных программ остается трудоемкой задачей. Одной из важных проблем проектного анализа является исследование устойчивости таких конструкций в целом.

**Основная часть.** Психологическая подготовка газодымозащитников к работе в сложных условиях тушения пожаров и ликвидации их последствий – основа не только эффективности боевой работы по спасению людей и снижению ущерба от уничтожения огнем, но и безопасности самих пожарных-спасателей. Значительное влияние на подготовку личного состава к действиям в экстремальных условиях оказывает наличие современных учебно-тренировочных комплексов.

С учетом того, что блоки тренажерного модуля будут подвергаться многократному перепаду температур, воздействию воды и огнетушащих жидкостей при тушении учебного пожара, для их монтажа должны быть использованы материалы, стойкие к непрерывному и многократному быстрому увеличению температуры с последующим быстрым охлаждением, а также устойчивые к напряжениям, возникающим внутри несущих конструкций, газовой и жидкостной коррозии. Наиболее экономически и технически оправданным представляется использование для этих целей объединяющей несущей конструкции типа стандартного морского контейнера 40 футов (High Cube).

Контейнер представляет собой жесткую конструкцию прямоугольную в плане из стали со следующими размерными характеристиками: длина (мм) 12192; ширина (мм) 2438; высота (мм) 2896. Дверной проем: ширина (мм) 2340; высота (мм) 2597. Контейнер, имеющий грузоподъемность 26280 кг, представлен на рисунке 1.

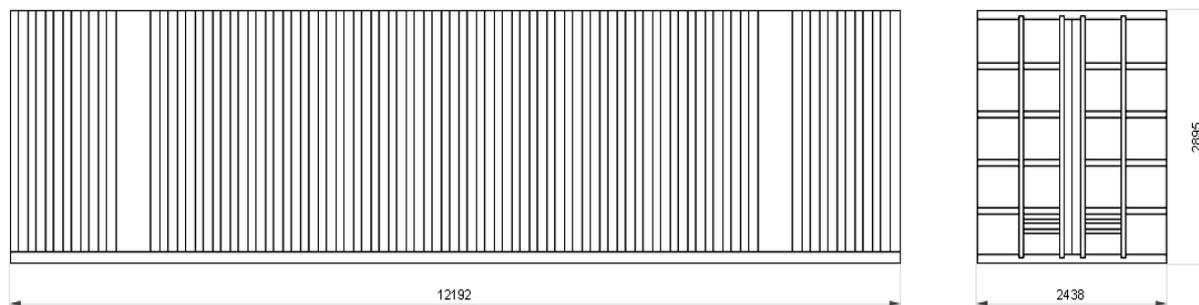


Рисунок 1. – Морской 40-футовый контейнер

Таким образом, для оптимизации тренировочного процесса необходимо создать тренажерный комплекс, который наиболее полно отвечает современным требованиям: оснащенный системами создания огненного воздействия, дымоимитации, дымоудаления, звукового и светового воздействия, систем освещения, слежения, аварийной эвакуации, контроля температурного режима и предельно-допустимой концентрации газа.

*Постановка задачи местного выпучивания элементов тренажерного комплекса.* Для моделирования его механического поведения под воздействием собственного веса. В работе предлагаются трехмерные конечно-элементные модели. На основе этих моделей проведены виртуальные испытания статического напряженно-деформированного состояния, возникающего под действием собственного веса на примере составленных модулей 40-футовых морских контейнеров, поставленных один на один (рисунок 2). Для расчета была использована упрощенная модель.

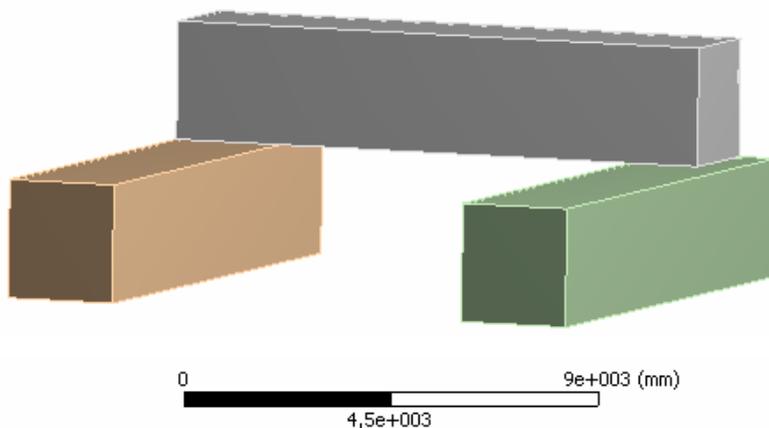


Рисунок 2. – Расчетная модель выпучивания стенок модульного тренажерного комплекса для подготовки пожарных-спасателей

Повреждения тонкостенных конструкций вследствие потери устойчивости встречаются довольно часто. В большинстве случаев повреждения вызывают местные нагрузки, но случаются также и повреждения от действия сжимающих усилий при общем изгибе корпуса конструкции или при действии ударных нагрузок. Местное выпучивание пластинчатых элементов сжатых стержней представляет собой только частный случай неустойчивости пластин. При проектировании металлических конструкций возникают вопросы, касающиеся неустойчивости пластин в условиях нагружения, отличных от тех, которые имеют место в строительных элементах, находящихся под действием сжимающей нагрузки.

Расчеты на устойчивость базируются на строгой теории, созданной выдающимися учеными: И.Г. Бубновым, В.З. Власовым, А.С. Вольмиром, В.Н. Новожиловым, П.Ф. Папковичем, Ю.А. Шиманским [1–4] и другими. Особое внимание в исследованиях уделено составляющим элементам конструкции корпуса: балкам, пластинам, перекрытиям. По оболочкам правильной формы – коническим, сферическим,

цилиндрическим – представлен обширный материал экспериментальных и теоретических исследований. Разработанные численные методы и аналитические зависимости позволяют получить достоверные результаты решения задачи устойчивости для таких элементов конструкции.

С одной стороны, стремление учесть более полно работу конструкций в целом, создание рациональных корпусных конструкций, обладающих высокой прочностью и устойчивостью, необходимость снижения веса, усложнение объектов требует уточнения методов расчетов, а с другой – часто делает невозможным получение точных аналитических решений. Поэтому недостаточно проводить расчеты только отдельных элементов корпуса по аналитическим формулам, необходимо рассчитывать конструкцию как систему в целом, учитывать взаимодействие и взаимовлияние элементов друг на друга.

Изложенное ниже исследование базируется на основном дифференциальном уравнении для прогиба  $w$  тонкой плоской пластинки под действием сил, находящихся в ее срединной плоскости. Это уравнение выводится при предположении малости прогиба  $w$  по сравнению с толщиной пластинки и имеет вид [1]:

$$\frac{EI}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + t \left( \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2\tau_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – соответственно нормальные напряжения в направлении осей  $x$  или  $y$ ;  $\tau_{xy}$  – касательное напряжение в сечении, перпендикулярном к плоскости пластинки и параллельном оси  $x$  или  $y$ .

Рассмотрим случай, когда на краях  $b$  действует равномерно распределенная сжимающая нагрузка, напряжения  $\sigma_x$  будут постоянными, а  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  равны нулю. Тогда дифференциальное уравнение прогиба  $w$  принимает следующий упрощенный вид:

$$\frac{EI}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + t \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) является однородным дифференциальным уравнением. В настоящем его виде дифференциальное уравнение (1) применимо только в пределах закона Гука и должно быть видоизменено для случая, когда значение  $\sigma_x$  превосходит предел пропорциональности.

Уравнение (2) в случае пластических деформаций принимает вид [2]:

$$D \left( \tau \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\sqrt{\tau} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + t \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad (3)$$

где  $D = \frac{EI}{1-\nu^2}$ .

Решение дифференциального уравнения (3) в частных производных должно удовлетворять граничным условиям на всех четырех краях пластинки. Исследуем граничные условия на нагруженных краях  $b$  (остальные два края рассмотрим далее). В случае шарнирного опирания края пластины на жесткую опору получим, что перемещение  $w$  и моменты  $M_x$  на краях  $x=0$ ,  $x=a$  равны нулю.

Согласно уравнению [3] имеем

$$w=0, \quad M_x = -D \left( \tau \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0.$$

Так как, по предположению, края  $x=0$ ,  $x=a$  остаются прямыми, выражение  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  равно нулю, отсюда граничные условия будут следующими:

$$w=0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (3) и граничные условия (4) удовлетворяются при помощи выражения

$$w = Y \sin \frac{n\pi x}{a} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

где  $Y$  является функцией от  $y$ , подлежащей определению.

Вводя это выражение в дифференциальное уравнение (3) и исключая  $\sin \frac{n\pi x}{a}$ , получим обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка

$$\frac{d^4 Y}{dy^4} - 2\sqrt{\tau} \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2 \frac{d^2 Y}{dy^2} + \left( \tau \left( \frac{n\pi}{a} \right)^4 - \frac{\sigma_{кр} t}{D} \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2 \right) Y = 0.$$

В этом уравнении напряжение  $\sigma_x$  заменено через  $\sigma_{кр}$ , обозначающее неизвестное критическое продольное напряжение, при котором пластинка выпучивается. С учетом обозначения

$$\mu^2 = \frac{\sigma_{кр} t}{D\tau} \left( \frac{a}{n\pi} \right)^2 \quad (6)$$

представленное выше дифференциальное уравнение примет следующий вид:

$$\frac{d^4 Y}{dy^4} - 2\sqrt{\tau} \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2 \frac{d^2 Y}{dy^2} + \tau \left( \frac{n\pi}{a} \right)^4 (1 - \mu^2) Y = 0. \quad (7)$$

Из этого дифференциального уравнения определяется значение параметра  $\mu$ , при помощи которого на основе уравнения (6) получим следующую формулу для критического напряжения:

$$\sigma_{кр} = \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2 \frac{D\tau}{t} \mu^2. \quad (8)$$

Общее решение уравнения (5) имеет вид

$$Y = C_1 ch k_1 y + C_2 sh k_1 y + C_3 \cos k_2 y + C_4 \sin k_2 y, \quad (9)$$

где значения  $k_1$  и  $k_2$  определяются из выражений:

$$k_1 = \frac{n\pi}{a} \sqrt[4]{\tau} \sqrt{\mu+1}, \quad k_2 = \frac{n\pi}{a} \sqrt[4]{\tau} \sqrt{\mu-1}. \quad (10)$$

Таким образом, общее решение уравнения (2), выраженное при помощи уравнения (8), в результате принимает следующий вид:

$$w = \sin \frac{n\pi x}{a} (C_1 ch k_1 y + C_2 sh k_1 y + C_3 \cos k_2 y + C_4 \sin k_2 y). \quad (11)$$

Значения постоянных необходимо определить таким образом, чтобы удовлетворять граничным условиям на двух краях.

Удобно использовать следующую систему координат  $x, y$ : ось  $x$  совпадает с опертым краем  $a$ , ось  $y$  проведена вдоль левого края пластинки. В связи с тем, что симметрии относительно оси  $x$  не существует, необходимо использовать общее решение дифференциального уравнения (11), а  $k_1$  и  $k_2$  определим из уравнения (10).

Граничные условия, определяющие значения четырех постоянных, следующие [4]:

$$\text{для } \varphi = \bar{\varphi}; y = 0, w = 0, \text{ и } \varphi = \bar{\varphi}; \text{ для } y = b, M_y = 0, \text{ и } Q_y = 0. \quad (12)$$

Второе выражение в (12) представляет собой условие непрерывности, которое показывает, что угол поворота  $\varphi$  на краю полученной пластинки равен углу поворота  $\bar{\varphi}$  жесткой пластинки, к которой она прикреплена,  $Q_y$  есть поперечная сила на свободном крае. Для того чтобы иметь возможность ввести решение (11) в граничное условие (12), необходимо выразить значения  $\varphi$  и  $\bar{\varphi}$  через прогиб  $w$ . Предположим, что изгибающий момент  $M_y$  на единицу длины, действующий на краю при искривлении пластинки, пропорционален углу  $\bar{\varphi}$ . Эту упругую реакцию можно выразить следующим уравнением:

$$M_y = -\bar{\zeta} \bar{\varphi}, \quad (13)$$

где  $\bar{\zeta}$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров опоры, предполагается постоянным вдоль края.

С другой стороны, момент  $M_y$  согласно уравнению [3] равен  $M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$ . Так как везде вдоль краев  $a$   $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$ , то это уравнение сводится к следующему  $M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$ . Подставляя полученное в (13), имеем  $\bar{\varphi} = \frac{D}{\zeta} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$ . В связи с тем, что  $\varphi = \pm \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)$ , граничное условие (12) будет иметь вид  $\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{D}{\zeta} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$ . Отношение  $\frac{D}{\zeta}$  имеет размерность длины, поэтому целесообразно записать уравнение в следующем виде:

$$\left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{b}{2} \zeta \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Big|_{y=0} = 0, \quad (14)$$

где  $\zeta$  определяется выражением  $\zeta = \frac{2D}{b\bar{\zeta}}$ . Величина  $\zeta$  является безразмерным числом и предполагается постоянной вдоль краев  $a$ . Она является функцией размеров выпучивающейся и опорной пластинок и называется коэффициентом заделки.

Для  $M_y$  и  $Q_y$  имеем выражения [4]; отсюда граничные условия (12) запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} M_y &= -D \left( \nu \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Big|_{y=b} = 0, \\ Q_y &= -D \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + (2-\nu) \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \Big|_{y=b} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя решение (11) в граничные условия для  $y=0$ , получим

$$C_1 = -C_2, C_2 = C_4 \frac{k_2}{k_1} - C_3 \zeta \frac{b}{2} \frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1^2}.$$

С учетом этих выражений уравнение (11) примет следующий вид

$$w = \sin \frac{2\pi x}{a} \left( C_3 \left( \cos k_2 y - \text{ch} k_1 y - \zeta \frac{b}{2} \frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1^2} \text{sh} k_1 y \right) + C_4 \left( \sin k_2 y - \frac{k_2}{k_1} \text{sh} k_1 y \right) \right).$$

Вводя это выражение в два граничных условия (15), получим следующие два уравнения:

$$\begin{aligned} C_3 \left( r \cos k_2 b + t \text{ch} k_1 b + h t \text{sh} k_1 b \right) + C_4 \left( r \sin k_2 b + t \frac{k_2}{k_1} \text{sh} k_1 b \right) &= 0, \\ C_3 \left( t \frac{k_2}{k_1} \sin k_2 b - r \text{sh} k_1 b - h r \text{ch} k_1 b \right) - C_4 \left( t \frac{k_2}{k_1} \cos k_2 b + r \frac{k_2}{k_1} \text{ch} k_1 b \right) &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $r$ ,  $t$  и  $h$  определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} r &= k_2^2 + \nu \sqrt{\tau} \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2 = k_1^2 - (2-\nu) \sqrt{\tau} \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2, \\ t &= k_1^2 - \nu \sqrt{\tau} \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2 = k_1^2 + (2-\nu) \sqrt{\tau} \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2, \\ h &= \zeta \frac{b}{2} \frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1^2}. \end{aligned}$$

Формула (16) представляет собой однородное линейное дифференциальное уравнение, и ненулевые значения для  $C_3, C_4$  возможны только тогда, когда детерминант этой системы равен нулю. Следовательно, уравнение  $\Delta = 0$  представляет собой критерий выпучивания, на основе которого получим условие устойчивости:

$$\frac{2rt}{ch k_1 b \cos k_2 b} + r^2 + t^2 - \frac{r^2 k_1^2 - t^2 k_2^2}{k_1 k_2} th k_1 b th k_2 b + h \left( t^2 th k_1 b - r^2 \frac{k_1}{k_2} tg k_2 b \right) = 0. \quad (18)$$

Значение критического напряжения  $\sigma_{кр}$  перепишем в следующем виде [5]:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 \left( \left( \frac{n^4 \sqrt{\tau}}{\alpha} \right)^2 + p + q \left( \frac{\alpha}{n^4 \sqrt{\tau}} \right)^2 \right). \quad (19)$$

Параметры  $p$  и  $q$  в этом уравнении зависят от коэффициента заделки  $\zeta$ . Они вычислены на основе уравнения (18).

Значение  $\alpha$ , при котором напряжение имеет минимальное значение  $\sigma_{кр}$ , можно определить из условия  $\frac{\partial \sigma_{кр}}{\partial \alpha} = 0$ .

Это значение будет найдено по формуле

$$\alpha_0 = n^4 \sqrt{\frac{\tau}{q}}. \quad (20)$$

Таким образом,

$$\sigma_{кр, \min} = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 (p + 2\sqrt{q}) = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 k, \quad (21)$$

где коэффициент устойчивости  $k$  не зависит от величины  $\tau$  и имеет значение  $k = p + 2\sqrt{q}$ .

Из уравнения (20) следует, что с уменьшением степени упругой заделки величина  $\alpha_0$  будет постоянно возрастать, так как  $q$  монотонно убывает.

В предельном случае  $q = 0$  значение отношения  $\alpha_0$  будет бесконечным, и пластинка будет выпучиваться по одной полуволне.

С увеличением  $\alpha_0$  критическое напряжение  $\sigma_{кр, \min}$  убывает и асимптотически стремится к значению

$$\sigma_{кр, \min} = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{b} \right)^2 p. \quad (22)$$

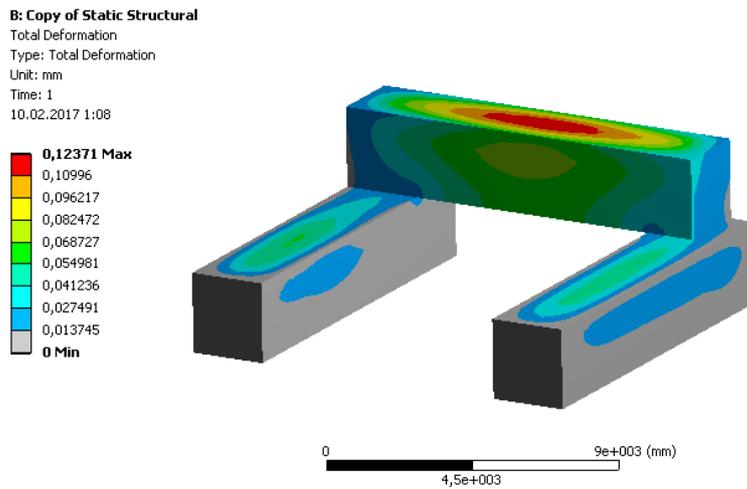
В случае шарнирного опирания края пластины на жесткую опору пластинка, независимо от ее длины, будет выпучиваться по одной полуволне. Однако независимо от длины пластинки значение критического напряжения не может быть ниже значения, полученного по формуле (22). Если одна сторона пластинки упруго заделана, уравнение (20) показывает, что в случае достаточно длинной пластинки образуются несколько полуволн.

На рисунках 3 и 5 представлены результаты выполненных расчетов.

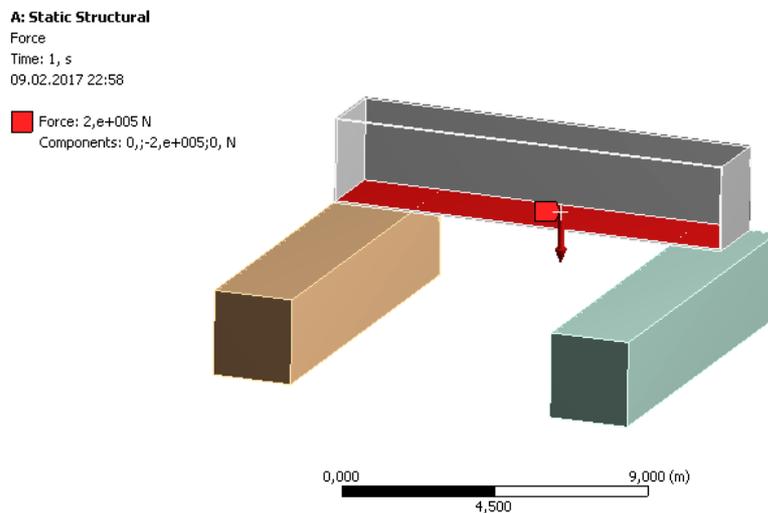
На рисунке 3 показаны опасные площади при оценке деформаций при местном выпучивании в соответствии с формулой (22).

Первым расчетом было определение выпучивания стенок контейнеров под действием собственного веса. Величина выпучивания составляет 0,12 мм.

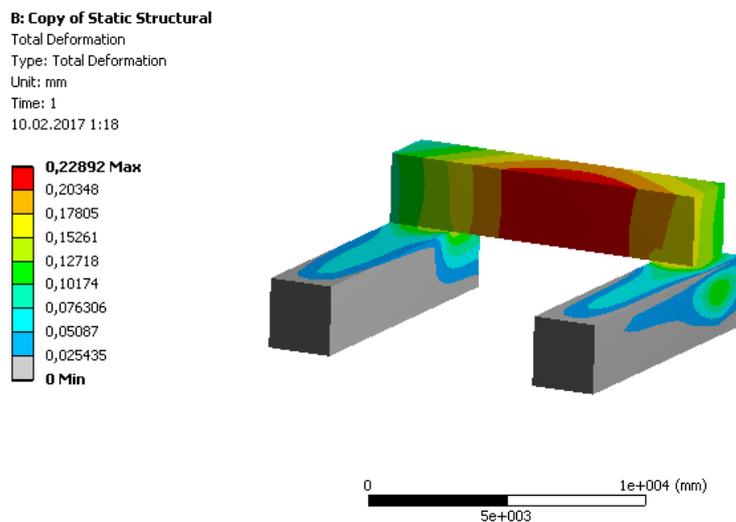
Вторым расчетом было определение перемещений при объемной силе тяжести, равной 20 т, на верхнем модуле.



**Рисунок 3. – Поля деформаций при местном выпучивании модульного тренажерного комплекса для подготовки пожарных-спасателей**



**Рисунок 4. – Схема нагружения контейнера**



**Рисунок 5. – Поля перемещений при втором варианте нагружения (максимальное перемещение увеличилось в 2 раза и составляет 0,23 мм)**

**Заключение.** В результате проведенного исследования осуществлена постановка задачи оптимального проектирования оболочечных конструкций типа структур с квадратным и прямоугольным планом, обладающих прямолинейным либо криволинейным очертанием с заданным характером нагружения.

Создана математическая модель для расчета прямоугольных и квадратных в плане конструкций с неизменяемой геометрией, при комбинированном нагружении, основанная на методе начальных параметров.

Решена задача устойчивости и критического поведения гибких упругих и упругопластических оболочек и пластин при комбинированном нагружении.

Установлено влияние на величину критических нагрузок и закритическое поведение оболочки вида комбинированного нагружения, уровня продольных нагрузок, условий закрепления кромок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
2. Власов, В.З. Общая теория оболочек / В.З. Власов. – М. : Физматгиз, 1949. – 784 с.
3. Блейх, Ф. Устойчивость металлических конструкций / Ф. Блейх. – М. : Физматгиз, 1959. – 544 с.
4. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П.Тимошенко, С.В. Войковский-Кригер. – М. : Физматгиз, 1963.
5. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки / Н.Н. Белов [и др.]. – Томск : STT, 2004. – 465 с.
6. Bangash, M.Y.H. Explosion-Resistant Building Structures : Design, Analysis, and Case Studies / M.Y.H. Bangash, T. Bangash. – Berlin : Springer, 2006. – 450 с.

Поступила 17.02.2017

#### LOCAL BUCKLING OF SHELL STRUCTURES SQUARE AND RECTANGULAR WITH SWIVEL BEARING AN EXAMPLE OF A UNIT TRAINING COMPLEX FOR TRAINING FIREMEN-RESCUERS

V. AGAYEV, T. MARTYNENKO, S. PRONKEVICH, I. MARTYNENKO

*The mathematical model for calculation rectangular and square in respect of designs with unchangeable geometry is created, at the combined loading, based on a method of initial parameters. Now uses the more and more composite designs, ensuring durability and which reliabilities, prime value has. Projection of such objects has to be based on the modern computational methods allowing to meet requirements of optimum projection of constructions first of all. The received dependence allows to define fields of an intense strained state at model operation of a modular training complex for training of fire rescuers and his mechanical behavior under the influence of sole weight. The virtual tests in an ANSYS package are carried out. The dangerous areas at assessment of deformations at a local swelling according to minimum critical stress are shown.*

**Keywords:** shell structures, mathematical model, modular training complex, combined loading, the critical load.

## ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ

УДК 084.465

### РЕГУЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕКАЧКИ ПРЯМЫМ КОНТАКТИРОВАНИЕМ

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

*Приводятся общие положения, связанные с понятием последовательной перекачки нефти и нефтепродуктов прямым контактированием. Представлен обзор известных технических нормативных правовых актов, регламентирующих транспорт нефти и нефтепродуктов методом последовательной перекачки прямым контактированием. Обоснована необходимость введения термина «технологическая смесь» в нормативные правовые акты при проведении операций учета нефтепродуктов.*

**Ключевые слова:** нефтепродукты, транспортирование, последовательная перекачка, прямое контактирование, технологическая смесь.

Широко используемой технологией, принятой во всем мире для транспортирования светлых нефтепродуктов [1], а в ряде случаев и сырой нефти, является их последовательная перекачка прямым контактированием. Сущность последовательной перекачки прямым контактированием состоит в том, что разноименные или разноразные нефтепродукты закачивают в трубопровод в виде отдельных партий последовательно одну за другой, т.е. перекачка ведется порциями, когда один продукт вытесняет другой и, в свою очередь, тоже вытесняется другим продуктом, при этом вытесняемый и вытесняющий нефтепродукты непосредственно контактируют друг с другом без использования каких-либо механических разделителей в месте их контакта [2].

Приближенная теория последовательной перекачки нефтепродуктов прямым контактированием впервые была предложена В.С. Яблонским [3]. Дальнейшее развитие теория последовательной перекачки прямым контактированием получила в работах Г.З. Закирова, М.В. Лурье, В.И. Марона, М.В. Нечвала, В.Ф. Новоселова, П.И. Тугунова, К.Д. Фролова, В.А. Юфина [4–6].

В СССР первые опыты по перекачке по одному и тому же трубопроводу керосина и газойля провел инженер А.А. Кашеев в 1930–1932 годах на керосинопроводе «Баку – Батуми», а в США первые эксперименты по перекачке бензина и бутана относятся к концу 1930-х годов [3]. В конце 1930-х годов инженер Д.А. Черняев на нефтепродуктопроводе «Каспий – Орск» осуществил последовательную перекачку воды и нефти. Профессор Московского нефтяного института В.С. Яблонский в 1946 году провел лабораторные эксперименты по последовательной перекачке нефтепродуктов и доказал техническую осуществимость данной технологии.

Промышленное использование последовательной перекачки нефтепродуктов в СССР началось в системе Главнефтеснаба РСФСР на магистральных трубопроводах «Уфа – Петропавловск» и «Салават – Уфа». К 1962 году последовательная перекачка начала осуществляться на нефтепродуктопроводе «Куйбышев – Брянск». К 1970 году по этому трубопроводу последовательно перекачивалось семь сортов дизельного топлива и два сорта автомобильного бензина, годовое число циклов колебалось от 48 до 52. В 1975 году последовательная перекачка автобензинов и дизельных топлив проектировалась на трубопроводах общей протяженностью около 1600 км, а к 1980 году распространилась на участки общей протяженностью более 3300 км [3].

За рубежом в настоящее время существуют десятки нефтепродуктопроводов, по которым осуществляется последовательная перекачка прямым контактированием разноразных нефтепродуктов. Среди этих трубопроводов крупнейшие транспортные системы США, Канады, Франции, Германии, стран Ближнего Востока и других. Самая крупная трубопроводная система США «Грейт лейнс пайплайн» имеет протяженность около 10 тыс. км. В Германии крупнейший нефтепродуктопровод «Рейн – Майн» – 630 км. Во Франции действует крупнейший в Европе нефтепродуктопровод «Марсель – Карлсруэ», протяженность которого составляет более 700 км [2].

Таким образом, последовательная перекачка нефтепродуктов прямым контактированием – широко распространенная технология транспортирования светлых нефтепродуктов, принятая сейчас во всем мире.

В Республике Беларусь последовательная перекачка прямым контактированием до последнего времени имела ограниченное применение – использовалась только в ОАО «Гомельтранснефть Дружба» при транспортировании разных сортов сырой нефти, поступающей с Украины по нефтепроводу «Мозырь – Броды»

и транспортируемой по территории Беларуси по нефтепроводу «Унеча – Броды». Первым трубопроводом в Беларуси, спроектированным для применения технологии последовательной перекачки прямым контактированием, является нефтепродуктопровод «Полоцк – Фаниполь», первая очередь которого введена в действие в феврале 2017 года, полностью нефтепродуктопровод будет введен в эксплуатацию в течение 2017 года.

Последовательная перекачка нефтепродуктов прямым контактированием получила широкое распространение по следующим причинам [2]:

- *во-первых*, сооружение отдельного трубопровода для каждого нефтепродукта нерентабельно, поэтому большинство нефтепродуктов транспортируют по одному трубопроводу последовательно;
- *во-вторых*, при этом способе транспортировки нефтепродуктов достигается максимально возможное использование пропускной способности трубопровода, освобождаются другие виды транспорта (железнодорожный, водный, автомобильный) от перевозок нефтепродуктов.

Последовательная перекачка нефтепродуктов прямым контактированием осуществляется циклами [7]. Каждый цикл состоит из нескольких партий нефтепродуктов, выстроенных в определенной последовательности. Партии нефтепродуктов в цикле формируются с учетом их состава, свойств и качества, при этом порядок следования выбирается таким, чтобы каждый нефтепродукт контактировал с двумя другими, наиболее близкими по своим свойствам.

При всех достоинствах технология последовательной перекачки нефтепродуктов прямым контактированием имеет характерную особенность, состоящую в смесеобразовании отдельных нефтепродуктов при их взаимном вытеснении в трубопроводе. Смесь, которая образуется в зоне контакта перекачиваемых нефтепродуктов при вытеснении одного из них другим, обусловлена гидродинамическими процессами, присущими движению жидкости в трубопроводе. При прямом контактировании нефтепродуктов, обладающих различными физическими свойствами, смесеобразование происходит в результате сложного взаимодействия, обусловленного, в первую очередь, физическими свойствами контактирующих нефтепродуктов, характером профиля трассы и параметрами режима перекачки [8]. Количество смеси по мере продвижения нефтепродуктов от начала трубопровода к конечному пункту возрастает.

Смесеобразование нефтепродуктов представляет угрозу их качеству, поскольку в ряде случаев даже малая примесь одного нефтепродукта в другом делает его непригодным к использованию. В соответствии с Законом Республики Беларусь «О защите прав потребителей» [9] качество товара – это совокупность свойств и характеристик товара, относящихся к его способности удовлетворить установленные и (или) предполагаемые потребности. Нефтепродукты, находящиеся в смеси, уже не обладают совокупностью свойств, способных удовлетворить установленные потребности заказчика, и не соответствуют требованиям технических нормативных правовых актов.

Согласно ГОСТ 26098-84 «Нефтепродукты. Термины и определения» [10] нефтепродукт, не удовлетворяющий требованиям технических нормативных правовых актов, является некондиционным. Смесь нефтепродуктов, не удовлетворяющая требованиям технических нормативных правовых актов по отношению ни к одному из исходных нефтепродуктов, относится к некондиционным нефтепродуктам.

Таким образом, в процессе транспортирования нефтепродуктов методом последовательной перекачки прямым контактированием в результате смесеобразования часть объема транспортируемого нефтепродукта переходит в состояние некондиционного товара, что влечет за собой невозможность реализации конечному потребителю объема смеси, образовавшейся из двух нефтепродуктов, в случае, если не представляется возможным восстановить качество исходных нефтепродуктов. Соответственно, предприятие не получит запланированную прибыль. К этим вопросам также примыкает и задача справедливого распределения финансовой ответственности от нереализованной выгоды приобретателя нефтепродуктов между производителем и приобретателем, решение которых следует начинать с обращения к самому термину «смесь нефтепродуктов».

Изучение и анализ нормативных правовых и технических нормативных правовых актов показали, что термин «смесь нефтепродуктов» в нормативной правовой базе Республики Беларусь и Российской Федерации представлен в узком его значении.

Так, в стандарте организации АК «Транснефтепродукт» по нормам технологического проектирования магистральных нефтепродуктопроводов [11] приведен термин «зона смеси нефтепродуктов при последовательной перекачке», который характеризуется как длина участка магистрального нефтепродуктопровода, в пределах которого находится смесь последовательно перекачиваемых нефтепродуктов.

В другом стандарте организации АК «Транснефтепродукт» – Инструкции по транспортированию нефтепродуктов по магистральным нефтепродуктопроводам методом последовательной перекачки [12] – используются термины «смесь» либо «технологическая смесь» без приведения определения данного понятия. В документе отмечается, что технологическая смесь, образующаяся в зонах контактирования партий нефтепродуктов вследствие особенностей технологии последовательной перекачки, не является новой маркой нефтепродукта.

В Инструкции по учету нефтепродуктов на магистральных нефтепродуктопроводах АК «Транснефтепродукт» [13] используются понятия «смесь» либо «технологическая смесь» также без приведения определения данного понятия.

В Нормах технологического проектирования разветвленных нефтепродуктопроводов [14], действующих на территории Республики Беларусь, приведено определение «зоны смеси нефтепродуктов при последовательной перекачке», совпадающее с определением в [11]. Одновременно в документе используются понятия «смесь» без приведения определения.

Таким образом, при отсутствии в технических нормативных правовых актах термина «технологическая смесь» целесообразно его ввести с учетом понятий, содержащихся в [9–14], суть которых состоит в том, что технологическая смесь – некондиционный нефтепродукт, образовавшийся в зонах контактирования партий нефтепродуктов при их последовательной перекачке в нефтепродуктопроводе.

В технических нормативных правовых актах, в которых будет использован термин «технологическая смесь», в комментариях к нему следует также подчеркнуть, что образование смеси происходит в результате естественного процесса. Введение такого термина в технические нормативные правовые акты позволит привлечь внимание к проблеме естественного смесеобразования нефтепродуктов. Важно и то, что благодаря использованию термина «технологическая смесь» в технических нормативных правовых актах будут заложены основы проведения дальнейших правовых изысканий по таким направлениям, как: а) товарный учет смеси нефтепродуктов; б) регулирование отношений между производителем и приобретателем нефтепродуктов, транспортируемых методом последовательной перекачки прямым контактированием, и распределением финансовой ответственности за некондиционный продукт (смесь) при невозможности исправления качества исходных нефтепродуктов в смеси.

При введении в технические нормативные правовые акты указанного термина можно принять к сведению, что к понятию «технологической смеси» близки понятия «естественной убыль» и «технологические потери», но вместе с тем они не являются идентичными.

В стандарте Республики Беларусь «Торговля. Термины и определения» [15] естественная убыль определена, как товарные потери, обусловленные естественными процессами, вызывающими изменение количества товара, которое может произойти за счет усушки, утруски, утечки, распыла и т.д.

В приказе Министерства торговли Республики Беларусь «О нормах товарных потерь, методике расчета и порядке отражения в учете» [16] определено, что естественная убыль представляет собой потери товара (уменьшение его массы при сохранении качества в пределах требований нормативных документов), являющиеся следствием его физико-химических свойств, воздействия метеорологических факторов и несовершенства применяемых в данное время средств защиты продукции от потерь при транспортировании, хранении и реализации.

В [17] отмечено, что к естественной убыли не следует относить технологические потери и потери от брака, а также потери товарно-материальных ценностей при их хранении и транспортировке, вызванные нарушением требований стандартов, технических и технологических условий, правил технической эксплуатации, повреждением тары, несовершенством средств защиты товаров от потерь и состоянием применяемого технологического оборудования.

Смысл понятия «технологические потери» рассмотрен в работе [18]. В ней указано, что технологические потери возникают в процессе обработки, переработки и доставки ценностей в силу особенностей применяемых технологий. Например, в металлургии часть металла уходит в шлак, при деревообработке часть древесины превращается в стружку и т.д.

Как следует из сказанного выше, понятие «технологическая смесь» нефтепродуктов, образовавшихся в результате последовательной перекачки прямым контактированием, отличается от понятий «естественная убыль» и «технологические потери». При естественной убыли некоторое количество кондиционного товара при транспортировании или хранении изменяет свои физико-химические свойства и утрачивает их безвозвратно. При технологических потерях часть кондиционного сырья при обработке изменяет свои физико-химические свойства и переходит в некондиционное с невозможностью исправления. При образовании технологической смеси количество кондиционных нефтепродуктов уменьшается на величину составляющих смесь исходных нефтепродуктов. Смесь становится некондиционным нефтепродуктом, но с возможностью восстановления до кондиционного состояния при помощи распределения смеси.

В пунктах приема нефтепродуктопровода с целью восстановления качества перекачиваемых последовательно нефтепродуктов осуществляется равномерное распределение (раскладка) смеси, образовавшейся при транспортировке нефтепродуктов, по партиям этих нефтепродуктов.

Сущность раскладки состоит в добавлении некоторого количества смеси к нефтепродуктам, из которых она образовалась, осуществляемом за счет имеющегося у нефтепродуктов запаса качества с обеспечением сохранности в допустимых стандартами пределах показателей качества нефтепродуктов, к кото-

рым добавляется смесь. При транспортировке нефтепродуктов необходимо предусматривать необходимый запас их качества для обеспечения сохранности качества транспортируемых нефтепродуктов [11].

Дополнительно стоит отметить еще один аспект рассматриваемой проблемы. При транспортировании и хранении товарно-материальных ценностей назначаются нормы естественной убыли, приравнивающиеся к материальным расходам для целей налогообложения при исчислении налога на прибыль [19]. Организации-плательщики налога на прибыль имеют право уменьшить величину прибыли для целей налогообложения на величину указанных потерь [20].

При последовательной перекачке нефтепродуктов прямым контактированием с образованием смеси практика налогообложения еще недостаточно проработана. Возможная причина этого заключается в том, что количество смеси нефтепродуктов в магистральных нефтепродуктопроводах относительно невелико, так что при наличии больших партий транспортируемых нефтепродуктов вся смесь может быть разложена по исходным нефтепродуктам с сохранением качества последних на конечных приемных пунктах в резервуарных парках [2].

В случае невозможности раскладки смеси в пункте приема (отсутствие достаточных ресурсов нефтепродуктов или необходимого запаса качества у одного или обоих нефтепродуктов) образуется нестандартный нефтепродукт либо «нетоварная смесь» [14; 21; 22]. В этом случае технологическая смесь при невозможности ее восстановления из-за отсутствия достаточных для этого ресурсов переходит в понятие «нетоварная смесь».

Следовательно, в практике приема нефтепродуктов, полученных по магистральному нефтепродуктопроводу методом последовательной перекачки прямым контактированием, образовавшуюся смесь пытаются либо восстановить до кондиционного нефтепродукта, либо отправить на завод-изготовитель на переработку. В ином случае нефтебаза недополучает прибыль.

В дополнение к сказанному отметим, что четкий механизм учета смеси нефтепродуктов в бухгалтерской документации и при налогообложении не выработан, о чем свидетельствует анализ литературных источников. В настоящее время заказчик нефтепродуктов, транспортируемых по трубопроводу методом последовательной перекачки прямым контактированием, вне зависимости от причины возникновения смеси юридически не защищен и вынужден нести убытки в форме упущенной выгоды. В такой ситуации единственный выход для приобретателя нефтепродуктов – проведение процедуры раскладки и восстановления нефтепродуктов в смеси до кондиционного состояния.

Однако существуют случаи, при которых восстановление смеси нефтепродуктов до кондиционного состояния более высоких по качеству марок нефтепродуктов представляется затруднительным или невозможным. Это характерно для следующих ситуаций или их сочетаний:

- завод-изготовитель нефтепродукта не обеспечивает необходимый запас качества нефтепродукта при его транспортировании по нефтепродуктопроводу;
- партии нефтепродуктов в цикле очень малы для последующей раскладки смеси по резервуарам с целью восстановления ее качества;
- резервуарный парк нефтебазы (объем парка, наличие необходимого оборудования) изначально не был спроектирован и построен с учетом необходимости приемки нефтепродукта при последовательной перекачке;
- относительный объем смеси в партии нефтепродуктов очень большой из-за сложной конструкции технологического нефтепродуктопровода (лупинги, вставки, повороты, тушиковые участки, сложный профиль трассы), при проектировании которого не закладывалась возможность последовательной перекачки нефтепродуктов;
- невозможность отгрузки смеси нефтепродуктов заводу-изготовителю из-за невозможности указания соответствующего пункта в договоре на поставку нефтепродукта.

В таких случаях заказчик (нефтебаза) на поставку нефтепродукта по технологическому нефтепродуктопроводу при получении смеси нефтепродуктов не сможет восстановить ее до кондиционного состояния более высоких по качеству марок нефтепродуктов, находящихся в смеси. Заказчик (нефтебаза) будет вынужден отправить смесь в товарные резервуары более низких по качеству марок нефтепродуктов. Это говорит о необходимости перевода нефтепродукта в смеси в категорию нефтепродукта, более низкого по качеству, а следовательно и по стоимости марки [14].

Соответственно, заказчик (нефтебаза), заключивший договор на поставку нефтепродукта при последовательной перекачке, имеет недостачу, которая образуется за счет ценовой разницы между единицей объема нефтепродукта высокой по качеству марки и более низкой, умноженной на количество нефтепродукта более высокой по качеству марки, находящееся в смеси.

Стоит отметить, что возможная корректировка качества смеси близка к понятию «пересортица». Четкое определение понятия «пересортица» отсутствует и в нормативно-правовых актах Республики Бе-

ларусь. По общему правилу, «пересортица – одновременная недостача одного наименования товара и излишек другого сорта, вида, артикула, типа, марки и т.п. того же наименования товара, готовой продукции, товарно-материальной ценности» [23].

Пересортица выявляется при инвентаризации у одного и того же проверяемого лица за один и тот же проверяемый период в отношении активов одного и того же наименования в тождественных количествах излишков или недостач [24]. Причинами возникновения пересортицы являются нарушение порядка приемки, хранения, отпуска товаров со склада, а также отсутствие надлежащего внутреннего контроля над движением товаров. При последовательной перекачке нефтепродуктов образование смеси возникает не при нарушении транспортирования или отсутствии внутреннего контроля над движением нефтепродуктов, а обусловлена объективными физическими процессами.

Понятие «пересортица» связано с «нормами естественной убыли». Убыль активов в пределах установленных норм естественной убыли определяется после зачета недостач излишками по пересортице. При отсутствии норм естественной убыли убыль рассматривается как недостача сверх норм [24]. В то же время в «Нормах естественной убыли нефтепродуктов...» [25] отсутствует информация о последовательной перекачке и образовании смеси, а приведенные формулы и таблицы норм естественной убыли нефтепродуктов при транспортировании и хранении связаны с другими физическими процессами.

На сегодняшний день процедура учета невозможности восстановления смеси и перевода ее в категорию более низких по качеству марок нефтепродуктов в бухгалтерской практике неявно выражена, что является особо актуальным вопросом в связи с возникшими в государстве задачами по последовательной перекачке нефтепродуктов.

#### **Заключение**

Проведенный обзор и анализ известных нормативных документов, регламентирующих вопросы последовательной перекачки нефтепродуктов прямым контактированием, а также литературных источников, в которых рассмотрены различные аспекты проблемы образования смеси нефтепродуктов, позволили сделать вывод, что в нормативных документах по последовательной перекачке нефтепродуктов прямым контактированием отсутствует термин «технологическая смесь», в то же время это понятие является одним из ключевых при проведении товарных операций.

Использование понятия «технологическая смесь» является необходимым условием полноценного функционирования системы регулирования транспортирования нефтепродуктов методом последовательной перекачки прямым контактированием.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов / И.Т. Ишмухаметов [и др.]. – М. : Нефть и газ, 1999.
2. Коршак, А.А. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов / А.А. Коршак, А.М. Нечваль ; под ред. А.А. Коршака. – СПб. : Недра, 2008.
3. Яблонский, В.С. Последовательная перекачка нефтепродуктов и нефтей по магистральным трубопроводам / В.С. Яблонский, В.А. Юфин, И.П. Бударов. – М. : Гостоптехиздат, 1959.
4. Галлеев, Б.В. Магистральные нефтепродуктопроводы / Б.В. Галеев, М.З. Карпачев, В.И. Харламенко. – М. : Недра, 1976.
5. Нечваль, М.В. Последовательная перекачка нефтей и нефтепродуктов / М.В. Нечваль, В.Ф. Новоселов, П.И. Тугунов. – М. : Недра, 1976.
6. Оптимизация последовательной перекачки нефтепродуктов / М.В. Лурье [и др.]. – М. : Недра, 1979.
7. Трубопроводный транспорт нефти и газа / В.Д. Белоусов [и др.]. – М. : Недра, 1978.
8. Техника и технология транспорта и хранения нефти и газа : учеб. пособие для вузов / Ф.Ф. Абузова [и др.]. ; под ред. В.Ф. Новоселова. – М. : Недра, 1992.
9. О защите прав потребителей : Закон Респ. Беларусь от 09.01. 2002 г. № 90-3.
10. Нефтепродукты. Термины и определения : Государственный стандарт Республики Беларусь 26098-84.
11. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепродуктопроводов. Стандарт организации АК «Транснефтепродукт» СО-03-04-АКТНП-014-2004.
12. Инструкция по транспортированию нефтепродуктов по магистральным нефтепродуктопроводам системы ОАО АК «Транснефтепродукт» методом последовательной перекачки : Стандарт организации АК «Транснефтепродукт» СО-06-16-АКТНП-003-2004.
13. Инструкция по учету нефтепродуктов на магистральных нефтепродуктопроводах : руководящий документ АК «Транснефтепродукт» 153-39-011-97.
14. Нормы технологического проектирования разветвленных нефтепродуктопроводов : Ведомственные нормы технологического проектирования 3-90.

15. Торговля. Термины и определения : Гос. стандарт Республики Беларусь СТБ 1393-2003.
16. О Нормах товарных потерь, методике расчета и порядке отражения в учете : приказ М-ва торговли Респ. Беларусь, 02.04.1997 г., № 42.
17. Методические рекомендаций по разработке норм естественной убыли : приказ Минэкономразвития Рос. Федерации от 31.03.2003, № 95.
18. Лосицкий, О.А. Технологические потери и естественная убыль : налогообложение [Электронный ресурс] / О.А. Лосицкий // Российский налоговый курьер. – 2004. – № 12. – Режим доступа: [http://6pl.ru/gost/S\\_com\\_NEU.htm](http://6pl.ru/gost/S_com_NEU.htm).
19. Анищенко, Н.Ж. Недостачи, потери ценностей: отражение в учете, налогообложение [Электронный ресурс] / Н.Ж. Анищенко // Главный Бухгалтер. – 2005. – № 39. – Режим доступа: [http://spravka-jurist.com/base/part-ax/tx\\_cssuru.htm](http://spravka-jurist.com/base/part-ax/tx_cssuru.htm).
20. Налоговый кодекс Республики Беларусь (особенная часть) [Электронный ресурс] : 29 дек. 2009 г. № 71-3 : принят Палатой представителей 11 дек. 2009 г. : одобрен Советом Республики 18 дек. 2009 г. / Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь.
21. Метрологическое обеспечение учета нефтепродуктов при их транспортировке по системе магистральных нефтепродуктопроводов : Основные положения. МИ 3275-2010.
22. Правила технической эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов : РД 153-39.4-041-99.
23. Махота, Е.А. Практические рекомендации бухгалтеру в случае возникновения пересортицы товара [Электронный ресурс] / Е.А. Махота // Главный бухгалтер. – 2014. – № 46. – Режим доступа: [http://www.gb.by/izdaniya/glavnyi-bukhgalter/prakticheskie-rekomendatsii-bukhgalteru-\\_0000000](http://www.gb.by/izdaniya/glavnyi-bukhgalter/prakticheskie-rekomendatsii-bukhgalteru-_0000000).
24. Инструкция по инвентаризации активов и обязательств : утв. постановлением Минфина Респ. Беларусь от 30.11.2007 № 180.
25. Нормы естественной убыли нефтепродуктов при приеме, транспортировании, хранении и отпуске на объектах магистральных нефтепродуктопроводов : руководящий документ 153-39.4-033-98.

Поступила 12.06.2017

## REGULATION OF TRANSPORTATION OF OIL PRODUCTS BY THE METHOD OF SEQUENTIAL TRANSMISSION BY DIRECT CONTACT

*A. VORONIN, V. LIPSKI*

*General provisions related to the concept of consecutive pumping of oil and oil products by direct contact are given. The review of known technical normative legal acts regulating transportation of oil and oil products by a method of consecutive pumping by direct contact is presented. The necessity of introduction of the term "technological mixture" in normative legal acts during oil product accounting operations is substantiated.*

**Keywords:** *petroleum products, transport, coherent pumping, direct contact, process mixture.*

УДК 621.64:004.21

**МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ  
В АЛГОРИТМАХ ПОИСКА РЕШЕНИЙ СТАЦИОНАРНЫХ  
НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА**

*канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ;  
Т.М. ГЛУХОВА; канд. техн. наук, доц. Р.П. БОГУШ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматривается оптимизация режимов транспортировки газа с точки зрения минимизации энергетических затрат, в первую очередь связанная с современными потребностями трубопроводной отрасли. Важным компонентом данной задачи выступает решение гидравлической и термической задач по результатам математического моделирования. Предлагается метод получения первого приближения распределения давлений по сети транспортировки газа, обеспечивающий сокращение времени итерационного процесса поиска решения.*

**Ключевые слова:** *транспортировка газа, энергетические затраты, минимизация, математическое моделирование, гидравлическая и термическая задачи, распределение давлений.*

Авторским коллективом начиная с 2010 года ведется работа по созданию эффективных методов расчета [3–5]. Постановка задачи представлена системами нелинейных уравнений – математической моделью стационарного и неизотермического движения газа в системах газотранспортных обществ (ГТО) Республики Беларусь. Размерность системы зависит от масштаба моделируемого участка схемы и варьируется от фрагмента газотранспортной системы (ГТС) до масштаба газотранспортной системы Беларуси в целом [3].

Однако разработанные итерационные алгоритмы расчета не позволяют говорить о возможности перехода к решению данных задач в рамках нестационарной модели. Длительное время расчета полной схемы магистрального газопровода Республики Беларусь указывает на невозможность его выполнения в реальном времени.

С целью повышения скорости сходимости алгоритмов расчета нами предлагается *метод получения первого приближения, основанный на мягких вычислениях*. Как показали численные эксперименты, предложенная аппроксимация распределения давлений дает существенное (более чем в 2 раза) сокращение времени итерационного поиска решения.

**Формализация задачи описания магистральной газотранспортной сети**

Для представления информации о расчетной модели трубопроводной газотранспортной сети будем придерживаться объектно-ориентированной парадигмы в постановке Гради Буча [1].

Обращение к внутренней структуре вводимых сущностей будем изображать, используя оператор «.». Тогда обозначение вида  $a.b$  будет обозначать обращение к свойству  $b$  элемента  $a$ .

Выделим классы концептуальных сущностей, описывающие элементы газотранспортной системы:

- узел  $n = \{p_i\}$  – представление точечного элемента газотранспортной сети, хранящего данные  $p_i$  о давлении и температуре газа, характеристику узла (входной / выходной узел) и другие свойства;

- множество всех узлов  $N = \{n_i\}$ ;

- фрагмент трубопровода  $l = \{n_1, n_2, p_1, p_2, \dots\}$ , включающий пару узлов  $n_1$  и  $n_2$  и свойства  $p_i$  фрагмента (длина, диаметр, объем, толщина стенки, глубина залегания и др.).

Например, обращение к объему фрагмента трубопровода будет выглядеть как  $l.V$ .

Множество всех фрагментов трубопровода (далее – линков)  $L = \{l_k\}$ .

Множество линков, объединенных по тому свойству, что в них входит в качестве одной из вершин узел  $n$ , будем задавать так:

$$L(n) = \{l_i / l.n_1 = n \vee l.n_2 = n\}.$$

Для удобства дальнейших рассуждений введем также оператор, выделяющий множество узлов, содержащееся в линках  $L(n)$  узла  $n$ :

$$Nl(n) = \{n_i / \exists l \in L(n), l.n_1 = n_i \vee l.n_2 = n_i\}.$$

Определим структуру данных для хранения модели в следующем виде:

$$LM = \{L(n_i) / \forall n_i \in N\}.$$

С точки зрения реализации в рамках объектно-ассоциативного языка программирования такая структура является ассоциативным контейнером типа шех-таблицы или контейнера, основанного на по-

строении дерева поиска, вычислительная сложность операций добавления, удаления, поиска элемента для любых типов ассоциативных контейнеров оценивается как  $O(\log n)$ , где  $n$  – количество пар элементов в контейнере [9].

Фактически это определение графа  $G(N, L)$ , представляющего газотранспортную сеть. Одной из особенностей задачи является то, что топология сети меняется в реальном времени. Изменение состояния задвижек приводит к перекоммутации сети. Меняются множества входных и выходных узлов, а также есть узлы, которые могут выступать в роли как входных, так и выходных узлов сети (например, узлы, представляющие входы в подземные хранилища газа).

Таким образом, можно выделить следующие особенности расчетной модели:

- 1) топология сети меняется в реальном времени;
- 2) меняются множества входных и выходных узлов;
- 3) присутствуют пограничные узлы, характер которых определяется расчетным путем.

Введем еще несколько удобных ассоциативных контейнеров.

Контейнер признака присутствия  $F(n)$ , который хранит соответствие объекту, помещенному в контейнер, значению флага *true/false*, или 1/0. Тогда запись вида  $n \in F$  будем интерпретировать как то, что в ассоциативном контейнере признака  $F$  объекту  $n$  поставлено в соответствие значение флага, равное 1. Такая запись интуитивно понятна и удобна для использования в силу имеющейся аналогии с ассоциативными контейнерами языка программирования высокого уровня (C++, java, C#).

В данной работе в качестве универсального адаптивного аппроксиматора предлагается использовать аппарат специфической реализации нечеткой логики, разработанной в 1998 году в рамках диссертационного исследования Д.О. Глухова и получившей дальнейшее развитие в работах авторов данной публикации [2; 3; 5–8]. Адаптивность предложенной реализации заключается в возможности настройки параметров функций принадлежности под условия конкретного объекта аппроксимации.

Введем оператор определения расстояния между узлами как  $L(n_1, n_2)$ .

Продолжая аналогию с производственной системой, знание об известном давлении распространяется на окружающие фрагменты в соответствии с унимодальной функцией принадлежности, имеющей максимум в заданной точке. Нами предлагается функция принадлежности в пространстве расстояний от узла аппроксимации  $n_i$  до точки  $n$  вида

$$L(n, n_i) < L_{\text{limit}}.$$

Значение искомого параметра, например давления  $P$ , в неизвестной точке  $n$  будет определяться дефазификацией методом центра тяжести при рассмотрении полученных единиц влияния (валидных правил) как синглетонов, а именно:

$$n.P = \frac{\sum_i \varphi(n, n_i) n_i \cdot P}{\sum_i \varphi(n, n_i)}. \quad (1)$$

В нечеткой логике Бозе логические операции И и ИЛИ реализуются в виде операций взятия минимума и максимума соответственно. Поэтому вывод о значении неизвестного параметра строится, как говорят, по минимаксному принципу. Если предикат представляет собой условие в пространстве расстояний между узлом с неизвестным давлением  $n$  и узлом аппроксимации  $n_i$ , а пространство неизвестного параметра (например, давления  $P$ ), то вывод методом центра тяжести будет выглядеть следующим образом:

$$n.P = \frac{\int \max(\varphi(n, n_i)) P dz}{\int \max(\varphi(n, n_i)) dz}. \quad (2)$$

В контексте рассматриваемой задачи оператор  $L$  допускает различные реализации. Мы предлагаем для реализации данного оператора как метрики расстояния между двумя связанными вершинами в графе воспользоваться алгоритмом поиска компонент связности. Этот алгоритм должен быть выполнен для каждой вершины графа  $G$  с известным по телеметрическим данным давлением  $n_p$ .

Пусть контейнер признака доступности узла в рамках запущенного алгоритма поиска компонент связности от узла  $n_p$  FNP.

Поскольку при определении каждого последующего ( $i$ -го) компонента связности узлы предыдущего компонента связности  $n_k$  будут уже иметь вычисленные значения оператора  $L(n_p, n_k)$ , оператор  $L(n_p, n_x)$  для узла  $n_x$  нового компонента связности будет определен на основе уже вычисленного оператора и значения объема фрагмента трубопровода:

$$L(n_p, n_x) = L(n_p, n_k) + l.V^m / l.n_1 = n_k, l.n_2 = n_x, \quad (3)$$

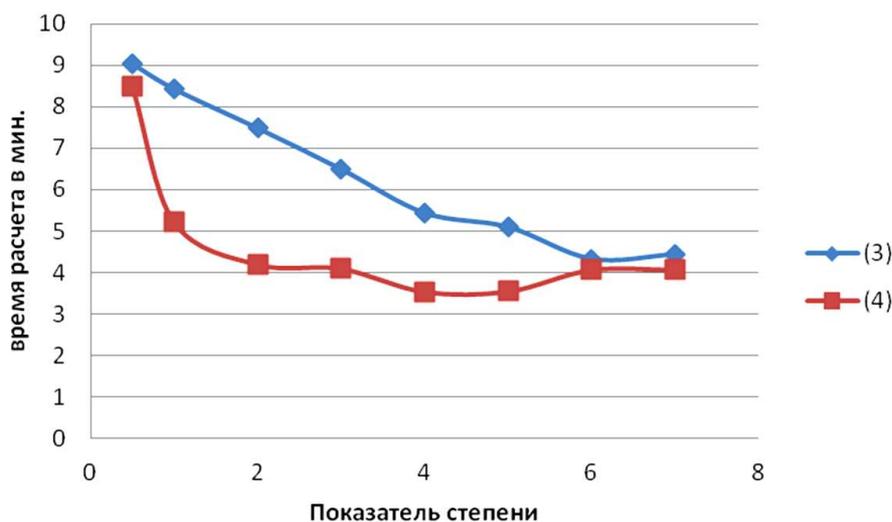
где  $m$  – показатель степени.

Единственной модификацией алгоритма поиска компонент связности будет то, что при проверке доступности узла по контейнеру признака FNP, если узел уже пройден алгоритмом, но значение оператора  $L$ , определенное на основе оператора  $L$  этого узла, меньше текущего вычисленного значения оператора  $L$ , то оно принимается как значение оператора  $L$  рассматриваемого узла.

Нами рассмотрена также вторая реализация оператора  $L$  в виде произведения:

$$L(n_p, n_x) = L(n_p, n_k) \cdot l \cdot V^m / l \cdot n_1 = n_k, l \cdot n_2 = n_x. \quad (4)$$

Результаты сравнительного анализа влияния полученного первого приближения на скорость сходимости (время расчета до момента достижения пороговой невязки системы) приведены на рисунке.



Сравнение реализаций оператора  $L$  (3) и (4) с различными показателями степени  $m$

### Заключение

Предложенный метод получения первого приближения решения стационарной неизоэотермической задачи транспортировки газа на основе нечеткого логического аппроксиматора обладает возможностью параметрической настройки, позволяющей сократить время итерационного алгоритма поиска точного решения. Численные эксперименты показали возможность сокращения времени итерационного процесса поиска точного решения на 60%. Применение мягких вычислений позволяет получать аппроксимации сложных поверхностей, имеющие возможность настройки в определенных пределах на особенности конкретной задачи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений (UML 2) / Гради Буч [и др.]. – 3-е изд. = Object-Oriented Analysis and Design with Applications (3rd Edition). – М. : Вильямс, 2010. – 720 с.
2. Trofimov, V. Algorithm of ecological monitoring by fuzzy production rules / V. Trofimov, A. Gloukhov, D. Gloukhov. – 2-nd International Conference Ecology and Society's Development Abstracts. – St.P. : МАНЭБ, 1997. – P. 166.
3. Глухов, Д.О. Комбинированный алгоритм решения системы нелинейных уравнений газодинамической задачи для сетей транспортировки газа / Д.О. Глухов, А.Ф. Оськин, С.А. Авилкин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, С. Фундаментальные науки. – 2011. – № 4. – С. 8–14.
4. Глухов, Д.О. Комбинированный алгоритм решения системы нелинейных уравнений газодинамической задачи для сетей транспортировки газа с использованием локальных эвристик / Д.О. Глухов, С.А. Авилкин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, С. Фундаментальные науки. – 2011. – № 12. – С. 9–15.
5. Программный комплекс расчета запаса газа в газотранспортной системе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Опыт эксплуатации / Д.О. Глухов [и др.] // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта : сб. тез. VIII междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25–28 нояб. 2014 г. ; редкол.: В.К. Липский [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2014. – С. 143–144.

6. Glukhov, D. Dynamic expert system by fuzzy inference rules to automations an examination of complex objects / Dmitry Glukhov // Budownictwo i Inzynieria Srodowiska. – Zielonogorsk : Politechnika Zielonogorska, 1998. – P. 105–109.
7. Глухов, Д.О. Применение унимодальных функций принадлежности в нечетких производственных системах для решения задач интеллектуального управления динамическими процессами / Д.О. Глухов, А.П. Кастрюк, Т.М. Глухова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2009. – № 3. – С. 115–119.
8. Глухов, Д.О. Мягкие вычисления для организации компьютерного представления номограмм на примере вычисления предельного коэффициента ползучести / Д.О. Глухов, Т.М. Глухова, С.П. Кундас // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2010. – № 3. – С. 2–6.
9. Ахо, А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М. : Мир, 1979. – 536 с.
10. Driankov, D. An introduction to fuzzy control / D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank. – Germany : Springer-verlag, 1993.

Поступила 07.06.2017

**SOFT CALCULATIONS FOR THE DETERMINATION OF THE FIRST APPROXIMATION  
IN ALGORITHMS OF SEARCHING FOR DECISIONS  
OF STATIONARY NEOSOTHERMAL GAS TRANSPORT TASKS**

***D. GLUKHOV, T. GLUKHOVA, R. BOGUSH***

*The optimization of gas transportation modes is considered from the viewpoint of minimizing energy costs, primarily related to the current needs of the pipeline industry. An important component of this problem is the solution of the hydraulic and thermal problems based on the results of mathematical modeling. A method is proposed for obtaining the first approximation of the distribution of pressures through the gas transportation network, which ensures a shortening of the iterative process of finding a solution.*

**Keywords:** *gas transport energy cost minimization, mathematical modeling, hydraulic and thermal tasks, the distribution of pressure.*

УДК 697.341

## К ВЫБОРУ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОвого ПОТОКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕПЛОвой ИЗОЛЯЦИИ ТЕПЛОвых СЕТЕЙ

*А.М. НИЯКОВСКИЙ; канд. техн. наук, доц. Э.И. ГОНЧАРОВ; О.И. МИШУТО  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрено влияние на требуемую эффективность тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей плотности теплового потребления в районе теплоснабжения и величины материальной характеристики сети. Показана взаимосвязь между этими параметрами и коэффициентом полезного действия системы транспорта тепловой энергии. Предложена методика оценки требуемой расчетной плотности теплового потока через изолированную поверхность для проектирования тепловой изоляции в зависимости от геометрических параметров тепловой сети и заданного значения коэффициента полезного действия системы транспорта тепловой энергии.*

**Ключевые слова:** тепловые сети, тепловой поток, расчетная плотность, тепловая изоляция, предлагаемая методика.

Сокращение потребления энергетических ресурсов при одновременном обеспечении высоких эксплуатационных характеристик создаваемых объектов – одно из важных направлений в совершенствовании проектирования тепловых сетей. В связи с этим большое значение приобретает разработка критериев, позволяющих производить оценку состояния теплоизоляционных конструкций теплопроводов на стадии эксплуатации и осуществлять выбор параметров тепловой изоляции при ее проектировании.

Существующие методики расчета толщины теплоизоляционного слоя при проектировании тепловой изоляции трубопроводов основываются на использовании нормативных значений линейной плотности теплового потока через изолированную поверхность, которые могут приниматься не более величин, указанных в соответствующих технических нормативных правовых актах (ТНПА). Нормируемые значения линейной плотности теплового потока применяются и для оценки теплозащитных свойств изоляции при эксплуатации тепловых сетей. Однако и в том, и в другом случае остается невыясненным, в какой степени эти нормы учитывают коэффициент полезного действия сети (КПД), какому его значению соответствует то или иное значение линейных норм плотности теплового потока.

Настоящая работа является продолжением серии опубликованных авторами материалов, посвященных вопросам совершенствования и построения теплоэнергетических систем промышленных предприятий (ТЭСПП) [1; 2; 3]. Нахождение взаимосвязи между плотностью теплового потока с поверхности теплопроводов, геометрическими параметрами сети, ее КПД и плотностью теплового потребления, сложившегося в пределах района теплоснабжения, и является целью представленной работы.

Вопросам влияния на величину КПД тепловой сети ее геометрических параметров и тепловой мощности уделено внимание целого ряда исследований. В частности, в работах [4–6] показана взаимосвязь геометрических параметров тепловой сети, ее нагрузки и КПД, однако не предлагается методика расчета тепловой изоляции, позволяющая обеспечить заданный КПД системы транспорта тепловой энергии при заданных геометрических характеристиках сети в зависимости от плотности теплового потребления.

**Критерии оценки эффективности теплоснабжения и тепловой изоляции.** Большинство критериев, оценивающих эффективность теплоснабжения и транспорта теплоты, основывается на анализе использования первичного топлива. Эффективность использования первичной энергии в системах централизованного теплоснабжения (СЦТ) определяется энергетической эффективностью составляющих ее элементов: источника теплоснабжения, тепловых сетей, тепловых пунктов и теплоиспользующих установок потребителей тепловой энергии. Применительно к рассматриваемому вопросу под энергетической эффективностью (или, в традиционных терминах, под «коэффициентом полезного действия») будем понимать отношение количества энергии, полученной на выходе системы или отдельного ее элемента, к количеству энергии, поступившей на вход системы или ее элемента. Тогда для СЦТ с некогенерационным источником энергии справедливо соотношение:

$$\eta = \frac{\beta_m^{уст} \cdot Q_{номп.}}{\beta_m^{уст} \cdot Q_{омп.} + \beta_m^{уст} \cdot Q_{с.н.}} = \frac{Q_{номп.}}{Q_{омп.} + Q_{с.н.}}, \quad (1)$$

где  $\beta_m^{уст}$  – удельные затраты условного топлива на источнике при производстве энергии;  $Q_{омп.}$  – количество отпущенной источником тепловой энергии;  $Q_{номп.}$  – количество тепловой энергии, переданное по-

ребителям;  $Q_{c.n}$  – объем тепловой энергии, израсходованной на собственные нужды СЦТ, например, на продувку котлов, приготовление теплоносителя и т.п.

Числитель уравнения (1) всегда меньше его знаменателя на величину потерь, которые складываются из непроизводительных затрат первичной энергии на источнике теплоснабжения, тепловых потерь при транспортировке теплоты от источника к потребителям,  $\Delta Q_{m.n.}$ , и тепловых потерь в передаточных устройствах самих потребителей (в тепловых пунктах, теплообменниках и т.д.).

Энергетическая эффективность СЦТ может быть представлена и в виде произведения коэффициентов, определяющих энергетическую эффективность отдельных ее элементов: источника  $\eta_{ист.}$ , тепловой сети  $\eta_{сети}$ , и теплоиспользующих устройств потребителей энергии  $\eta_{номр.}$ :

$$\eta = \eta_{ист.} \cdot \eta_{сети} \cdot \eta_{номр.} \quad (2)$$

По различным оценкам, в реальных условиях эксплуатации КПД источника теплоты составляет в среднем, 70...96%, тепловой сети – 60...92%, теплоиспользующих установок – 80...95%. В итоге суммарный КПД системы теплоснабжения может составлять 35... 85%.

Как видно, наиболее проблемным звеном в этой цепочке являются системы транспорта тепловой энергии – тепловые сети. Коэффициент полезного действия тепловой сети,  $\eta_{mc}$ , представляет собой отношение количества теплоты, переданной потребителям  $Q_{номр.}$ , к количеству теплоты  $Q_{омн.}$ , отпущенной в тепловую сеть источником:

$$\eta_{mc} = \frac{Q_{номр.}}{Q_{омн.}} = \frac{Q_{омн.} - \Delta Q_{m.n.}}{Q_{омн.}}, \quad (3)$$

где  $\Delta Q_{m.n.}$  – разница между отпущенной и потребленной теплотой, равная тепловым потерям при транспорте теплоты в тепловых сетях от источника к потребителям.

Величина тепловых потерь при транспорте энергии находится в прямой зависимости от геометрических параметров тепловой сети: материальной характеристики, суммарной протяженности, среднего диаметра, радиуса действия.

Для анализа эффективности централизованного теплоснабжения также могут использоваться удельная материальная характеристика  $\mu$  и удельная длина  $\lambda$  тепловой сети в зоне действия источника теплоты:

$$\mu = \frac{M}{Q_{сум}}, \quad \lambda = \frac{L}{Q_{сум}}, \quad (4)$$

где  $M$  – материальная характеристика тепловой сети, м<sup>2</sup>;  $Q_{сум}$  – суммарная (расчетная) тепловая нагрузка (тепловая мощность потребления), присоединенная к тепловым сетям, Вт;  $L$  – суммарная длина трубопроводов тепловой сети, образующих зону действия источника теплоты, м.

В свою очередь, материальная характеристика тепловой сети может быть выражена следующим образом:

$$M = \sum d_i \cdot l_i = d_{cp.} \cdot L, \quad (5)$$

где  $d_i$  и  $l_i$  – соответственно диаметры и длины участков, составляющих тепловую сеть, м;  $d_{cp.}$  – средневзвешенный диаметр участков тепловой сети, м.

Одновременное решение уравнений (4) и (5) позволяет получить соотношение, связывающее между собой удельную материальную характеристику сети с ее удельной длиной через средний диаметр:

$$\mu = \lambda \cdot d_{cp.} \quad (6)$$

Чем меньше удельная материальная характеристика сети, тем эффективнее система транспорта тепловой энергии в системе теплоснабжения. Следовательно, удельная материальная характеристика является масштабом соотношения величин тепловых потерь сети и общего объема теплового потребления в ней и может рассматриваться в качестве одного из критериев эффективности сети.

Еще одним критерием, характеризующим эффективность транспорта теплоты, служит величина поверхностной (или линейной) плотности теплового потока,  $q$ , Вт/м<sup>2</sup> (или Вт/м), с поверхности трубопроводов в окружающую среду. Ее рост свидетельствует о снижении КПД тепловой сети.

**Теоретическое обоснование предлагаемой методики расчета тепловой изоляции.** Как следует из уравнения (3), КПД тепловой сети определяется соотношением:

$$\eta_{mc} = 1 - \frac{\Delta Q_{m.n.}}{Q_{номр.} + \Delta Q_{m.n.}} \quad (7)$$

Величина тепловых потерь находится в прямой зависимости от разности средних температур теплоносителя,  $\tau_{cp}$ , и окружающей среды,  $t_{o.c.}$ , поверхности теплообмена и в обратной зависимости от термического сопротивления изоляционной конструкции,  $R_{u.k.}$ , осредненного по всей сети, а поверхность теплообмена пропорциональна длине,  $l_i$ , и диаметру,  $d_i$ , трубопроводов:

$$\Delta Q_{m.n.} = \frac{(\tau_{cp} - t_{o.c.})}{R_{u.k.}} \cdot \pi \cdot \sum d_i \cdot l_i. \quad (8)$$

В приведенном выше выражении можно выделить два комплекса:

$$q_F = \frac{(\tau_{cp} - t_{o.c.})}{R_{u.k.}} \quad \text{и} \quad M = \sum d_i \cdot l_i. \quad (9)$$

Здесь  $q_F$  – плотность теплового потока, отнесенная к единице поверхности материальной характеристики тепловой сети;  $M$  – материальная характеристика сети.

Произведя подстановку уравнений (9) в уравнение (8), получим:

$$\Delta Q_{m.n.} = q_F \cdot \pi \cdot M. \quad (10)$$

Входящая в уравнение (7) величина теплового потребления  $Q_{номр.}$  определяется в зависимости от площади застраиваемой территории, плотности жилой застройки, удельных величин теплового потребления, продолжительности отопительного периода и других характеристик района теплового потребления. В общем виде эта величина, исходя из расчетного годового потребления теплоты применительно к жилой застройке населенного пункта, может быть определена на основании методики, изложенной в [7], Втч:

$$Q_{номр}^{год} = a \cdot F \cdot \left[ q_o \cdot (1 + k_1 + k_1 \cdot k_2) \cdot \frac{t_g^p - t_n^{cp}}{t_g^p - t_{но}^p} \cdot n_o + \frac{q_{зв}}{f} \cdot (n_o + n_{н.о}) \right], \quad (11)$$

а расчетная тепловая нагрузка

$$Q_{номр}^{расч} = q_o \cdot a \cdot F \cdot (1 + k_1 + k_1 \cdot k_2) + q_{зв} \cdot \frac{a \cdot F}{f}, \quad (12)$$

где  $q_o$  и  $q_{зв}$  – соответственно укрупненные показатели максимального расхода теплоты на отопление жилых зданий на 1 м<sup>2</sup> общей площади, Вт/м<sup>2</sup>, среднего расхода теплоты на горячее водоснабжение на одного человека, Вт/чел.;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, учитывающие расход теплоты соответственно на отопление общественных зданий и вентиляцию общественных зданий; при отсутствии конкретных данных принимаются на основании требований [7];  $a$  – плотность жилой застройки, м<sup>2</sup>/га, принимаемая на основании требований [8];  $F$  – площадь застраиваемой территории брутто, га;  $f$  – расчетная норма общей площади на одного человека, м<sup>2</sup>/чел.;  $t_g^p$ ,  $t_{но}^p$ ,  $t_n^{cp}$  – соответственно температура расчетная внутреннего воздуха помещений, расчетная наружного воздуха, средняя наружного воздуха за отопительный период, °С;  $n_o$  и  $n_{н.о}$  – продолжительность отопительного и неотопительного периода, ч.

Материальная характеристика тепловой сети при разработке математической модели может быть вычислена на основании известных соотношений [9]:

$$d_i = A_d \cdot \frac{G_i^{0.38}}{R^{0.19}}, \quad (13)$$

$$M = \sum A_d \cdot \frac{G_i^{0.38}}{R^{0.19}} \cdot l_i; \quad G_i = \frac{Q_{номр.i}}{c \cdot (\tau_1^p - \tau_2^p)};$$

$$M = \sum A_d \cdot \frac{Q_{номр.i}^{0.38}}{R^{0.19} \cdot [c \cdot (\tau_1^p - \tau_2^p)]^{0.38}} \cdot l_i,$$

где  $A_d$  – коэффициент, зависящий от шероховатости труб;  $R$  – удельные потери давления на трение, Па/м;  $\tau_1^p$  и  $\tau_2^p$  – расчетные температуры теплоносителя соответственно в подающей и обратной магистрали тепловой сети, °С;  $G_i$  – расчетный расход теплоносителя на участке сети, кг/с.

Обобщая уравнения (7)–(13), можно получить соотношение, связывающее между собой КПД тепловой сети, плотность застройки, нормированную плотность теплового потока, через изолированную поверхность и материальную характеристику сети:

$$\eta_{m.c} = 1 - \left[ 1 + \frac{a \cdot F \left[ q_o \cdot (1 + k_1 + k_1 \cdot k_2) \cdot \frac{t_6^p - t_n^{cp}}{t_6^p - t_{no}^p} \cdot n_o + \frac{q_{z6}}{f} \cdot (n_o + n_{n.o}) \right]}{q_F \cdot \pi \cdot M \cdot (n_o + n_{n.o})} \right]^{-1}. \quad (14)$$

Из этого уравнения следует зависимость, позволяющая на стадии проектирования принимать величину нормированного теплового потока через изолированную поверхность в зависимости от наперед заданного значения КПД тепловой сети:

$$q_F = \frac{(1 - \eta_{m.c}) \cdot a \cdot F \left[ q_o \cdot (1 + k_1 + k_1 \cdot k_2) \cdot \frac{t_6^p - t_n^{cp}}{t_6^p - t_{no}^p} \cdot n_o + \frac{q_{z6}}{f} \cdot (n_o + n_{n.o}) \right]}{\eta_{m.c} \cdot \pi \cdot M \cdot (n_o + n_{n.o})}. \quad (15)$$

**Формирование расчетной модели.** После подстановки уравнений (13) в уравнение (14) получим

$$\eta = 1 - \left[ 1 + \frac{(a \cdot F)^{0.62} \cdot \left[ q_o \cdot (1 + k_1 + k_1 \cdot k_2) \cdot \frac{t_6^p - t_n^{cp}}{t_6^p - t_{no}^p} \cdot n_o + \frac{q_{z6}}{f} \cdot (n_o + n_{no}) \right] \cdot R^{0.19} \cdot [c \cdot (\tau_1^p - \tau_2^p)]^{0.38}}{2 \cdot \pi \cdot q_{f,i} \cdot A_d \cdot l_i \cdot (1 + \alpha) \cdot (n_o + n_{no}) \cdot \left[ q_o \cdot (1 + k_1 + k_1 \cdot k_2) + \frac{q_{z6}}{f} \right]^{0.38}} \right]^{-1}. \quad (16)$$

Теперь свяжем  $q_F$  и  $\eta_{m.c}$  с удельной материальной характеристикой тепловой сети  $\mu$ . Для этого представим уравнение (3) в следующем виде:

$$\eta_{m.c} = \frac{Q_{omn.}^{zod} - \Delta Q_{m.n.}^{zod}}{Q_{omn.}^{zod}} = 1 - \frac{\Delta Q_{m.n.}^{zod}}{Q_{omn.}^{zod}}, \quad (17)$$

где  $\Delta Q_{m.n.}^{zod}$  – тепловые потери трубопроводами тепловой сети в окружающую среду в течение года;  $Q_{omn.}^{zod}$  – количество теплоты, отпущенной в тепловую сеть с коллекторов источника в течение года.

Объем отпущенной в течение года с коллекторов источника тепловой энергии может быть вычислен путем перехода к средним значениям потребления и тепловых потерь:

$$Q_{omn.}^{zod} = \Delta Q_{m.n.}^{cp} \cdot n_{m.n.} + Q_{nomp.}^{cp} \cdot n_{nomp.}, \quad (18)$$

где  $n_{m.n.}$  и  $n_{nomp.}$  – соответственно годовая продолжительность периода, в течение которого имеют место тепловые потери, и годовая продолжительность периода, в течение которого осуществляется потребление тепловой энергии (в общем случае продолжительность периода потребления теплоты может быть меньше продолжительности периода, когда наблюдаются тепловые потери, например, при сохранении циркуляции в трубопроводах в отсутствие потребления теплоты на горячее водоснабжение), ч.;  $\Delta Q_{m.n.}^{cp}$  и  $Q_{nomp.}^{cp}$  – соответственно средние за год величины мощности тепловых потерь и мощности теплового потребления, Вт.

Переход от максимальной величины мощности теплового потребления к средней может быть осуществлен так:

$$Q_{nomp.}^{cp} = Q_{nomp.}^p \cdot k_t, \quad k_t = \frac{t_6^p - t_n^{cp}}{t_6^p - t_{no}^p}, \quad (19)$$

В результате, уравнение (17) может быть сведено к виду:

$$\frac{1}{1 - \eta_{m.c}} = 1 + \frac{Q_{nomp.}^p \cdot k_t \cdot n_{nomp.}}{\Delta Q_{m.n.}^{cp} \cdot n_{m.n.}}. \quad (20)$$

Приняв во внимание уравнение (4) и отнеся плотность теплового потока через изолированную поверхность к поверхности материальной характеристики сети ( $\pi \cdot M$ ), в итоге получим выражение, связывающее плотность теплового потока,  $q_F$ , исчисленную по величине поверхности материальной характеристики и сети ( $\pi \cdot M$ ), с удельной материальной характеристикой и коэффициентом полезного действия сети, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q_F = \frac{k_{прив.} \cdot (1 - \eta_{мс})}{\pi \cdot \mu \cdot \eta_{мс}}, \quad (21)$$

где  $k_{прив.} = k_i \cdot n_{норм.} / n_{м.п.}$  – коэффициент приведения к среднегодовым параметрам работы системы теплоснабжения;  $\mu$  – удельная материальная характеристика тепловой сети, м<sup>2</sup>/кВт.

Связь между поверхностной,  $q_F$  (Вт/м<sup>2</sup>), и линейной,  $q_l$  (Вт/м), плотностями теплового потока устанавливается соотношением:

$$q_F = q_l / (\pi \cdot d), \quad (22)$$

где  $\pi \cdot d$  – площадь поверхности участка трубопровода единичной длины с диаметром, равным  $d$ .

Совокупность уравнений (4)–(22) представляет собой математическую модель, позволяющую исследовать взаимосвязь между плотностью теплового потока с поверхности тепловой изоляции в окружающей среде, геометрическими параметрами тепловой сети и заданной величиной её КПД с учетом средней плотности теплового потребления в пределах территории района теплоснабжения.

**Полученные результаты.** На основании полученных уравнений осуществлены численные исследования полученной математической модели при изменении ее отдельных параметров:

- определен характер зависимости КПД тепловой сети от плотности жилой застройки при различных значениях суммарной протяженности сети и постоянном значении удельных потерь давления  $R$ , используемом для вычисления диаметров участков;

- выявлен характер зависимости отнесенного к единице поверхности материальной характеристики сети удельного теплового потока в окружающую среду от плотности жилой застройки при различной протяженности сети и постоянной величине удельных потерь давления  $R$ ;

- найдена комплексная взаимосвязь между КПД тепловой сети, плотностью жилой застройки и потребной расчетной плотностью теплового потока с поверхности изоляции в окружающую среду, а также исследована взаимосвязь между плотностью теплового потока в окружающую среду и удельной материальной характеристикой сети при различных наперед заданных значениях КПД тепловой сети.

Результаты численных исследований представлены в графической форме на рисунках 1–3.

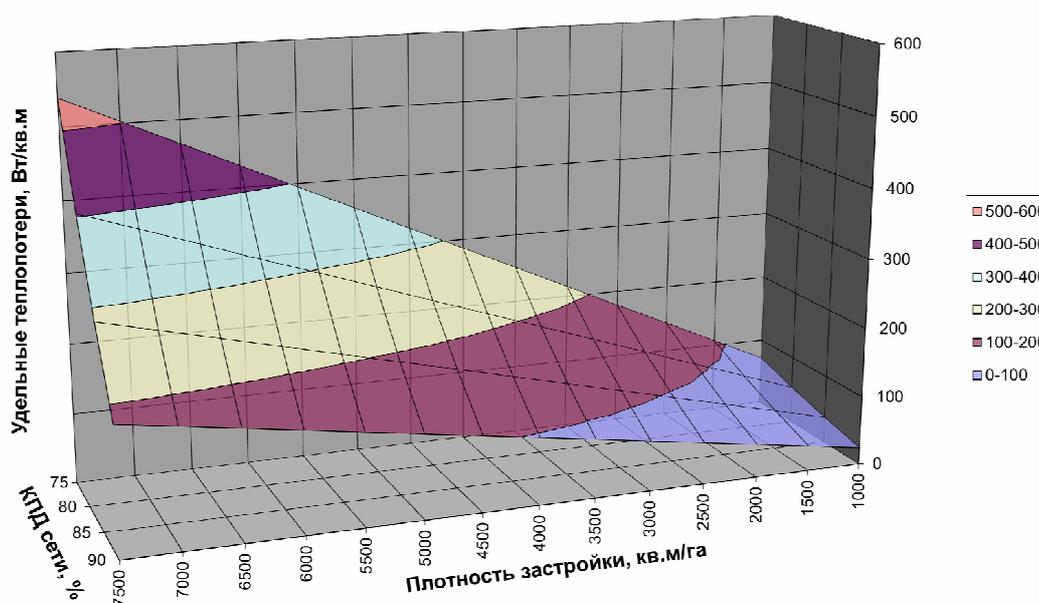


Рисунок 1. – Зависимость плотности теплового потока в окружающую среду от заданного КПД тепловой сети и плотности жилой застройки при постоянной материальной характеристике сети

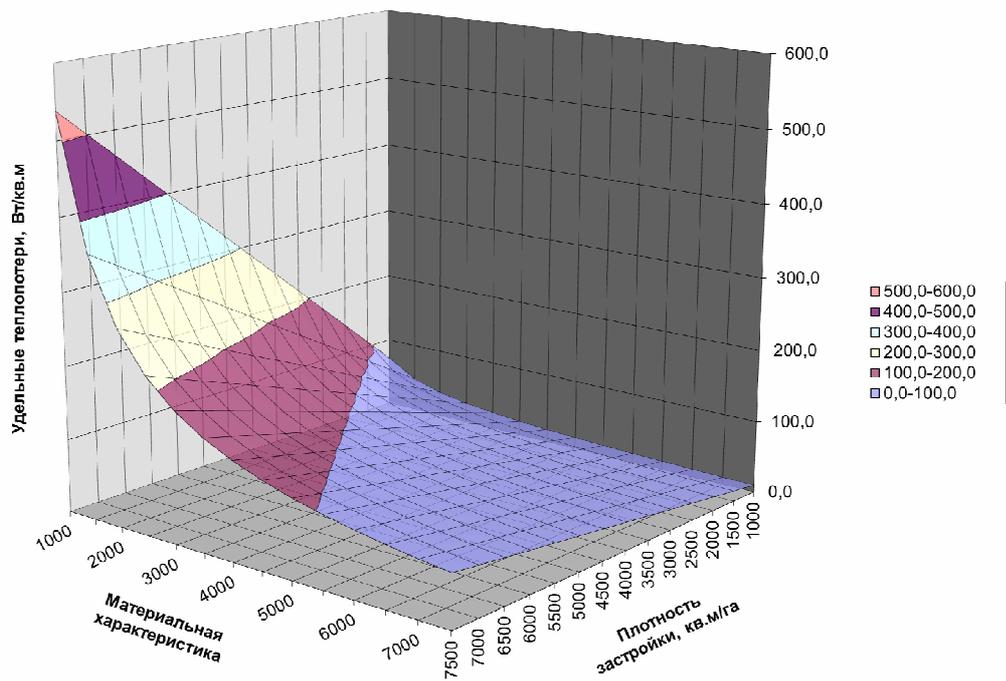


Рисунок 2. – Зависимость плотности теплового потока в окружающую среду от плотности жилой застройки и материальной характеристики сети при заданном КПД тепловой сети в 90%

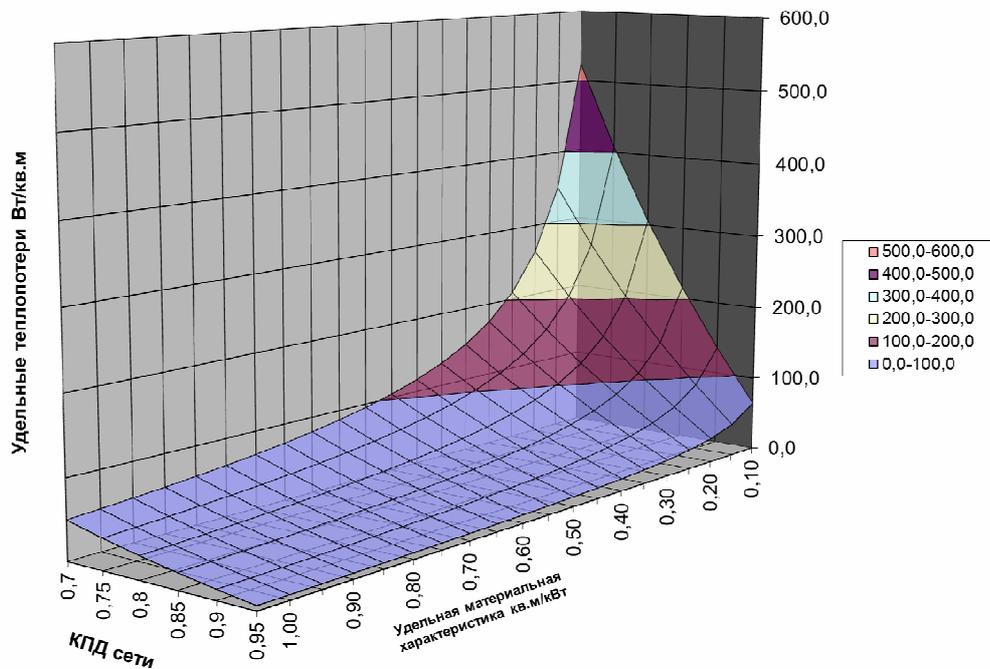


Рисунок 3. – Зависимость плотности теплового потока в окружающую среду от заданного КПД тепловой сети и удельной материальной характеристики сети

- При производстве вычислений приняты следующие параметры работы системы теплоснабжения:
- расчетные температуры теплоносителя в подающей и обратной магистрали 130 и 70 °С соответственно;
  - качественное регулирование тепловой нагрузки по температурному графику 130/70 °С;
  - расчетная температура наружного воздуха (температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92) минус 25 °С;
  - средняя за отопительный период температура наружного воздуха – минус 1,5 °С;
  - продолжительность отопительного периода – 4800 ч;
  - продолжительность неотапливаемого периода – 3600 ч;
  - площадь территории района теплоснабжения – 50 га;
  - норма общей площади на одного жителя – 20 м<sup>2</sup>;
  - нормы расхода теплоты:
    - на отопление – 50 Вт/м<sup>2</sup>,
    - на горячее водоснабжение – 376 Вт/чел.

В таблице 1 представлены результаты вычислений плотности теплового потока и КПД тепловой сети, выполненных с использованием формулы (21), в сравнении с аналогичными показателями, полученными при использовании нормативных значений плотности теплового потока с поверхности изоляции в окружающую среду при бесканальной прокладке [10, таблица 11].

В качестве расчетной модели использована вновь проектируемая тепловая сеть, обеспечивающая нужды отопления и горячего водоснабжения жилой застройки, расположенной на 10 участках площадью 1 га каждый с одинаковой плотностью застройки и при тех же параметрах работы системы теплоснабжения, что указаны выше.

Вычисленная по формуле (21) величина  $q_F$  преобразуется по формуле (22) в среднюю для сети линейную плотность теплового потока, соответствующую среднему диаметру участков тепловой сети.

Отношение полученного таким образом значения (графа 8 таблицы 1, строка «Вся сеть») к среднему нормативному значению линейной плотности (графа 6, та же строка) является поправочным коэффициентом, на который необходимо умножить нормативные величины линейной плотности теплового потока (графа 6), чтобы получить оптимальные значения, обеспечивающие заданное значение КПД тепловой сети в 95% (графа 8).

Таблица 1. – Сравнение расчетов с использованием существующих нормативов с результатами, полученными на основе разработанного метода

№ участка	Максимальная тепловая нагрузка, Вт	Расчетный диаметр, м	Стандартный диаметр, мм	Материальная характеристика, м <sup>2</sup>	Сравнение результатов, полученных:			
					при использовании ТКП 45-4.02-91-2009		при использовании предлагаемой методики	
					нормативная плотность теплового потока, Вт/м	КПД при нормативной плотности теплового потока	оптимальная плотность теплового потока, Вт/м	КПД при расчетной плотности теплового потока
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Плотность застройки 2000 м<sup>2</sup>/га, удельные потери на трение 100 Па/м, заданный КПД сети 95%</i>								
1	1376000	0,093	100	20	<b>76</b>	0,959	<b>58,5</b>	0,968
2	1238400	0,089	80	16	<b>72</b>	0,957	<b>55,5</b>	0,967
3	1100800	0,085	80	16	<b>72</b>	0,952	<b>55,5</b>	0,963
4	963200	0,081	80	16	<b>72</b>	0,945	<b>55,5</b>	0,957
5	825600	0,077	80	16	<b>72</b>	0,937	<b>55,5</b>	0,951
6	688000	0,072	65	13	<b>71</b>	0,926	<b>54,7</b>	0,942
7	550400	0,066	65	13	<b>71</b>	0,909	<b>54,7</b>	0,929
8	412800	0,059	65	13	<b>71</b>	0,883	<b>54,7</b>	0,907
9	275200	0,050	50	10	<b>63</b>	0,850	<b>48,5</b>	0,880
10	137600	0,039	40	8	<b>59</b>	0,751	<b>45,4</b>	0,797
<b>Вся сеть</b>	<b>7568000</b>		<b>средний 70,5</b>	<b>141</b>	<b>в среднем 67</b>	<b>0,933</b>	<b>средняя 51,6</b>	<b>0,95</b>

Окончание таблицы 1

№ участка	Максимальная тепловая нагрузка, Вт	Расчетный диаметр, м	Стандартный диаметр, мм	Материальная характеристика, м <sup>2</sup>	Сравнение результатов, полученных:			
					при использовании ТКП 45-4.02-91-2009		при использовании предлагаемой методики	
					нормативная плотность теплового потока, Вт/м	КПД при нормативной плотности теплового потока	оптимальная плотность теплового потока, Вт/м	КПД при расчетной плотности теплового потока
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Плотность застройки 2500 м<sup>2</sup>/га, удельные потери на трение 100 Па/м, заданный КПД сети 95%</i>								
1	1720000	0,101	100	20	<b>76</b>	0,967	<b>67,2</b>	0,971
2	1548000	0,097	100	20	<b>72</b>	0,965	<b>63,6</b>	0,969
3	1376000	0,093	100	20	<b>72</b>	0,961	<b>63,6</b>	0,966
4	1204000	0,088	80	16	<b>72</b>	0,956	<b>63,6</b>	0,961
5	1032000	0,083	80	16	<b>72</b>	0,949	<b>63,6</b>	0,955
6	860000	0,078	80	16	<b>71</b>	0,940	<b>62,7</b>	0,947
7	688000	0,072	65	13	<b>71</b>	0,926	<b>62,7</b>	0,934
8	516000	0,064	65	13	<b>71</b>	0,904	<b>62,7</b>	0,914
9	344000	0,055	50	10	<b>63</b>	0,876	<b>55,7</b>	0,889
10	172000	0,042	40	8	<b>59</b>	0,791	<b>52,1</b>	0,810
<b>Вся сеть</b>	<b>9460000</b>		<b>средний 76</b>	<b>152</b>	<b>в среднем 73</b>	<b>0,946</b>	<b>средняя 64,5</b>	<b>0,95</b>

**Заключение.** В результате исследования установлено, что величины плотности теплового потока через изолированную поверхность, обеспечивающие высокие значения КПД тепловой сети, существенно зависят от материальной характеристики сети и средней плотности жилой застройки в пределах территории района теплоснабжения. В то же время нормативные значения плотности теплового потока, принимаемые при расчете тепловой изоляции согласно требованиям ТНПА [3], не учитывают этих факторов.

При централизованном теплоснабжении малоэтажной и усадебной застройки плотность застройки, как правило, ниже 2500 м<sup>2</sup>/га, а удельная материальная характеристика тепловой сети имеет высокие значения.

Как следует из графика, приведенного на рисунке 3, с увеличением удельной материальной характеристики допустимая плотность теплового потока через изолированную поверхность трубопроводов тепловых сетей значительно снижается. Величина этого снижения зависит от требований, предъявляемых к КПД тепловой сети. Снижение требуемой плотности теплового потока тем больше, чем выше заданное значение КПД. В этом случае применение нормативных значений плотности тепловых потоков через изолированную поверхность трубопроводов тепловых сетей в соответствии с требованиями [3] может привести к занижению требуемого термического сопротивления изоляционной конструкции и, как следствие, повлечет за собой значительное ухудшение КПД тепловой сети и системы теплоснабжения в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нияковский, А.М. Формирование рациональной теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий при их модернизации / А.М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 103–108.
2. Нияковский, А.М. Интенсификация подъема температуры греющей среды в пропарочных камерах предприятий строительной индустрии / А.М. Нияковский, Э.И. Гончаров, Е.С. Добросольцева // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 101–106.
3. Нияковский, А.М. Управление температурными режимами тепловых сетей с целью снижения энергопотребления в системах теплоснабжения / А.М. Нияковский, В.А. Пшеничнюк, А.В. Григорович // Материалы докл. 48 междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, посвящ. 50-летию университета; Витеб. гос. ун-т. – Витебск, 2015. – С. 76–78.

4. Соколов, Е.Я. Метод определения материальной характеристики и протяженности тепловой сети в пределах площади застройки / Е.Я. Соколов, Г.А. Побегаяев // Изв. вузов. Энергетика. – 1985. – № 3.
5. Папушкин, В.Н. Радиус теплоснабжения. Хорошо забытое старое / В.Н. Папушкин // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 10.
6. Цыганкова, Ю.С. Оценка транспортных потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Ю.С. Цыганкова ; Сиб. федеральный ун-т. – Красноярск, 2012. – 19 с.
7. Тепловые сети. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-4.02-182-2009 (02250). – Введ. 01.07.2010. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2010. – 70 с.
8. Градостроительство. Населенные пункты. Нормы планировки и застройки : ТКП 45-3.01-116-2008 (02250). – Введ. 01.07.2009. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2009. – 83 с.
9. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М. : Издат. дом МЭИ, 2000. – 472 с.
10. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-4.02-91-2009(02250). – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2009.

Поступила 11.05.2017

#### TO THE CHOICE OF HEAT DENSITY IN THE DESIGN OF THERMAL INSULATION OF HEAT SUPPLY PIPELINES

*A. NIYAKOVSKI, A. GONCHAROV, O. MISHUTO*

*The influence of the residential development density and the network geometric characteristics on the required effectiveness of the heat networks pipelines thermal insulation has been reviewed. The correlation between these parameters and the efficiency of the thermal energy transport system is shown. Methodology of the assessment of the required set density of a heat flow through an isolated surface when designing thermal insulation depending on the heat network geometric characteristics and the set efficiency of the heat energy transport system has been suggested.*

**Keywords:** *heat networks, heat flow, the calculated density, thermal insulation, the offered method.*

УДК 620.193.92

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА СТАЦИОНАРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ  
ПРИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЕ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ****В.В. МИТЕЛЕВ; канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрены существующие критерии защищенности трубопроводов. Выявлены проблемы, возникающие при эксплуатации подземных трубопроводов, и рассмотрены существующие теоретические методы определения величины защитного потенциала. Выдвинута гипотеза, что на величину защитного потенциала влияет влажность грунта, являющаяся одним из факторов, изменяющих стационарный потенциал сооружения.*

**Ключевые слова:** катодная защита, стационарный потенциал, защитный потенциал, скорость коррозии, коррозионные повреждения, влажность грунтов.

В соответствии с нормативными документами подземные трубопроводы для защиты от электрохимической коррозии должны быть обеспечены катодной защитой, основывающейся на создании защитного потенциала.

Общепризнанным критерием защиты в мировой практике является минимальный защитный потенциал, который принимают равным  $U_{\text{защ. min}} = -0,85$  В (по медно-сульфатному электроду сравнения). Этот критерий ввел Роберт Кюн в практику электрохимической защиты подземных стальных трубопроводов еще в 1928 году. С тех пор уточнение этого критерия для трубопроводов коснулось в основном названия – к нему добавили слово «поляризационный». Однако опыт эксплуатации показал, что несмотря на применяемую катодную защиту подземные трубопроводы в местах дефектов изоляционного покрытия получают коррозионные повреждения. Следовательно, выяснение причин коррозии катодно-защищенных подземных трубопроводов и поиск оптимальных критериев защиты имеют существенное значение для обеспечения надежной и безотказной работы трубопроводов.

**Основная часть**

Известно, что электрохимическая защита (ЭХЗ) подземных металлических трубопроводов может быть осуществлена методом катодной поляризации, т.е. путем смещения потенциала от его стационарного значения в сторону отрицательных значений до величины защитного потенциала, при котором скорость растворения металла не превышает некоторой заданной величины. При этом в процессе наладки и эксплуатации электрохимической защиты требуется контроль ряда критериев защиты трубопроводов [1].

Под критериями электрохимической защиты понимают теоретически и экспериментально обоснованные значения плотности тока и потенциала защищаемого сооружения, при достижении которых коррозия практически прекращается.

В практике ЭХЗ критериями защиты признаны:

- минимальная защитная плотность тока,  $j_{\text{защ. min}}$ ;
- минимальное защитное смещение потенциала,  $\Delta\varphi_{\text{защ. min}}$ ;
- минимальный защитный потенциал,  $\varphi_{\text{защ. min}}$ ;
- максимальный защитный потенциал,  $\varphi_{\text{защ. max}}$ .

Однако из-за технических трудностей, возникающих при натурных измерениях плотностей токов  $j_{\text{защ}}$  и  $j_{\text{корр}}$ , особенно при исследовании подземных трубопроводов, чаще о качестве защиты судят не по токам  $j$ , а по величине потенциала  $\varphi$  или смещения потенциала  $\Delta\varphi$  [2].

Важной особенностью является то, что с увеличением количества электроэнергии, растрачиваемой на защиту трубопровода от коррозии, пропорционально растет и стоимость обеспечения этой защиты. Следовательно, возникает вопрос о поиске минимальных величин затрачиваемой энергии, обеспечивающих достаточную степень защиты трубопровода.

**Снижение скорости коррозии с увеличением смещения потенциала**

Теоретическое соотношение, позволяющее оценивать степень защиты подземного сооружения в зависимости от величины катодного смещения потенциала, получил В.В. Красноярский [3]. Предлагаемая им расчетная формула может быть представлена в виде

$$\Delta\varphi_{\text{защ. min}} = -0,059 \lg(j_{\text{корр}} / j_a), \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi_{\text{защ. min}}$  – минимальное защитное смещение потенциала, В;  $j_{\text{корр}}$  – первоначальная плотность тока коррозии без ЭХЗ;  $j_a$  – предельно допустимая плотность тока коррозии при включенной ЭХЗ.

Так, для снижения скорости коррозии в 100 раз, т.е. для выполнения условия  $j_{\text{корр}} / j_a = 100$ , необходимо сместить потенциал на величину  $\Delta\phi_{\text{защ. min}} = -0,059 \lg 100 = -0,118$  В. Даже при  $\Delta\phi_{\text{защ. min}} = -0,018$  В скорость коррозии снижается вдвое.

Стандарт NACE – Национальная ассоциация инженеров-коррозионистов (США) – предлагает в качестве минимального защитного смещения потенциала следующие значения:

$\Delta\phi_{\text{защ. min}} = -0,1$  В – для неизолированных сооружений;

$\Delta\phi_{\text{защ. min}} = -0,3$  В – для изолированных трубопроводов.

Первый из этих критериев определен теоретически, что было отмечено выше, как достаточное поляризационное смещение потенциала стали, обеспечивающее примерно 100-кратное снижение скорости коррозии.

Второй критерий учитывает не только поляризационную, но и омическую составляющую смещения потенциала.

Таким образом:

$$\Delta\phi_{\text{защ. min}} = \Delta\phi_{\text{пол. min}} + \Delta\phi_{\text{ом. min}} \quad (2)$$

Так как для защиты достаточно  $\Delta\phi_{\text{защ. min}} = -0,1$  В, то при использовании значения  $\Delta\phi_{\text{защ. min}} = -0,3$  В как критерия защиты, полагают, что величина омической составляющей на изоляционном покрытии любого вида не превышает  $\Delta\phi_{\text{ом. min}} = -0,2$  В.

#### Связь величины минимального защитного потенциала со стационарным потенциалом сооружения

С учетом того, что минимальный защитный потенциал есть минимальное защитное смещение потенциала  $\Delta\phi_{\text{защ. min}} = -0,1$  В, в сумме со стационарным потенциалом  $\phi_{\text{ст}}$  получаем:

$$\phi_{\text{защ. min}} = \phi_{\text{ст}} + \Delta\phi_{\text{защ. min}} \quad (3)$$

при этом диапазон фактических значений  $\phi_{\text{ст}}$  для реального подземного трубопровода, как правило, находится в следующих пределах:  $\phi_{\text{ст}} = -0,4 \dots -0,75$  В.

Следовательно, приемлемый минимальный защитный поляризационный потенциал  $\phi_{\text{защ. min}}$  будет определяться физико-химическими условиями для данного трубопровода и может лежать практически в пределах от  $-0,5$  до  $-0,85$  В. Однако согласно ГОСТ Р 51164-2001 электрохимическая защита должна обеспечивать в течение всего срока эксплуатации непрерывную по времени катодную поляризацию трубопровода на всем его протяжении таким образом, чтобы значения потенциалов на трубопроводе были (по абсолютной величине) не меньше минимального значения, равного  $-0,85$  В. Инфограмма потенциалов подземного трубопровода представлена на рисунке 1.

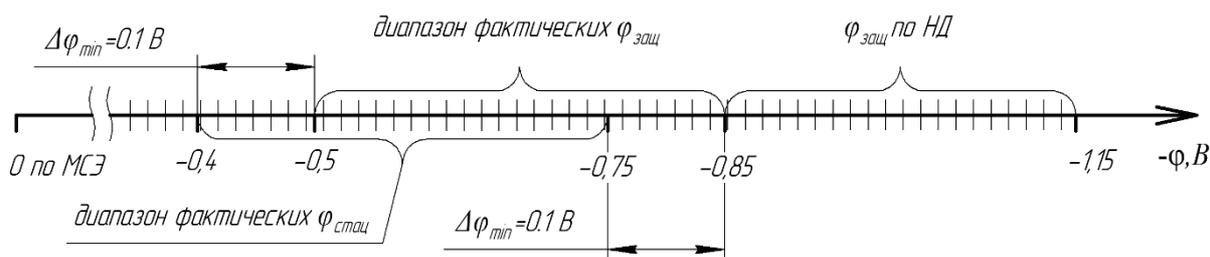


Рисунок 1. – Инфограмма потенциалов подземного трубопровода

Выбор величины  $\phi_{\text{защ. min}}$ , равной  $-0,85$  В, как единственного критерия защиты связан скорее со стандартизацией, унификацией и желанием обеспечить запас надежности.

При более детальном анализе реальных условий прохождения подземного трубопровода и величины стационарного потенциала оказывается, что величина  $\phi_{\text{защ. min}}$ , составляющая  $-0,85$  В, не всегда гарантирует отсутствие коррозионных повреждений. Это обстоятельство приводит к тому, что эксплуатирующие организации необоснованно повышают защитный потенциал, тем самым увеличивая расхода электроэнергии.

В то же время встречаются случаи, когда даже при  $\phi_{\text{защ. min}}$  меньше  $-0,85$  В коррозионные повреждения отсутствуют. Это можно объяснить тем, что фактором, определяющим скорость коррозии, является не величина защитного потенциала, а величина смещения потенциала от его стационарного значения.

При смещении потенциала трубопровода более чем на 0,1 В от его стационарного потенциала скорость коррозии становится пренебрежительно мала, и даже потенциал ниже нормативного будет обеспечивать защиту трубопровода от коррозии. И наоборот, при стационарном потенциале трубопровода в почве меньше  $-0,75$  В (например при  $\varphi_{ст} = -0,78$  В), нормативного минимального защитного потенциала, равного  $-0,85$  В, будет недостаточно для обеспечения минимального смещения, а следовательно, скорость коррозии будет снижена недостаточно, и безотказная работа в период эксплуатации не будет обеспечена.

По величине стационарного потенциала нельзя судить о защищенности подземного сооружения, однако он является показателем коррозионной агрессивности среды и определяет необходимый минимальный защитный потенциал трубопровода.

#### **Влияние величины стационарного потенциала на скорость коррозии**

Исследования, проведенные в различных странах мира в различное время на различных сооружениях и их изоляции от окружающей среды, позволили сделать заключение, что с ростом отрицательного стационарного потенциала коррозия увеличивается.

$$\varphi_0 - \varphi_c = A, \quad (4)$$

где  $\varphi_0$  – равновесный потенциал металла;  $\varphi_c$  – стационарный потенциал сооружения в грунте.

Чем положительнее  $A$  (разность между равновесным потенциалом металла и стационарным потенциалом сооружения в грунте), тем большую величину коррозии можно ожидать [4].

Так, Л.М. Апплгейт установил следующую закономерность скорости коррозии от величины стационарного потенциала:

$-0,15$  В  $\leq \varphi_c$  – коррозия практически отсутствует;

$\varphi_c = -0,15 \dots -0,3$  В – коррозия очень слабая;

$\varphi_c = -0,3 \dots -0,45$  В – коррозия слабая;

$\varphi_c = -0,45 \dots -0,55$  В – коррозия умеренная;

$\varphi_c = -0,55$  В и более – коррозия сильная.

Эта закономерность подтверждается и исследованиями других авторов. Например, Э.П. Мингалев [5], исследуя коррозию подземных сооружений в торфяных грунтах Западной Сибири, установил интервал отрицательных значений стационарных потенциалов, при котором наблюдается наиболее глубокие карверны:  $-0,45 \dots -0,66$  В.

Изучив распределение коррозионных повреждений по длине газопроводов, Е.А. Никитенко [6; 7] пришел к выводу, что измеренные потенциалы вдоль неизолированного трубопровода находятся в следующем диапазоне:  $-0,5 \dots -0,6$  В.

Данные, полученные исследователями, отличаются, так как они проводили измерения в различных грунтах с различными физико-химическими свойствами. Однако общая закономерность сохраняется: с увеличением отрицательного значения стационарного потенциала скорость коррозии возрастает.

#### **Анализ**

По нашему мнению, при известном значении необходимого смещения потенциала величина минимального защитного потенциала определяется значением стационарного потенциала трубопровода в данных условиях, о чем свидетельствуют результаты, полученные в ходе проведения исследования.

Стационарный потенциал зависит от многочисленных факторов почвенной коррозии.

Одним из факторов, имеющим существенное значение для коррозии металла труб, является *влажность грунта*. Обычно под влажностью понимают долю объема грунта, занятого водой (%). Увеличение влажности грунта способствует протеканию анодного процесса, увеличивает электропроводность грунта, но затрудняет протекание катодного процесса.

Вероятно, это связано с тем, что избыток влаги, вытесняя из почвы воздух, затрудняет диффузию основного катодного деполяризатора – кислорода, содержащегося в воздухе, к поверхности металла.

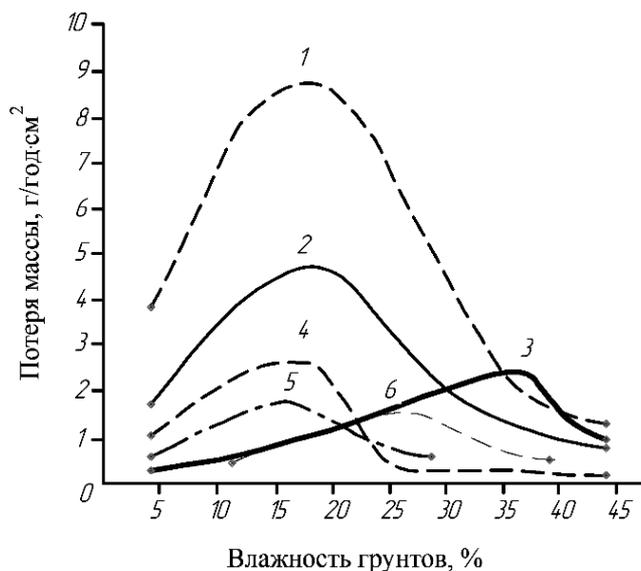
Так, в песке при увеличении влажности с 0 до 20% скорость диффузии кислорода снижается в 10 000 раз. Скорость коррозии стали в глинистых почвах максимальна при влажности 12...35%, а в песчаных – 14...21%. При изменении влажности с 5% до критических значений скорость коррозии в глинах увеличивается примерно в 10 раз, а в песках – примерно в 3 раза [8]. Таким образом, функция зависимости скорости коррозии металлов от влажности почвы имеет экстремум.

Зависимость скорости коррозии как от стационарного потенциала, так и от влажности дает основание для выдвижения гипотезы о влиянии влажности почвы на стационарный потенциал подземных сооружений:

*Величина минимального защитного потенциала не является константой, а определяется значением стационарного потенциала трубопровода в конкретных условиях, и одним из значимых факторов является влажность почвы.*

Определение зависимости стационарного потенциала от влажности позволит судить об изменении необходимой величины минимального защитного потенциала при изменении влажности почвы.

На рисунке 2 проиллюстрировано влияние влажности на скорость коррозии стали.



1 – солончаковый песок; 2 – солончаковый суглинок;  
3 – верхний слой чернозема; 4 – крупнозернистый песок;  
5 – мелкозернистый глинистый песок; 6 – бурая глина

Рисунок 2. – Влияние влажности на скорость коррозии стали

В заключение исследования по результатам проведенного анализа литературных источников и работ исследователей-коррозионистов можно сделать следующие **выводы**:

- Основным критерием катодной защиты традиционно считается величина минимального защитного потенциала, который в нормативных документах принят равным  $-0,85$  В.
- Как показал опыт эксплуатации подземных трубопроводов, нормативная величина минимального защитного потенциала не всегда является оптимальной.
- Значение минимального защитного потенциала напрямую зависит от стационарного потенциала сооружения, так как скорость коррозии определяется минимальным защитным смещением потенциала.
- Стационарный потенциал является показателем коррозионной опасности среды и зависит от многих факторов.
- Один из важнейших факторов подземной коррозии является влажность грунта.

Исходя из данных выводов выдвинута *гипотеза* о влиянии влажности почвы на стационарный потенциал подземных сооружений. Выявление данной зависимости имеет существенное значение в изучении процессов подземной коррозии. Почва представляет собой многофакторную коррозионную среду, и необходимо планомерное изучение влияния каждого из внешних факторов на величину защитного потенциала, что будет способствовать разработке системы общей оценки коррозионной опасности почвы в месте прохождения подземного трубопровода и подобрать оптимальные критерии его защищенности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Об оценке технического состояния подводных переходов магистральных трубопроводов / А.И. Вегера [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, В. Промышленность. Прикладные науки. – 2006. – № 3. – С. 137–142.

2. Кузнецов, М.В. Коррозия подземных стальных трубопроводов при катодной защите / М.В. Кузнецов, А.М. Кузнецов // Моделирование технологических процессов бурения, добычи и транспортировки нефти и газа на основе современных информационных технологий : материалы всерос. науч.-техн. конф., Тюмень, 20–22 мая 1998 г. ; Тюмен. индустриал. ун-т ; редкол.: В.Н. Сомов (отв. ред.) [и др.]. – Тюмень, 1998. – С. 168.
3. Красноярский, В.В. Коррозия и защита подземных металлических сооружений. – М. : Высш. школа, 1968. – 296 с.
4. Палашов, В.В. Электродинамическая модель определения полноты катодной защиты / В.В. Палашов, В.В. Притула, О.В. Палашов. – М. : Акела, 2005. – 195 с.
5. Мингалев, Э.П. Коррозия подземных промысловых трубопроводов в торфяных грунтах Западной Сибири / Э.П. Мингалев. – М. : ВНИИОНГ, 1976. – 28 с.
6. Никитенко, Е.А. Монтер по защите подземных трубопроводов от коррозии / Е.А. Никитенко, Я.М. Эдельман. – М. : Недра, 1981. – 254 с.
7. Никитенко, Е.А. Электрохимическая коррозия и защита магистральных газопроводов / Е.А. Никитенко. – М. : Недра, 1972. – 120 с.
8. Красноярский, В.В. Подземная коррозия металлов и методы борьбы с ней / В.В. Красноярский, А.К. Ларионов. – М. : Изд-во МКХРСФСР, 1962.

*Поступила 24.03.2017*

#### **THE EFFECT OF HUMIDITY ON THE STATIONARY POTENTIAL UNDER CATHODIC PROTECTION OF UNDERGROUND PIPELINES**

**V. MITSELEV, A. KULBEI**

*The article examines the existing criteria for protection of pipelines. Underground pipelines maintenance induced problems were identified and the existing theoretical methods of determining the protection potential value were examined as well. The hypothesis, that the protection potential magnitude is affected by soil moisture, which is one of the factors modifying stationary potential of the structures, has been produced.*

**Keywords:** *cathodic protection, stationary potential, protection potential, rate of corrosion, corrosion damage, soil moisture.*

УДК 620.193.92

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ГАЗОПРОВОДОВ  
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИНТЕНСИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

*А.В. ПРИЩЕП; канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрены методы контроля состояния изоляционных покрытий подземных газопроводов. Выделены основные цели, задачи и результаты электрометрических обследований на подземных газопроводах. Выполнен анализ методов интенсивных измерений и сделан вывод о целесообразности применения каждого метода.*

**Ключевые слова:** *катодная защита, защитный потенциал, коррозионные повреждения, изоляционные покрытия, интенсивные измерения.*

Металлические газопроводы подвергаются разрушающему воздействию коррозии и поэтому нуждаются в эффективной противокоррозионной защите. Подземные газопроводы, проложенные непосредственно в земле, подвергаются коррозии ввиду того, что почвы, в состав которых входят минералы, различные органические вещества и влага, образуют электролиты, которые являются коррозионными средами. Таким образом, на подземных газопроводах протекают процессы, характерные для электрохимической коррозии.

На подземных газопроводах наиболее часто встречаются следующие виды электрохимической коррозии:

- *почвенная* – происходит под воздействием почв и грунтов;
- *электрокоррозия* – вызвана токами утечки (с рельсов электрифицированного транспорта, промышленных установок);
- *контактная* – происходит под воздействием контакта металлов, имеющих в данном электролите разные стационарные потенциалы.

Прекращение коррозионного процесса на наружной поверхности трубопровода реализуется путем наложения на трубопровод внешнего тока либо нанесением на наружную поверхность трубопровода изоляционного покрытия. Применение первого способа именуется активной защитой, второго – пассивной. Таким образом, изоляционные покрытия трубопроводов выполняют функцию пассивной защиты, а катодная поляризация – активной.

Известно, что даже качественно выполненное изоляционное покрытие в процессе эксплуатации теряет свои диэлектрические свойства, водостойкость, адгезию [1]. Также при засыпке трубопроводов в траншею, при их температурных перемещениях, при воздействии корней растений могут образовываться повреждения изоляции. Кроме того, в покрытиях остается некоторое количество незамеченных при укладке трубопровода дефектов. Следовательно, изоляционные покрытия не гарантируют необходимой защиты подземных трубопроводов от коррозии. Исходя из этого, в нормативной документации [2] предусмотрено, что защита трубопроводов от подземной коррозии независимо от коррозионной активности грунта и района их прокладки должна осуществляться комплексно защитными покрытиями и средствами электрохимической защиты (ЭХЗ).

Изолирующие покрытия являются основным видом защиты подземных газопроводов от коррозии, а катодная поляризация – вспомогательным, для защиты прежде всего мест оголенной трубы (поверхности трубы в местах наличия в изоляционном покрытии пор, трещин и других дефектов) путем поддержания необходимого по величине защитного потенциала.

Катодная поляризация трубопровода осуществляется от внешнего источника постоянного тока – специальных установок катодной защиты (УКЗ) или путем подключения протекторов. Основным параметром, определяющим качество катодной защиты, является защитный потенциал ( $U_{т-з}$ ) – электродный потенциал металлоконструкции относительно грунта (земли). Его величина устанавливается таким образом, что коррозионные реакции либо не идут вообще, либо идут с такой скоростью, что ими можно пренебречь.

Катодная защита регламентируется путем поддержания необходимого защитного потенциала, который измеряется между трубопроводом и медно-сульфатным электродом сравнения.

Электрохимическая защита должна обеспечивать в течение всего срока эксплуатации непрерывную по времени катодную поляризацию трубопровода на всем его протяжении (и на всей его поверхности) таким образом, чтобы значения потенциалов на трубопроводе были (по абсолютной величине) не меньше минимального и не больше максимального значений. Значения минимального и максимального за-

щитных потенциалов зависят от условий прокладки и эксплуатации трубопровода, а именно удельного электрического сопротивления грунта и температуры транспортируемого продукта (приведены в [2]).

Для обеспечения эффективной противокоррозионной защиты подземных трубопроводов должны регулярно контролироваться, учитываться и регулироваться различные параметры. Контроль состояния (качества) изоляционных покрытий и эффективности катодной защиты на подземных трубопроводах достигается путем выполнения соответствующих электрометрических обследований (измерений).

#### Электрометрические измерения на подземных трубопроводах

Авторами данной работы изложено свое видение основных целей, задач и результатов электрометрических обследований некоторых объектов (рисунок 1).



Рисунок 1. – Цели, задачи и результаты электрометрических обследований

Основными целями электрометрических измерений на подземных трубопроводах являются:

- оценка состояния электрохимической защиты участка трубопровода;
- оценка состояния изоляционного покрытия участка трубопровода.

Электрометрические измерения по оценке состояния электрохимической защиты участка трубопровода входят в состав обследования, при котором выявляется состояние всех средств электрозащиты, определяется состояние электрозащищенности участка по протяженности и во времени, а также возможность стопроцентного обеспечения защиты.

Электрометрические измерения по оценке состояния изоляционного покрытия участка трубопровода входят в состав обследования, при котором предусматривается определение обобщенных сравнительных оценок состояния изоляции протяженных участков, а также выявление каждого места сквозного дефекта изоляции и оценка масштабов дефектности на каждом погонном метре трубопровода.

В обоих случаях исследования направлены на выявление и устранение мест и участков трубопровода, в которых из-за нарушения качества противокоррозионной защиты коррозионные повреждения являются потенциально возможными.

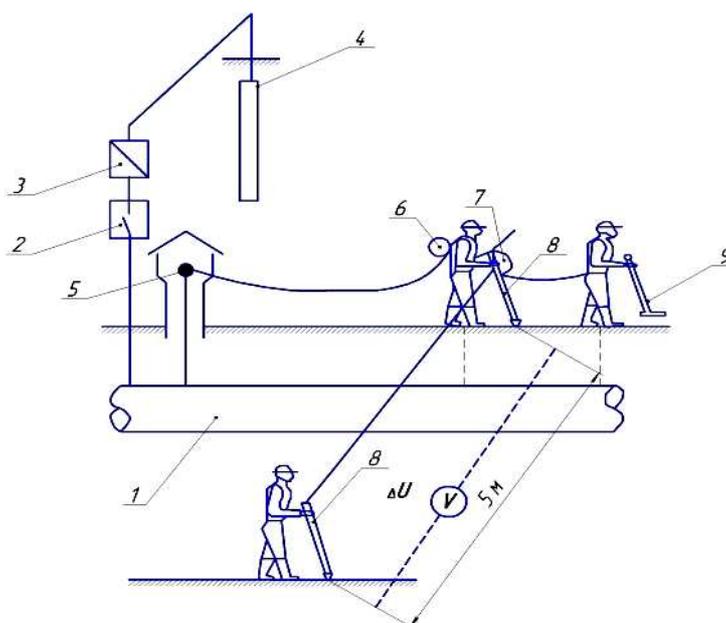
В Беларуси для оценки работы средств защиты от коррозии путем проведения интенсивных измерений достаточно широко используются измерительные комплексы, например «MoData», который включает в свой состав измерительную аппаратуру для проведения измерений и сбора данных. Такие измерительные комплексы позволяют получить данные об эффективности работы установленных средств электрозащиты и состоянии изоляционного покрытия, определить характер взаимного влияния электрохимической защиты, установленной на соседних подземных сооружениях, и по полученным данным судить о возможности коррозионных повреждений трубопровода. При проектировании новых подземных газопроводов необходимо проводить измерения, позволяющие определить параметры грунтов на намечаемой трассе, наличие и характер влияния источников блуждающих токов. Измерения разности потенциалов «труба – земля» ( $U_{Т-З}$ ), играют первостепенную роль в определении коррозионного состояния газопровода, выявлении опасных в коррозионном отношении участков.

### Интенсивные электроизмерения

Метод «интенсивных измерений» является основным методом электроизмерений. Суть метода «интенсивных измерений» сводится к измерениям с малым шагом (2...5 м) определенных электрохимических параметров трубопровода при фиксированных режимах работы установок катодной защиты (УКЗ), влияющих на защиту обследуемого участка трубопровода, и последующим математическим вычислениям с результатами этих измерений [3]. Результаты измерений и «привязку» точки, в которой выполнены измерения, вводят в память компьютера. Для точного определения потенциала «труба – земля» необходимо, чтобы все станции катодной защиты (СКЗ) участка проведения измерений отключались одновременно. Для этого используют специальные синхронные выключатели, которые подключаются к сети станции и одновременно по радиосигналу размыкают цепь СКЗ. Разность срабатывания таких выключателей составляет 2...3 мкс [4].

Методы «интенсивных измерений» позволяют локализовать единичные сквозные дефекты на фоне качественного изоляционного покрытия и оценивать защищенность трубопровода в этих дефектах. На трубопроводах с некачественным покрытием их результаты, как правило, только констатируют неудовлетворительное состояние изоляции. Однако методы «интенсивных измерений» не дают количественных характеристик состояния изоляционных покрытий обследованных участков подземных трубопроводов. Особенно неэффективны «интенсивные измерения» на участках трубопроводов, подверженных влиянию блуждающих токов [5]. Корректная область применения методов «интенсивных измерений» – трубопроводы с изоляцией, построенные с учетом требований [2], и для этих трубопроводов «интенсивные измерения» является наиболее эффективным методом обследования.

На практике такие измерения проводятся согласно рисунку 2, на котором представлен *двухэлектродный метод* – широко известный метод интенсивных измерений.



- 1 – трубопровод; 2 – прерыватель тока УКЗ;  
 3 – преобразователь; 4 – анодное заземление; 5 – КИП;  
 6 – катушка с проводом; 7 – измерительный прибор (MoData);  
 8 – медно-сульфатный электрод; 9 – трассоискатель

Рисунок 2. – Двухэлектродный метод электроизмерений

Один человек определяет местонахождение оси трубопровода прибором-трассоискателем и перемещает измерительный шнур, которым отмечается расстояние в 2...5 м (шаг измерения). Второй – измеряет падение напряжения в грунте между электродами сравнения, находящимися над трубопроводом и на определенном расстоянии (5 м) перпендикулярно к нему для определения местонахождения повреждений изоляционного покрытия. Третий человек измеряет потенциал «труба – земля» относительно электрода сравнения, установленного над осью трубопровода.

Поскольку для измерения потенциала «труба – земля» необходимо подключение к трубопроводу, то это подключение переносится от одного КИП к другому с помощью кабельной катушки вплоть до его

достижения. В целях повышения экономичности работы при проведении таких измерений используются приборы мобильного сбора данных на компьютерной основе. При помощи подключенного преобразователя сигналов измеряемые значения фиксируются напрямую, обрабатываются и накапливаются. Таким образом, весь процесс измерений от замера величин, их обработки и архивирования занимает минимум времени.

При таком методе измеряется потенциал включения и выключения, а также воронка включения и выключения в каждом пункте измерения. С помощью этих величин получают следующую информацию:

- начальную информацию о состоянии катодной поляризации трубопроводов на местах;
- указания на большие повреждения в изоляционном покрытии и оценивают их величину;
- информацию о состоянии катодной поляризации в зоне больших повреждений покрытия.

Измерения потенциала включения и выключения производятся при непосредственном подключении к измерительным контактам КИП. Измерение воронки включения и выключения производится на максимально возможном удалении от оси трубопровода (от 5 до 10 м). Для лучшего сравнения значений воронки напряжений ее измерение необходимо проводить по возможности на постоянном расстоянии, перпендикулярном к оси трубопровода. С точки зрения проведения технических измерений двухэлектродный метод является простейшим, так как показания снимаются непосредственно на КИП без суммирования расчетов.

*Трехэлектродный метод* – расширенный двухэлектродный метод, т.е. двухэлектродный метод с расширенными возможностями. В отличие от двухэлектродного, при трехэлектродном методе измеряются два значения воронки напряжения с обеих сторон оси трубопровода [5]. Благодаря одновременному измерению потенциала и обеих воронок напряжения слева и справа от оси трубопровода измерительный комплекс позволяет рассчитать потенциал, свободный от омической составляющей, методом экстраполяции.

Особым достоинством трехэлектродного метода является возможность интерпретации данных интенсивных измерений, полученных на участках с параллельно проложенными трубопроводами. Воронка напряжения от соседнего трубопровода с одной стороны оси проверяемого трубопровода может быть устранена при обработке данных измерений и при оценке значений измерений могут быть сделаны более правильные выводы.

Трехэлектродный метод часто применяется на участках трубопровода с дефектами изоляции, предварительно определенными по IFO-методу.

Измерение воронок напряжения в сочетании с расчетом потенциала, свободного от омической составляющей, в большинстве случаев позволяет сделать более точные, чем при других методах измерений, выводы об эффективности катодной защиты на участках с поврежденной изоляцией.

*Метод суммирования* – также метод интенсивных измерений, позволяет путем простого измерения падений напряжений вдоль трубопровода рассчитать потенциал и воронку напряжения в каждой точке объекта.

Метод базируется на предположении, что воронка напряжений между электродами, расположенными на участке земли, отдаленном от трубопровода, равна 0 мВ.

Этот метод может быть успешно применен на протяженных трубопроводах в случае отсутствия блуждающих токов. По сравнению с обычным методом интенсивных измерений он более экономичен и производителен.

*IFO-метод* (интенсивное определение участков дефектов изоляции) также может быть отнесен к методам с интенсивным измерением. В основном его применяют на новых трубопроводах с высококачественной изоляцией и с малым количеством дефектов изоляции.

IFO-метод служит только для обнаружения мест дефектов изоляции. Контроль потенциалов при этом методе не производится. Для контроля потенциалов на КИП во время IFO-измерений необходимо перейти на двухэлектродный метод.

Во многих случаях во время применения IFO-метода ток катодной станции следует преднамеренно увеличить (что смещает потенциал в наиболее отрицательную область), в целях оптимизации измерения наименьших разностей напряжений.

### **Выводы**

Естественно, что каждый из вышеописанных методов интенсивных измерений может быть оптимально использован лишь в каких-то конкретных условиях, в связи с чем для подземных газопроводов всегда должен производиться предварительный выбор метода для заданных условий эксплуатации.

С точки зрения технических измерений двухэлектродный метод является простейшим, но в то же время необходимое измерение воронки напряжения с как можно большим и постоянным поперечным удалением от оси трубопровода (например, 5 м) осложняет снятие показаний на труднопроходимых участках и в черте города.

Измерение трехэлектродным методом требует участия большого количества персонала. Двухстороннее измерение воронки напряжения как можно с большим и постоянным расстоянием между электродами (например, 10 м между двумя электродами) приводит к уменьшению дневной выработки на труднопроходимых участках. Однако трехэлектродный метод имеет особое преимущество при интерпретации данных интенсивных измерений на участках с параллельно пролегающими трубопроводами. Воронка напряжения от соседнего трубопровода с одной стороны оси проверяемого трубопровода может быть устранена при обработке данных измерения, вместе с тем предоставляется возможность сделать более правильные выводы.

ИГО-метод можно отнести к методам, применяемым на новых трубопроводах с высококачественной изоляцией и незначительным количеством дефектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Об оценке технического состояния подводных переходов магистральных трубопроводов / А.И. Вегера [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, В. Промышленность. Прикладные науки. – 2006. – № 3. – С. 137–142.
2. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии : СТБ ГОСТ Р 51164-2001 : утв. и введен в действие постановлением Госстандарта Респ. Беларусь от 29 дек. 2001 г. № 54. – Минск.
3. Остапенко, В.Н. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии / В.Н. Остапенко, Л.Н. Ягупольская, В.В. Лукович. – Киев : Наук. думка, 1988. – 245 с.
4. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Т. 1. Справочник / под ред. А.А. Герасименко. – М. : Машиностроение, 1987. – 687 с.
5. Рекомендации по электрическим измерениям изысканиям. – М. : ВНИИСТ, 1968. – 73 с.
6. Инструкция по контролю состояния изоляции законченных строительством участков трубопроводов катодной поляризацией. – М. : ВНИИСТ, 1976. – 47 с.

*Поступила 17.05.2017*

#### QUALITY CONTROL OF THE ANTI-RUSTING PROTECTION OF GAS LINES BY THE METHOD OF INTENSIVE MEASUREMENTS

*A. PRISHCHER, A. KULBEI*

*The condition monitoring methods of insulation coatings of underground gas lines are studied. There were identified main goals, tasks and the results of underground gas lines electrometric surveys. The analysis of intensive measurements methods and the conclusion about expediency of each method usage were made.*

**Keywords:** *cathodic protection, protection potential, corrosion damage, insulation coating, intensive measurements.*

## ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 528.7

### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЗОРНОЙ ЦИФРОВОЙ КАМЕРЫ, ВСТРОЕННОЙ В ЭЛЕКТРОННЫЙ ТАХЕОМЕТР ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА; канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ  
(Полоцкий государственный университет);  
Д.О. ВОЛКОВ

(Витебское агентство по государственной регистрации и земельному кадастру)

Рассмотрена возможность использования снимков, полученных с помощью цифровой камеры, встроенной в тахеометр в строительстве. Объектив цифровой камеры мал, возможно, состоит из одной линзы, поэтому будет давать большие искажения, обусловленные дисторсией. Для уменьшения искажений необходимо калибровать цифровую камеру в ходе, которой определять не только элементы внутреннего ориентирования, но и величины дисторсии по полю изображения. В этом случае можно будет использовать цифровую камеру как для составления абрисов, так и для создания панорамы сооружения или создания плана фасада здания, хотя и пониженной точности.

**Ключевые слова:** фотограмметрия, цифровая камера, тахеометр, дисторсия, искажения.

В современных условиях с развитием цифровых технологий улучшаются характеристики цифровых камер. Качество изображения, получаемое с помощью цифровых камер, повышается, снижается энергопотребление, и камеры, при необходимости, могут обладать сравнительно небольшими размерами. Это привело к тому, что стали все чаще применять цифровые камеры, встроенные в тахеометры, которые упрощают производство полевых и камеральных работ. Последнее время фирма LEICA выпускает электронные тахеометры со встроенной цифровой камерой. Примером такого тахеометра может служить тахеометр *LeicaNovaMS50*, внешний вид которого показан на рисунке 1 [1].

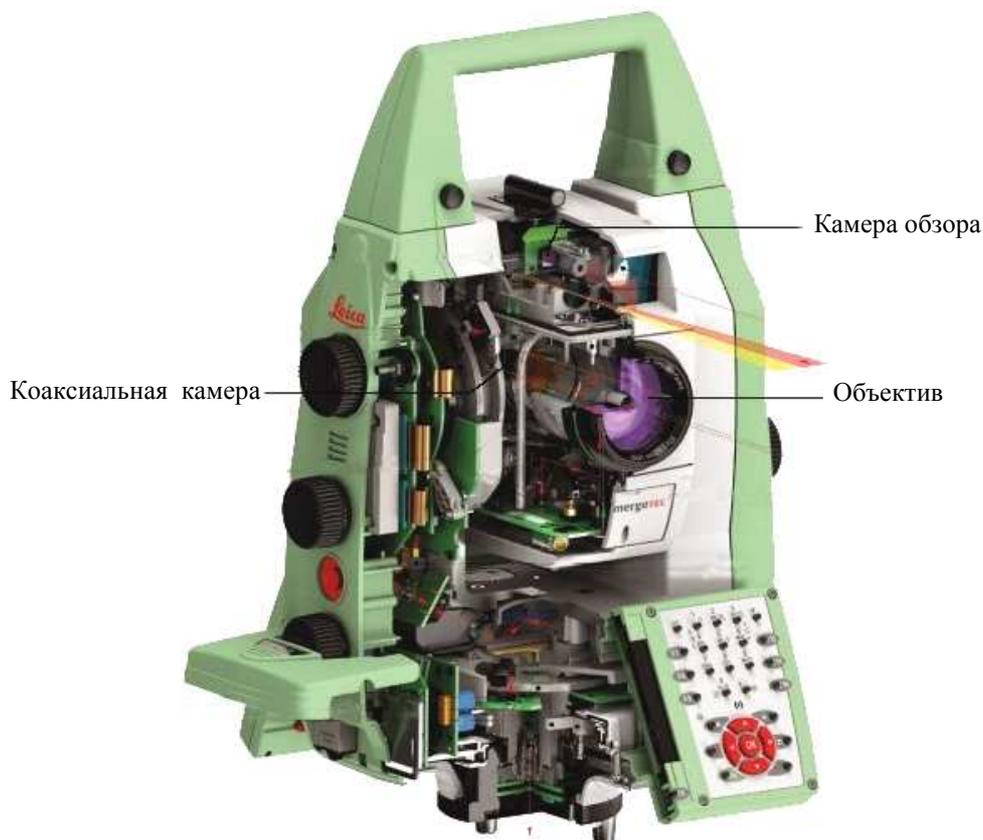


Рисунок 1. – Электронный тахеометр со встроенной цифровой камерой

Обзорная камера служит для предварительного наведения. Снимки, полученные этой камерой, могут использоваться в качестве абриса.

Технические характеристики обзорной камеры приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1. – Технические характеристики обзорной цифровой камеры

Технические характеристики, наименование	Технические характеристики, значения
Тип датчика	CMOS (5 Мп)
Фокусное расстояние, мм	21
Поле зрения	15,5°×11,7° (19,4° по диагонали)

От параметров объектива цифровой камеры и ее светочувствительной матрицы зависит качество получаемого изображения. Рассмотрим влияние этих параметров.

*Объективы* – оптические устройства, проецирующие изображения на плоскость. Обычно состоят из набора линз, рассчитанных для взаимной компенсации aberrаций и собранных в единую систему внутри оправы [3]. Большинство aberrаций влияет на качество изображения, а дисторсия объектива – на геометрию построенного изображения. Дисторсия приводит к нарушению подобия между предметом и изображением. Как отмечают авторы [4], искажения, обусловленные дисторсией объектива цифровой камеры, могут внести искажения в полученные координаты до 500 мкм.

При фотограмметрических построениях требуется высокая точность окончательных результатов, которых невозможно достичь при большой дисторсии. Влияние дисторсии может быть уменьшено путем проведения калибровки и определения не только элементов внутреннего ориентирования камеры, но и поправок за дисторсию. В ходе калибровки были определены углы между визирной осью тахеометра и оптической осью цифровой камеры и отрезки между центром вращения тахеометра и главной точкой объектива. Однако калибровка самой цифровой камеры, т.е. определение элементов внутреннего ориентирования камеры и величин дисторсии по полю изображения, не выполнялась.

Для уменьшения дисторсии устанавливают диафрагму строго посередине между линзами объектива. Из рисунка 1 видно, что объектив камеры обзора очень мал и вряд ли состоит из системы линз, компенсирующих aberrации, кроме того в характеристиках цифровой камеры (таблица 1) не указан диаметр относительного отверстия и есть ли диафрагма вообще. Полагаем, что диафрагмой служит оправка объектива. Относительное отверстие играет важную роль при энергетических расчетах объектива и влияет на качество изображения [5]. Величина относительного отверстия объектива рассчитывается по формуле [5; 6]:

$$\frac{1}{n} = \frac{d}{f}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр действующего отверстия объектива;  $f$  – величина фокусного расстояния.

Примем за диаметр действующего отверстия объектива  $d$  внутренний размер оправы, величина фокусного расстояния приведена в таблице 1, тогда  $1/n = 1/9,1$ . При конструировании аэрофотоаппаратов принимают  $n = 4 \dots 9$ . При  $n$  менее четырех снижается качество изображения, так как велико влияние aberrации, а при  $n$  более 9-ти на качество изображения влияет дифракция [6; 7].

Вследствие дифракции лучи света отклоняются от первоначального направления. В результате реальная оптическая система изображает точку предмета не точкой, а в виде так называемого дифракционного кружка, представляющего собой серию чередующихся светлых и темных концентрических колец с ярким центральным пятном (рисунком 2) [8].



Рисунок 2. – Дифракционный кружок

Если оптическая система изображает две близкие между собой точки, дифракционные кружки от каждой из них, налагаясь один на другой, образуют сложную дифракционную картину.

Если допустить, что два дифракционных кружка накладываются один на другой так, что максимум (центральное светлое пятно) одного кружка совпадает с первым минимумом (первым темным кольцом) другого, т.е. расстояние между центрами обоих дифракционных кружков равно радиусу  $\sigma$  первого темного кольца. В этом случае распределение освещенности в сложной дифракционной картине представляется огибающей  $ACB$ , изображенной на рисунке 3 [8].

Как видим, дифракционная картина состоит из двух максимумов в точках  $A$  и  $B$  и одного минимума в точке  $C$  и составляет 74% освещенности в точках  $A$  и  $B$ . При такой разнице в освещенности наблюдатель еще может разделить два максимума, а следовательно и две точки [8].

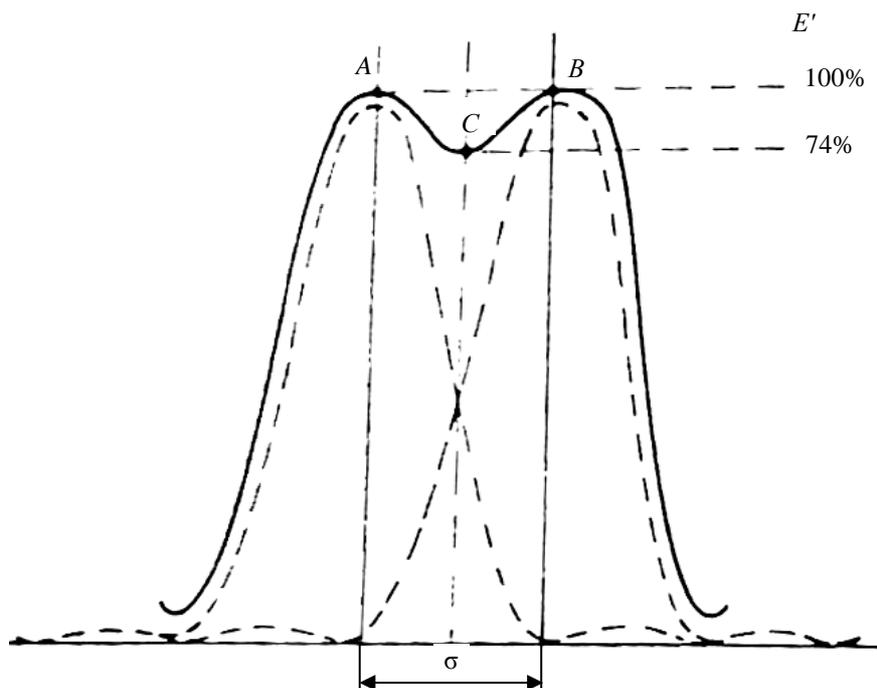


Рисунок 3. – Распределение освещенности

Радиус  $\sigma$  первого темного кольца дифракционного кружка принимается за наименьшее разрешаемое расстояние (предел разрешения), которое может быть вычислено по следующей формуле [8]:

$$\sigma = 1,22\lambda \frac{f}{d} = 1,22\lambda n, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $f$  – фокусное расстояние;  $d$  – диаметр входного зрачка оптической системы;  $n$  – знаменатель относительного отверстия (апертура).

Как видно из формулы (2), наименьшее разрешаемое расстояние зависит от длины волны  $\lambda$  и апертуры  $n$ . Длина волны, которую фиксируют светочувствительные матрицы, будет отличаться от длины волны, которую фиксирует фотопленка, поскольку матрицы будут фиксировать не только видимый свет, но и инфракрасный. Поэтому возьмем для расчетов среднюю длину световой волны, воспринимаемую светочувствительной матрицей, которая составит  $\lambda = 0,69$  мкм.

Подставив  $\lambda = 0,69$  мкм,  $f = 21$  мм и  $n = 9,1$  в формулу (2), получим  $\sigma = 7,66$  мкм. Нет смысла конструировать матрицу с размером пикселя значительно меньше рассчитанной величины (таблица 2).

Характеристики светочувствительной матрицы имеют существенное значение. В цифровой камере тахеометра Leica Nova MS50 используется датчик изображения МТ9Р031, который представляет собой 1/2.5-дюймовый цифровой датчик изображения КМОП (комплементарная структура «металл – оксид – полупроводник») с активным пиксельным массивом  $2592 \times 1944$  [2].

В рассматриваемой камере светочувствительная матрица КМОП также имеет датчик изображения ПЗС (прибор с зарядовой связью). Сравним два этих датчика, чтобы выяснить, оправдан ли выбор

для цифровой камеры КМОП-матрицы. В ПЗС- и КМОП-матрицах для преобразования света в электрический сигнал изображения используются фотодиоды. Однако их принцип работы существенно различается. В приборах с зарядовой связью падающий свет, регистрируемый фотодиодом каждого пикселя, преобразуется в электрический заряд. Заряд пикселя перемещается в вертикальную «транспортную шину», расположенную сбоку от пикселя. Прилагаемое напряжение затем перемещает заряды по вертикальным и горизонтальным транспортным шинам, пока они не достигнут усилителя, в котором заряды преобразуются в электрический сигнал (рисунок 4) [9].

Таблица 2. – Технические характеристики светочувствительной матрицы [2]

Параметры	Характеристика
Оптический формат	1/2,5-дюймовый (4:3)
Активный размер изображения	5,70 мм (H) × 4,28 мм (V) 7,13 мм диагональ
Активные пиксели	2592H × 1944V
Размер пикселя	2,2 × 2,2 мкм
Массив цветных фильтров	Цветовая модель RGB
Разрешение ADC	12 бит, на кристалле
Чувствительность	1,4 В/люкс (550 нм)
Динамический диапазон пикселей	70,1 дБ
SNR <sub>max</sub>	38,1 дБ

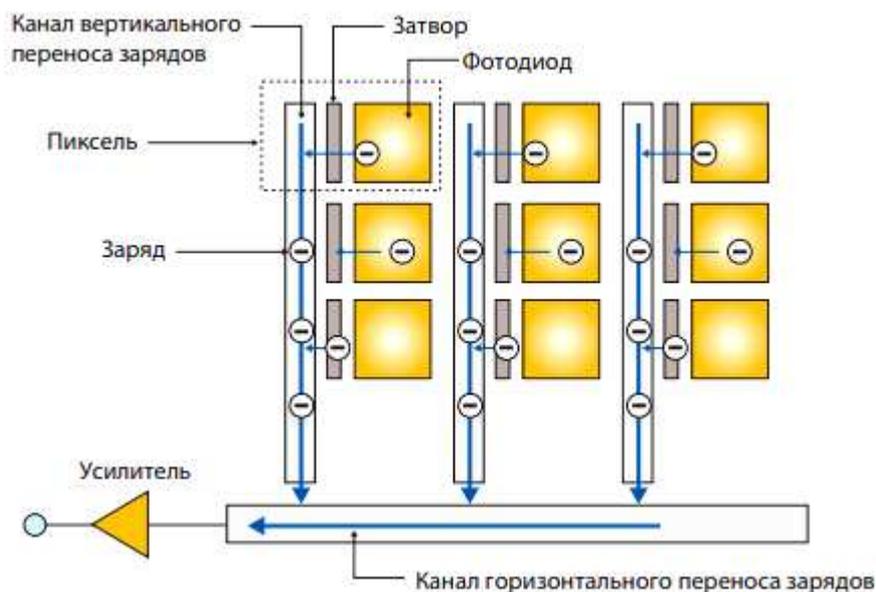


Рисунок 4. – Структура ПЗС-матрицы

Подобная структура требует высоких напряжений для попеременного открывания и закрывания затворов, которые должны иметься в составе всех пикселей для управления временной последовательностью потока зарядов. Мощность, потребляемая ПЗС-матрицами, особенно велика для формата высокой четкости, когда требуется быстрое считывание большого числа пикселей [9].

В КМОП-матрицах усилитель, имеющийся у каждого пикселя, сразу преобразует заряд пикселя в электрический сигнал, который затем продвигается на выход (рисунок 5) [9].

Вместо затворов в КМОП-матрице используются переключатели и внутренние цепи, управляющие последовательностью выходных сигналов. Использование внутренних переключателей позволяет существенно снизить потребляемую мощность при ускорении процесса одновременного считывания большого числа пикселей. Эффективность считывания оказывается вполне достаточной для поддержки прогрессивного разложения изображений высокого разрешения. В одночиповых КМОП-датчиках становится принципиально возможным одновременное считывание сигналов  $R(red)$ ,  $G(green)$  и  $B(blue)$ .

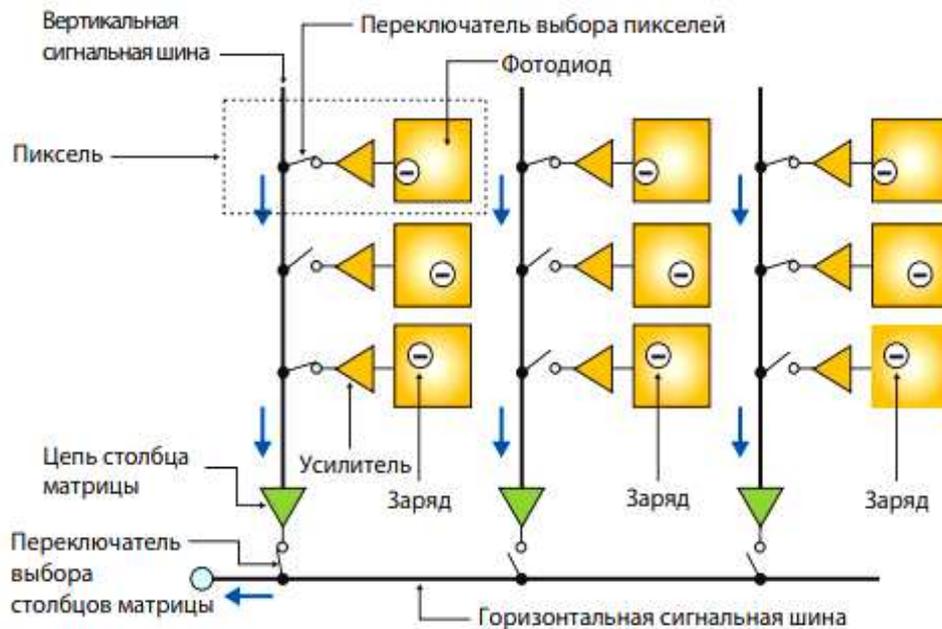


Рисунок 5. – Структура КМОП-матрицы

Поскольку КМОП-датчики отличаются низким энергопотреблением и высокой скоростью процесса считывания, они вполне подходят для использования в камерах с высоким разрешением (англ. – High Definition (HD)), полностью удовлетворяя предъявляемые к ним требования, такие как компактность, малая потребляемая мощность и высокое качество изображения [9].

Исходя из вышесказанного, можно выделить преимущества КМОП-матриц в сравнении с ПЗС [9]:

- низкое энергопотребление;
- малая потребляемая мощность;
- малозатратное производство, особенно при больших размерах матриц.

К основным недостаткам КМОП-матриц относят следующие [10]:

- фотодиод ячейки матрицы имеет сравнительно малый размер, величина же получаемого выходного напряжения зависит не только от параметров самого фотодиода, но и от свойств каждого элемента пикселя. У каждого пикселя матрицы своя собственная оптическая плотность, отсюда возникает проблема разброса светочувствительности и коэффициента контраста пикселей матрицы. Вследствие этого КМОП-матрицы имеют высокий уровень «структурного шума»;

- наличие на матрице большого по сравнению с фотодиодом объема электронных элементов, что создает дополнительный нагрев устройства в процессе считывания и приводит к возрастанию теплового шума.

Шум имеет различную природу. Рассмотрим *типичные источники шума*.

*Электрические флуктуации* – хаотические изменения потенциалов, токов и зарядов в электрических цепях, вызываемые тепловым движением носителей заряда и другими физическими процессами в веществе, обусловленными дискретной природой электричества, а также случайными изменениями и нестабильностью характеристик цепей. Флуктуации возникают в проводниках, электронных и ионных приборах. Они приводят к появлению ложных сигналов – шумов на выходе усилителей электрических сигналов, ограничивают их чувствительность и помехоустойчивость, уменьшают стабильность генераторов и устойчивость систем автоматического регулирования и т.д. [11].

*Фиксированный структурный шум* возникает в результате того, что КМОП-матрицы имеют отдельный усилитель для каждого пикселя. В устройстве высокой четкости КМОП матрица содержит более миллиона таких усилителей. Нереально ожидать, что все эти усилители будут абсолютно одинаковыми, так как в процессе производства неизбежен некоторый разброс параметров, что приведет к возникновению помех [10].

*Аналоговый шум* возникает, когда заряд передается в форме аналогового сигнала. В процессе передачи в него вносится некоторый внешний шум. Этот шум возрастает пропорционально расстоянию передачи [9].

Поскольку шум в КМОП-матрице является существенным недостатком, то производители стремятся разработать технологии, позволяющие свести этот недостаток к минимуму.

Авторы работы [2] утверждают, что датчик изображения КМОП МТ9Р031 оснащен технологией малошумящего формирования BREAK-Artina, что позволяет достичь качества изображения ПЗС (на основе соотношения сигнала к шуму и низкой чувствительностью к освещенности) при сохранении присущих им размеров, стоимости и преимущества интеграции КМОП. Это утверждение, на наш взгляд, сомнительно.

Так как шум малоинформативная характеристика, в электронике принято говорить об отношении сигнал/шум. В светочувствительных матрицах эта характеристика обозначается как *Signalto Noiseratio*, или сокращенно *SNR*.

В светочувствительной матрице МТ9Р031 отношение сигнал/шум равно 38,1дБ (см. таблицу 2) [2].

Значение *SNR* менее 40 дБ означает высокий уровень шумов и, как следствие, низкое качество изображения [12].

Как утверждается в [12], почти все камеры потребительского уровня будут выполнены на базе КМОП-приборов, а ПЗС будут применяться в устройствах среднего и высокого классов. В основном все недостатки КМОП-матриц решаются программными методами, т.е. постобработкой фотографий, что приводит к потере исходной информации [10].

Рассчитаем разрешающую способность получаемого изображения. При расчете учтем размер пикселя светочувствительной матрицы обзорной камеры и влияние аберраций объектива.

Разрешающая способность светочувствительной матрицы может быть вычислена по формуле [7]:

$$R_m = \frac{1}{2l}, \quad (3)$$

где  $l$  – размер пикселя.

При расчете примем размер пикселя 5 и 2,2 мкм.

В первом случае получим  $R_1 = 100 \text{ мм}^{-1}$ , во втором –  $R_2 = 227 \text{ мм}^{-1}$ .

Предельно возможное значение разрешающей способности объектива, называемое дифракционной разрешающей способностью  $R_D$ , можно получить по формуле [6; 8]:

$$R_D = \frac{1d}{1,22\lambda f} = \frac{1}{1,22\lambda n}. \quad (4)$$

Приняв среднее значение  $\lambda = 0,69 \text{ мкм}$ ,  $n = 9,1$ , получено  $R_D = 130 \text{ мм}^{-1}$ .

Аберрации снизят эту разрешающую способность.

Влияние аберраций учтем по формуле [14]:

$$R_o = \frac{U}{4\epsilon}, \quad (5)$$

где  $U$  – апертурный угол в пространстве изображений;  $\epsilon$  – волновая аберрация, используемая в качестве обобщенной характеристики остаточных аберраций и  $\epsilon = 0,25\lambda$  – для оптических систем с отличной коррекцией аберраций и  $\epsilon = 0,5\lambda$  – для хорошей коррекции аберраций. В нашем случае аберрации не корректировались, поэтому примем  $\epsilon = \lambda$ .

Апертурный угол в пространстве изображений можно вычислить по формуле [14]:

$$U = \frac{d}{2f} = 0,055. \quad (6)$$

Получим разрешающую способность объектива  $R_o$  по формуле (5) для принятых нами значений  $R_o = 15 \text{ мм}^{-1}$ .

Совместную разрешающую способность светочувствительной матрицы и объектива вычислим по формуле [14]:

$$\frac{1}{R_{o/m}} = \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_m}. \quad (7)$$

При размере пикселя  $l = 5 \text{ мкм}$  получили  $R_{o/m} = 13 \text{ мм}^{-1}$ , а при  $l = 2,2 \text{ мкм}$   $R_{o/m} = 14 \text{ мм}^{-1}$ , то есть практически одинаковый результат. Однако при размере пикселя 2,2 мкм в значительно большей степени

на окончательную разрешающую способность будут влиять шумы и скорее всего разрешающая способность будет ниже, чем при размере пикселя 5 мкм.

В рассматриваемой камере используется светочувствительная матрица с размером пикселя 2,2 мкм. Проведя вычисления наименьшего разрешающего расстояния, получили значение 7,7 мкм. Одна точка будет размером 7,7×7,7 мкм, т.е. займет более чем 3×3 пикселя. Полагаем, что можно увеличить размер пикселя (например, до 5 мкм), что снизило бы шумы и улучшило соотношение сигнал/шум.

Из этого можно сделать вывод о том, что матрица с размером пикселя не больше 7,7 мкм обладает теми же характеристиками, что и матрица в рассматриваемой камере. В таком случае было бы меньше пикселей, а значит и меньше электрических элементов, что улучшит соотношение сигнал/шум.

*Цветное изображение* получаем с помощью светочувствительной матрицы, используя светофильтры. Изображение выводится в формате шаблона Bayer, состоящего из четырех «цветов»: зеленый G<sub>r</sub>; зеленый G<sub>b</sub>, красный R и синий B (G<sub>r</sub>, G<sub>b</sub>, R, B), основанных на трех фильтрах цвета [2].

Поток света, проникая через микролинзы, разделяется светофильтрами на синюю (B), зеленую (G<sub>r</sub>, G<sub>b</sub>) и красную (R) составляющие, а затем поступает на фотодиоды. Наличие микролинз обусловлено стремлением повысить чувствительность датчика путем фокусировки большего числа фотонов на фотоэлементе (рисунок 6) [15]. Использование светофильтров снизит разрешающую способность.

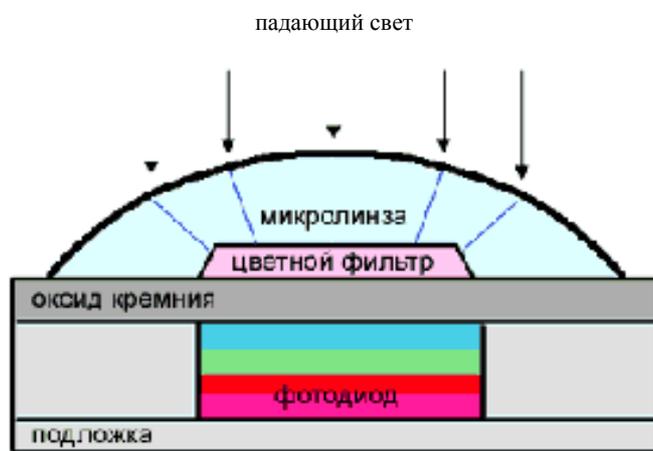


Рисунок 6. – Разделение потока света светофильтрами

### Заключение

Обзорная камера в тахеометре предназначена для предварительного наведения на объект, соответствует своему назначению. Что касается использования этой камеры для получения изображений с последующим измерением по ним при составлении планов здания, то в координаты на снимках будут внесены большие искажения. Однако по снимкам, полученным этой камерой, можно получить кроме абриса и панораму изображения, а если выполнить калибровку самой камеры, то и план фасада здания, хотя и пониженной точности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Электронные данные. – Режим доступа: [http://www.navgeocom-yug.ru/catalog/seriya\\_ts30/takheometr\\_leica\\_nova\\_ms50](http://www.navgeocom-yug.ru/catalog/seriya_ts30/takheometr_leica_nova_ms50).
2. Техническая документация компании Artina. Светочувствительная матрица MT9P031.
3. Объектив [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энцикл. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Объектив>.
4. Михайлов, А.П. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии [Электронный ресурс] / А.П. Михайлов, А.Г. Чибуничев, В.М. Курков. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=321>.
5. Савиных, В.П. Аэрокосмическая аэрофотосъемка / В.П. Савиных, А.С. Кучко, А.Ф. Стеценко. – М. : «Картгеоцентр» – «Геодезиздат», 1997. – 378 с.
6. Лаврова, Н.П. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование / Н.П. Лаврова, А.Ф. Стеценко. – М. : Недра, 1981. – 296 с.

7. Щербаков, Е.Я. Расчет и конструирование аэрофотоаппаратов / Е.Я. Щербаков. – М. : Машиностроение, 1979. – 464 с.
8. Мальцев, М.Д. Прикладная оптика и оптические измерения / М.Д. Мальцев, Г.А. Каракулина. – М. : Машиностроение, 1968. – 472 с.
9. Техническая документация компании SONY. Технология матриц ClearVid.
10. Википедия : свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/КМОП-матрица>.
11. Википедия : свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/флуктуации>.
12. Википедия : свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia/отношение сигнал/шум>.
13. Павлушко, О.В. Цифровые фотоаппараты: сравнительные характеристики и применение [Электронный ресурс] / О.В. Павлушко. – Режим доступа: [http://ict.edu.ru/ft/001835/sbornik6\\_4\\_4\\_7\\_1](http://ict.edu.ru/ft/001835/sbornik6_4_4_7_1).
14. Кучко, А.С. Аэрофотография и специальные аэрофотографические исследования / А.С. Кучко. – М. : Недра, 1988. – 235 с.
15. Твердотельные датчики изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.comprice.ru/articles/detail.php ?ID=40146>

Поступила 08.06.2017

#### EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF APPLYING A SURVEY DIGITAL CAMERA BUILT IN THE ELECTRICAL TACHEOMETER FOR PHOTOGRAMMETRY

A. MIKHEEVA, D. YALTYKHOV, D. VOLKOV

*The possibility of using the images obtained with the help of a digital camera built into the total station in construction is considered. The lens of the digital camera is small, perhaps, consists of a single lens, so it will give large garblings due to distortion. To reduce distortions, it is necessary to calibrate the digital camera in the course, which not only determine the elements of internal orientation, but also the magnitude of the distortion along the image field. In this case, it will be possible to use a digital camera not only to compose outlines, but also to create a panorama of the structure or to create a plan for the facade of the building, albeit with lower accuracy.*

**Keywords:** photogrammetry, digital camera, total station, distortion, garbling.

УДК 528.3

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВИЗИРНЫХ ЦЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ

канд. техн. наук, доц. С.Д. КРЯЧОК;  
Л.С. МАМОНТОВА; Ю.В. ЩЕРБАК

(Черниговский национальный технологический университет, Украина)

Проанализированы существующие конструкции отражателей и визирных целей для электронных тахеометров. Установлено, что ни одна из существующих конструкций по своим габаритам или особенностям устройства не обеспечивает измерения в широком секторе относительно оси стенного знака. Предложено новое устройство для привязки к стенным знакам. Устройство имеет отражатель, который расположен снаружи стенного знака, и не плоскую, а объемную визирную цель. Эти особенности позволяют значительно увеличить сектор для установки геодезического прибора при выполнении угловых и линейных измерений.

**Ключевые слова:** геодезическая сеть, стенной знак, электронный тахеометр, призмный отражатель, визирная цель.

Координатное обеспечение землеустройства, топографической съемки, инженерно-геодезических работ осуществляется благодаря использованию новейших спутниковых методов [1]. С этой целью расширяется сеть перманентных GPS-станций [2].

Дальнейшее совершенствование приобретают и наземные средства координации [3–5]. Для закрепления пунктов плановых сетей на застроенных территориях обычно используются стенные знаки. Они закладываются в цоколь и стены капитальных сооружений, что гарантирует долговременность их сохранения. Внешне стенной знак (рисунок 1) имеет «головку» 1, а цилиндрическое «тело» находится в стене 2 сооружения и посажено в цементный раствор. Поверх «головки» находится отверстие 3 малого диаметра, ось которого является центром знака и имеет координаты. Расстояние от центра знака до стены обычно составляет около 2...3 см.

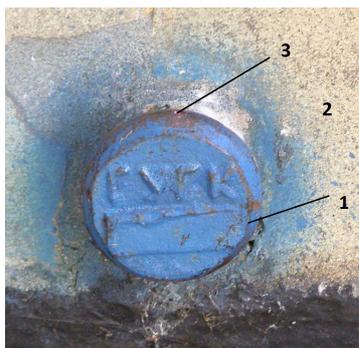


Рисунок 1. – Стенной знак

Во время привязки к стенным знакам выполняются угловые и линейные измерения относительно центра знака. Ранее, когда для линейных измерений применялись механические средства (например, рулетка), процесс совмещения конца рулетки с нулевой оцифровкой и центром знака не составлял труда. Для угловых измерений в отверстии 3 (см. рисунок 1) устанавливалась шпилька или спичка, причем во время привязки к стенному знаку визирный луч геодезического прибора может находиться в секторе от нуля до  $\pm 90^\circ$  относительно продольной оси знака, в зависимости от имеющихся препятствий и способа привязки. В современных условиях для угловых и линейных измерений все чаще применяются электронные тахеометры (рисунок 2).

Электронные тахеометры имеют в своем комплекте отражатели (рефлекторы) для линейных измерений и специальные визирные марки для угловых измерений.

Комплект такого тахеометра также содержит стандартную визирную цель [6–8], состоящую из штока (штанги) 1, на котором имеется круглый уровень 2 для установки оси штока в вертикальное положение.

На плоской пластинке 3 нанесен рисунок визирной марки 4, 5 – для наведения сетки нитей зрительной трубы тахеометра при угловых измерениях.

Пластинка 3 крепится к отражателю 6, который, в свою очередь, прикреплен к колонкам 7, что позволяет вращать отражатель вверх или вниз в направлении зрительной трубы электронного тахеометра – для максимального отражения сигнала. Нижняя часть штока заканчивается конусообразным наконечником.

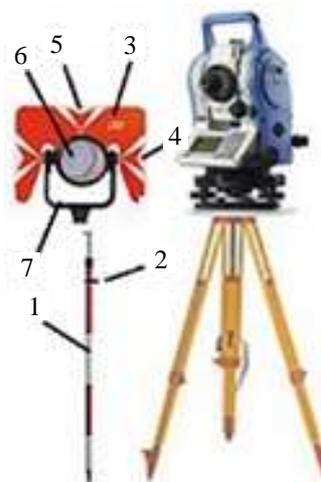
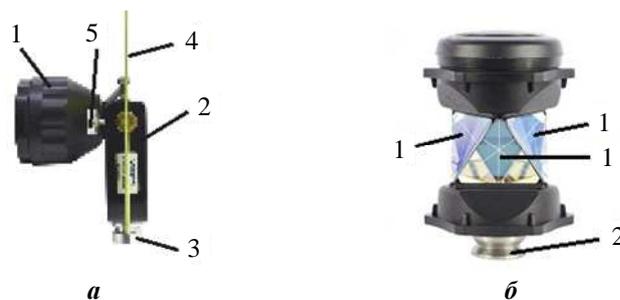


Рисунок 2. – Внешний вид отражателя стандартного комплекта электронного тахеометра

Модель отражателя, показанная на рисунке 3, *а*, позволяет изменять положение отражающего элемента 1 вместе с корпусом 2, заканчивающимся осью 3, перемещением их по направляющей 4 [9]. Для фиксации положения отражающего элемента 1 относительно направляющей 4 предназначен закрепительный винт 5. Такой отражатель может использоваться и самостоятельно, например, установкой его в верхнюю часть штока 3 (см. рисунок 2).

Для определения расстояния до пункта, расположенного в узловой точке геодезической сети, полезным будет отражатель, показанный на рисунке 3, *б* [10]. Он отражает сигнал от электронного тахеометра в секторе 360°. Для этого предназначены отдельные отражательные элементы 1 в виде трипель-призм, которые образуют единый блок. Для установки отражателя на шток или в подставку в нижней части отражателя находится ось 2.



*а* – реверсная визирная цель; *б* – вспомогательное устройство

Рисунок 3. – Внешний вид усовершенствованных отражателей

**Исследовательская часть.** Анализ конструктивных решений существующих отражателей и визирных целей для электронных тахеометров показал, что ни одна из существующих конструкций по своим габаритам или особенностям устройства не обеспечивает измерения в широком секторе относительно оси стенного знака, что послужило целью данной работы – поиск путей совершенствования конструкции устройства для привязки к стенным знакам. В результате проведенных исследований разработано новое устройство (рисунок 4) для привязки к стенным знакам с программным обеспечением и возможным способом реализации поставленных задач.

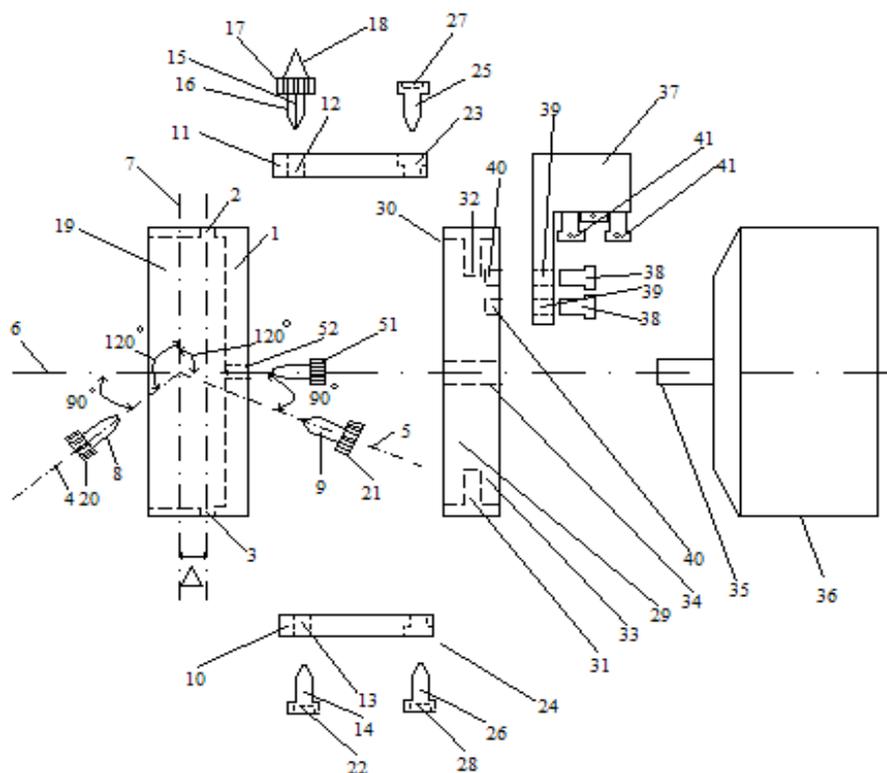


Рисунок 4. – Конструкция нового устройства для привязки к стенным знакам

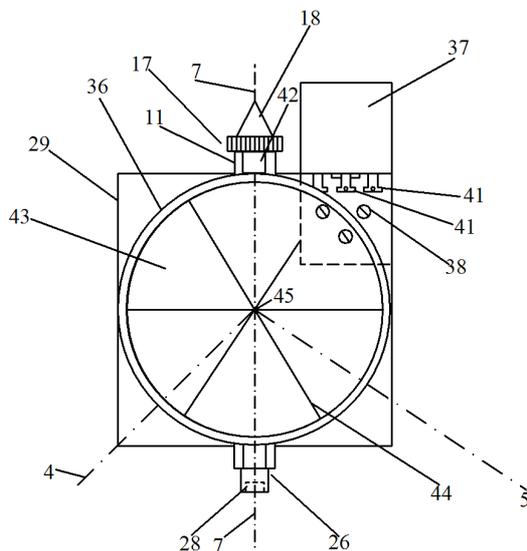
Устройство для привязки к стенным знакам содержит насадку 1 на стенной знак, которая имеет верхнее 2 и нижнее 3 отверстия с резьбой и два боковых отверстия (на рисунке 4 не показаны), оси которых 4 и 5 составляют  $90^\circ$  относительно горизонтальной оси 6 устройства и  $120^\circ$  – относительно вертикальной оси 7 насадки 1. Боковые отверстия имеют резьбу. В них ввинчиваются закрепительные винты 8 и 9. Вертикальная ось 7 и ось отверстий 2 и 3 разнесены на величину  $\Delta$ . Нижний и верхний элементы подвижного рычага 10 и 11 имеют отверстия 12 и 13, в которые входят закрепительные винты 14 и 15. Причем винт 15 имеет наконечник 16 конусообразной формы и рифленый обод 17 (для ввинчивания от руки), а также верхнюю часть конической формы 18 (первая визирная цель объемной формы), которая выкрашена, например, в черный цвет, который контрастирует со стеной и не дает солнечных бликов. Винты 14 и 15 устанавливаются в отверстия 12 и 13 и привинчивают элементы 10 и 11 к насадке 1. При этом винт 15 своей конической частью входит внутрь полости 19 насадки 1. Длина винта 14 равна суммарной длине отверстий 3 и 13 и не выступает после ввинчивания в полость 19. Длины винтов 8 и 9 таковы, что после ввинчивания они входят в полость 19.

Винты 8 и 9 имеют ободки 20 и 21 рифленой формы для ручного ввинчивания, винт 14 имеет в головке отверстие шестигранной формы 22 для установки в него шестигранного ключа, хотя можно использовать отвертку другой формы для ввинчивания.

Элементы 10 и 11 в торцевой части имеют отверстия 23 и 24, в которые вставляются закрепительные винты 25 и 26. Эти винты имеют отверстия 27 и 28 для установки, например, шестигранного ключа.

Пластинка 29 сверху и снизу имеет прорези 30 и 31, в которые входят верхний 11 и нижний 10 элементы. Прорези 30 и 31 имеют отверстия 32 и 33, которые заканчиваются резьбой для винтов 25 и 26. В середине пластинки 29 имеется отверстие 34 с резьбой для ввинчивания винта 35 отражателя 36. На пластинке 29 расположен круглый уровень 37, который крепится к ней тремя винтами 38, которые входят в отверстия 39 и ввинчиваются в отверстия с резьбой 40. Уровень работает в двух взаимно перпендикулярных направлениях и имеет исправительные винты 41. Круглый уровень может быть установлен и на самой насадке 1.

Головка винта 25 (рисунок 5) и торец элемента 11 образуют вторую визирную цель 42, причем головка винта 25 также окрашена, например, в черный цвет. Отражатель 36 состоит из оправы, внутри которой помещены призмы 43, склеенные между собой, ребра 44 которых видны с фронтальной стороны призмы. Они сходятся в центре 45 отражателя 36. Центр отражателя 45, вертикальная ось симметрии визирной цели 42 и вершина конуса первой визирной цели 18 должны лежать на одной линии. Отражатель 36 и уровень 37 заводского изготовления. Например, уровень применяется для приведения инварных реек в вертикальное положение, а отражатель можно использовать из комплекта светодальномера СТ-5 «Блеск».



**Рисунок 5. – Вид нового устройства для привязки к стенным знакам (спереди)**

Устройство для привязки к стенным знакам работает следующим образом: на «головку» 1 (см. рисунок 1) стенного знака устанавливается насадка 1 (см. рисунок 4) полостью 19, закрепительный винт 15 ввинчивается в отверстие 2 с резьбой, а наконечник 16 конической формы попадает в отверстие 3 стенного знака. Для обеспечения последнего насадку пытаются провернуть вокруг оси 6 насадки. Если оборудование не проворачивается, то конический наконечник 16 попал в отверстие 48. В противном случае

повторяют установку насадки. Далее, придерживая насадку, винчивают зажимные винты 8 и 9 до касания их начала «шейки» стенового знака до тех пор, пока пузырек круглого уровня не займет центральное положение в ампуле уровня, а устройство не закрепится на знаке. Для точной установки пузырька уровня на середину ампулы винчивают или вывинчивают винт 51 в отверстии 52. Таким образом, работой винтов 8, 9, 51 точно устанавливают уровень в рабочее положение.

Наводят зрительную трубу геодезического прибора на первую визирную цель 18 (см. рисунки 4, 5) так, чтобы вертикальная нить креста сетки нитей зрительной трубы совпала с вершиной конуса цели 18. Вращают отражатель 36 вместе с пластинкой 29 и уровнем 37 на подвижных рычагах 10 и 11 до тех пор, пока его центр 45 не совпадет с вертикальной нитью креста сетки нитей геодезического прибора. Контролируют положение пузырька уровня, а при необходимости винтами 8, 9, 51 приводят пузырек на середину ампулы. Выполняют измерения расстояния на отражатель.

Для измерения коротких расстояний, можно использовать вторую визирную цель 42 (см. рисунок 5), которая ближе к центру отражателя 45, и не тратить время для наведения на первую визирную цель 18.

Для измерения направлений на стеновой знак наводят крест сетки нитей зрительной трубы на первую визирную цель 18 так, чтобы середина креста сетки нитей совпала с вершиной конуса визирной цели 18.

**Выводы.** Размещение отражателя перед стенным знаком на подвижном рычаге и замена плоской визирной цели на объемную, малых размеров, видимую с любой точки установки геодезического прибора, обеспечивает увеличение диапазона поворота отражателя в направлении геодезического прибора, что, в свою очередь, увеличивает сектор перед стенным знаком для выполнения угловых и линейных измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tereshchuk, O. Efficiency of application of satellite technology when performing land cadastral works in settlements / O. Tereshchuk, I. Nystorik // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2016. – Вип. 84. – С. 90–98.
2. Терещук, О.І. Дослідження конструкції опори антени перманентної GPS-станції «Чернігів» / О.І. Терещук, В.В. Суровець, В.І. Мовенко // Вісник геодезії та картографії. – 2006. – № 3. – С. 8–10.
3. Спосіб згущення геодезичної мережі : пат. 93119, Україна, МПК (2011.01) G01C7/00 / Д.Ф. Байса [та ін.] ; заявники та патентовласники : Д.Ф. Байса, В.О. Боровий, В.Г. Бурачек, П.Д. Крельштейн, С.Д. Крячок. – № а2009 06037 ; заявл.11.06.2009 ; опубл. 10.01.2011 // Бюл. № 1.
4. Крячок, С.Д. Побудова полігонометричних мереж зустрічними ходами / С.Д. Крячок, Л.С. Мамонтова // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 5. – С. 9–12.
5. Бринь, М.Я. Про обґрунтування параметрів теодолітних ходів під час виконання кадастрових зйомок / М.Я. Бринь, В.М. Іванов, Ю.В. Щербак // Технічні науки та технології : наук. журн. – 2015. – № 1 (1). – С. 230–233.
6. Kolida instrument [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kolidainstrument.com>.
7. Безотражательные электронные тахеометры, аксессуары [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sokkia.com>.
8. Тахеометры Trimble [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.trimble.com>.
9. Электронные тахеометры Spectra Precision, аксессуары [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spectraprecision.com>.
10. Электронные тахеометры Topcon, аксессуары [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.topcon.com>.
11. Пристрій для прив'язки до стінних знаків : пат. 115048, Україна, МПК (2017.01) G01C 3/00, G03B 13/04(2006.1) / О.С. Батюта, С.Д. Крячок, Л.С. Мамонтова, В.О. Потеруха, О.П. Прохоренко ; заявники та патентовласники : О.С. Батюта, С.Д. Крячок, Л.С. Мамонтова, В.О. Потеруха, О.П. Прохоренко. – № у 2016 11780 ; заявл. 21.11.2016 ; опубл.27.03.2017 // Бюл. № 6.

Поступила 17.05.2017

#### IMPROVING THE SIGHTING TARGET FOR ELECTRONIC TOTAL STATION

S. KRYACHOK, L. MAMONTOVA, YU. SHCHERBAK

*The analysis of existing designs reflectors and sighting target for electronic total station is made. It is established that none of them by their size or design features prevents permanently place them on the wall sign to provide measurement of distances and directions into sector 180°. A new device for binding to the geodetic sign on the wall is proposed. It has a reflector, which is located outside the geodetic sign on the wall and volumetric sighting target. These benefits can increase the sector for placement geodetic instruments during the performance of linear and angular measurements.*

**Keywords:** geodetic network, wall sign, electronic total station, prismatic reflector, a sighting target.

УДК 528.854

## ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАДИАЛЬНЫХ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

*д-р техн. наук, проф. А.С. ЯРМОЛЕНКО*

*(Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Россия);*

*О.А. КУЦАЕВА*

*(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)*

Развитие новых и более достоверных методов распознавания образов является к настоящему времени актуальной проблемой. По значениям радиальных базисных функций составляется система уравнений и находятся коэффициенты разделяющей плоскости, которые позволяют расширить класс классификационных объектов и повысить их устойчивость. Уравнения составлялись как с пороговым свободным членом, так и без него. По результатам теоретических разработок составлен программный комплекс, осуществляющий классификацию объектов, который состоит из двух взаимосвязанных программных модулей: *oro\_data\_corr24bitRBF1.pro* и *Sub Макрос1ENVI\_RBF()*. Первый написан в среде алгоритмического языка IDL комплекса ENVI, а второй – в среде VISUAL BASIC Excel. Исследования показали, что метод радиальных базисных функций (RBF) при рекомендованных в настоящей работе параметрах позволяет однозначно классифицировать все объекты.

**Ключевые слова:** радиальные базисные функции, классификация объектов, программный комплекс ENVI, алгоритмический язык IDL.

**Введение.** Согласно [1, с. 351], радиальные функции и машинные векторы [1, с. 423] являются приоритетными методами классификации образов по следующим причинам:

1. Они позволяют избегать сингулярной матрицы решений. При наличии особых матриц возникает необходимость их регуляризации [1, с. 365], оценки параметра регуляризации. Все это снижает устойчивость классификации.

Введение радиальных базисных функций позволяет расширить класс классификационных объектов и повысить их устойчивость.

Радиальные базисные функции (RBF) – это функция, преобразующая сигнал из пространства сигналов в пространство признаков. К настоящему времени в соответствии с теоремой Мичелли (С.А. Michelli) [2] выведены некоторые такие функции. Среди них особое место занимает функция Гаусса в качестве RBF. Получаемая с ее помощью матрица решений несингулярна и даже положительно определена.

2. Функция RBF повышает и точность решений, что также указывается в [1].

3. Машины опорных векторов (МОВ) базируются на обучающих опорных векторах. Опорные векторы – это небольшое множество обучающих данных, отбираемых алгоритмом. На их основе строятся разделяющие поверхности, т.е. поверхности классификации. Применяемые совместно с RBF машины опорных векторов позволяют строить также устойчивые алгоритмы [1, с. 418].

4. Развитие машины опорных векторов и метода RBF значительно дополняет общую теорию нейронных сетей [1].

### 1. Алгоритм решения задачи

В методе RBF [2, с. 351] в задаче классификации составляется система линейных уравнений для неизвестных весовых коэффициентов:

$$\begin{pmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1n} & 1 \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \dots & \varphi_{2n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{n1} & \varphi_{n2} & \dots & \varphi_{nn} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h' \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

или

$$\Phi h^T + I(\alpha b) = d. \quad (2)$$

Здесь  $\varphi_{ij}$  – значение радиальной функции между векторами  $x_i$  и  $x_j$  как элементы матрицы интерполяции  $\Phi$ ;

$h^T = \begin{pmatrix} h' \\ b \end{pmatrix}$  – вектор весов с учетом порога;  $d_i$  – элементы вектора желаемого отклика  $d$ ;  $b$  – порог (скаляр);

$\alpha$  – параметр интенсивности сигнала (скаляр) при пороге  $b$ .

Матрица линейных уравнений будет несингулярной, если все точки (векторы)  $x_i$  будут различаться [2, с. 352]. Единичный вектор в матрице (1) – это вектор коэффициентов порога, который в соответствии с теорией нейронных сетей может усиливать или ослаблять входной сигнал. В [1] отмечается, что его присутствие в задаче классификации определяется спецификой решения для определенной предметной области.

Система уравнений (2) может быть представлена как система условных уравнений, налагаемых на вектор весов  $h^T$ .

В зависимости от значения  $\alpha$  при ненулевом пороге входной сигнал может усиливаться или ослабляться. Сам вектор  $h^T$  будем находить при минимуме суммы квадратов его составляющих.

Если принять

$$h \ h^T = (h')^T \ h' + b^2, \quad (3)$$

то для решения задачи условного экстремума запишем функционал Лагранжа:

$$J = (h')^T \ h' + b^2 - 2K^T \ \Phi \ h' + I (\alpha b) - d = \min, \quad (4)$$

где  $I = (1, 1, 1, \dots, 1)^T$ ;  $K^T$  – вектор-строка неопределенных множителей Лагранжа (коррелат).

Приравняем его производные по определяемым параметрам нулю

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial h'} &= (h')^T - K^T \Phi = 0, \\ \frac{\partial J}{\partial b} &= b - K^T I \alpha = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) следует, что

$$\begin{aligned} (h')^T &= K^T \Phi, \\ b &= K^T I \alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Подстановка значений (6) в условное уравнение (2) приводит к нормальному уравнению

$$(\Phi \Phi^T + \alpha^2 (I I^T)) K \ d = 0. \quad (7)$$

В нем

$$(I I^T) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Из решения (7) получаем

$$K = (\Phi \Phi^T + \alpha^2 (I I^T))^{-1} d. \quad (9)$$

На основании (6) с учетом (9) найдем

$$\begin{aligned} h' &= \Phi^T (\Phi \Phi^T + \alpha^2 (I I^T))^{-1} d, \\ b &= \alpha I^T (\Phi \Phi^T + \alpha^2 (I I^T))^{-1} d. \end{aligned} \quad (10)$$

По значениям (10) составляется классификационная функция

$$\varphi_{11} \ F(x) = \sum_{i=1}^N h_i \ \Phi(\|x - x_i\|), \quad (11)$$

где  $x$ ,  $x_i$  – значения данных распознаваемого и обучающих объектов.

По значению классификационной функции определяется близость распознаваемого объекта к обучающему (эталонному).

В рассматриваемом примере обучающими данными являются значения пикселей изображения цифр 0...9, расположенные по столбцам матрицы  $B^T$  (12):

$$B^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Элементы матрицы интерполяции  $\Phi$  вычислялись по функции Гаусса:

$$\Phi_{kl} = \exp \left\{ - \left( - \sum_{j=1}^n (x_{kj} - x_{lj})^2 \right) \right\}.$$

Так, для цифр  $k = 1$  и  $l = 2$

$$\Phi_{12} = \exp \left\{ - \left( \begin{aligned} &((0-1)^2 + (1-1)^2 + (0-1)^2 + (0-0)^2 + (1-0)^2 + \\ &+(0-1)^2 + (0-0)^2 + (1-1)^2 + (0-0)^2 + (0-1)^2 + \\ &+(1-0)^2 + (0-1)^2 + (0-1)^2 + (1-1)^2 + (0-1)^2 \end{aligned} \right) \right\}. \quad (13)$$

По аналогии с (12) найдены все значения  $\Phi_{ij}$  и получена соответствующая матрица  $\Phi$  (13).

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0,0067 & 0,0183 & 0,0067 & 0,0498 & 0,0183 & 0,0009 & 0,0498 & 0,0183 \\ 0 & 1 & 0,0003 & 0,0001 & 0 & 0 & 0 & 0,0003 & 0 & 0 \\ 0,0067 & 0,0003 & 1 & 0,0498 & 0,0003 & 0,0025 & 0,0009 & 0,1353 & 0,1353 & 0,0009 \\ 0,0183 & 0,0001 & 0,0498 & 1 & 0,0067 & 0,0498 & 0,0025 & 0,0067 & 0,0498 & 0,0183 \\ 0,0067 & 0 & 0,0003 & 0,0067 & 1 & 0,0183 & 0,0067 & 0,0003 & 0,0025 & 0,3679 \\ 0,0498 & 0 & 0,0025 & 0,0498 & 0,0183 & 1 & 0,0498 & 0,0003 & 0,0183 & 0,0498 \\ 0,0183 & 0 & 0,0009 & 0,0025 & 0,0067 & 0,0498 & 1 & 0,0001 & 0,0067 & 0,0025 \\ 0,0009 & 0,0003 & 0,1353 & 0,0067 & 0,0003 & 0,0003 & 0,0001 & 1 & 0,0183 & 0,0009 \\ 0,0498 & 0 & 0,1353 & 0,0498 & 0,0025 & 0,0183 & 0,0067 & 0,0183 & 1 & 0,0067 \\ 0,0183 & 0 & 0,0009 & 0,0183 & 0,3679 & 0,0498 & 0,0025 & 0,0009 & 0,0067 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Вектор весов также найдем при различных значениях порога.

**Первое условие**

При нулевом пороге  $b$  и весах (15)

$$h' = (-0.894 \quad 0.997 \quad -0.090 \quad 2.217 \quad 0.758 \quad 4.073 \quad 5.730 \quad 6.848 \quad 7.649 \quad 8.422) \quad (15)$$

незашумленные сигналы распознаются абсолютно.

Цифра «ноль», содержащая четыре неверных пиксела (рисунок 1), распознается как число 0,32, что свидетельствует о высокой устойчивости алгоритма.

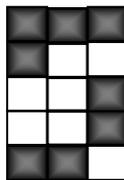


Рисунок 1. – Зашумленное изображение цифры «ноль»

### Второе условие

Порог  $b$  считаем составным элементом вектора весов. Тогда система уравнений (1) будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0,0067 & 0,0183 & 0,0067 & 0,0498 & 0,0183 & 0,0009 & 0,0498 & 0,0183 & 1 \\ 0 & 1 & 0,0003 & 0,0001 & 0 & 0 & 0 & 0,0003 & 0 & 0 & 1 \\ 0,0067 & 0,0003 & 1 & 0,0498 & 0,0003 & 0,0025 & 0,0009 & 0,1353 & 0,1353 & 0,0009 & 1 \\ 0,0183 & 0,0001 & 0,0498 & 1 & 0,0067 & 0,0498 & 0,0025 & 0,0067 & 0,0498 & 0,0183 & 1 \\ 0,0067 & 0 & 0,0003 & 0,0067 & 1 & 0,0183 & 0,0067 & 0,0003 & 0,0025 & 0,3679 & 1 \\ 0,0498 & 0 & 0,0025 & 0,0498 & 0,0183 & 1 & 0,0498 & 0,0003 & 0,0183 & 0,0498 & 1 \\ 0,0183 & 0 & 0,0009 & 0,0025 & 0,0067 & 0,0498 & 1 & 0,0001 & 0,0067 & 0,0025 & 1 \\ 0,0009 & 0,0003 & 0,1353 & 0,0067 & 0,0003 & 0,0003 & 0,0001 & 1 & 0,0183 & 0,0009 & 1 \\ 0,0498 & 0 & 0,1353 & 0,0498 & 0,0025 & 0,0183 & 0,0067 & 0,0183 & 1 & 0,0067 & 1 \\ 0,0183 & 0 & 0,0009 & 0,0183 & 0,3679 & 0,0498 & 0,0025 & 0,0009 & 0,0067 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Решение при минимуме нормы вектора  $h$  (минимизации формулы (4)) приведено в виде вектора весов

$$h = (4.06 \ 2.66 \ 2.74 \ 0.87 \ 1.89 \ 1.12 \ 2.33 \ 3.63 \ 4.82 \ 6.03 \ 3.66). \quad (17)$$

Распознавание незашумленных образов здесь также осуществляется однозначно.

На основе приведенных исследований может быть предложена следующая методика классификации:

1. Вычисляется вектор признаков по функции RBF.

Например, по зашумленному сигналу образа цифры «ноль» (см. рисунок 1).

$$l = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0) \quad (18)$$

по функции

$$\varphi_i^* = \exp \left\{ - \left( \sum_{j=1}^n (x_j - x_{ij})^2 \right) \right\}, \quad (19)$$

где  $x_j$  – элемент с номером  $j$  в (18);  $x_{ij}$  – соответствующий элемент  $j$  обучающего вектора с номером  $i$  вычисляется вектор-строка значений RBF для оцениваемого образа.

Так, в случае нулевого порога для решения в соответствии с (19) имеем:

$$\varphi_i^* = (0,018 \ 0 \ 0,0009 \ 0,0180 \ 0,0009 \ 0,0498 \ 0,0025 \ 0,0009 \ 0,0067 \ 0,0020). \quad (20)$$

2. Скалярным умножением вектора признаков на вектор весов  $h^T$  получают отклик.

3. Сравнением полученного отклика с идеальными осуществляют опознавание. Опознанным признается тот образ, отличие отклика которого от отклика распознаваемого минимально по норме.

### 2. Классификация площадных объектов с применением метода радиальных базисных функций

Данный алгоритм положен в основу классификации объектов по их многоканальным изображениям в среде алгоритмического языка IDL программы ENVI [3].

В соответствии с составленной авторами настоящей работы программой ее алгоритм базируется на основе классификации с учителем. При этом задаются эталонные объекты (обучающие) и распознаваемые (обучаемые). В системе ENVI определение таких объектов осуществляется созданием так называемых объектов интереса – Regions of Interest (ROI). При этом часть ROI представляет обучающие объекты (эталонные), а следующая часть – распознаваемые. Проиллюстрируем весь процесс на примере четырех площадных объектов. Называть их будем в порядке нумерации соответственно первым, вторым, третьим и четвертым. Каждый из них может быть распознаваемым, остальные – эталонными.

На рисунке 2 представлены ROI всех четырех объектов в виде квадратов произвольных размеров. Нумерация объектов следует слева направо.

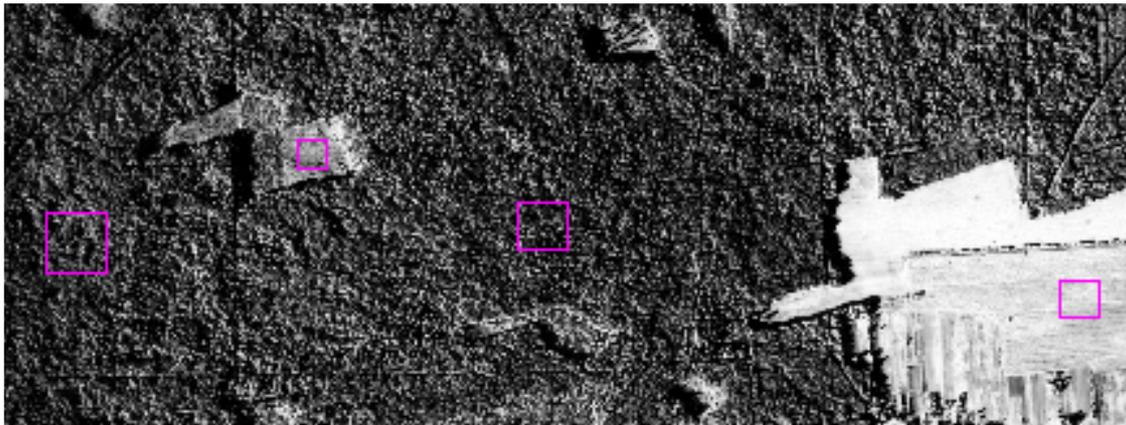


Рисунок 2. – ROI всех четырех объектов

На рисунке 2 первый и третий объекты относятся к классу однородного лиственного леса – березовой рощи, а второй и четвертый – к классу сенокосов.

Программой предусмотрена классификация:

- по *мультикватричной* функции [2, с. 352]:

$$\varphi(r) = (r^2 + c^2)^{1/2}, \quad (21)$$

где некоторое  $c \geq 0$ , а  $r$  – норма, в качестве которой может быть принята Евклидова;

- по *функции Гаусса*

$$\varphi(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (22)$$

в которой параметр  $\sigma$  определен как ширина этой функции.

В общем случае норма определяется так

$$r = \|x - t_i\|, \quad (23)$$

где векторы  $x$ ,  $t_i$  – соответственно векторы данных и центра функции.

В [2, с. 350, с. 395] рекомендуется центры функций выбирать в точках данных  $x_i$  (где  $i$  – число образцов или идеальных объектов).

Рассмотрим вначале классификацию по мультикватричной функции.

Норму  $r$  найдем по значениям пикселей на всех каналах изображения, попавшего в ROI. Так, например, для первого и второго ROI будем иметь

$$r_{12}^2 = \sum_{k=1}^{Kan} \sum_{i=1}^N (x_{1ki} - x_{2ki})^2, \quad (24)$$

где  $K_{an}$  и  $N$  – число каналов и наблюдений (значений пикселей) в каждом из них.

Но поскольку ROI отличаются по количеству пикселей, то в качестве  $N$  принимается число пикселей в наименьшем ROI, обозначаемое в программе как  $MINnc$ .

Выполняя вычисления для всех пар ROI, представим значения мультикватричной функции в виде следующей матрицы:

$$\begin{pmatrix} 0 & 2881,63 & 1092,66 & 2881,93 \\ 2881,63 & 0 & 2992,51 & 1302,62 \\ 1092,66 & 2992,51 & 0 & 3059,76 \\ 2881,93 & 1302,62 & 3059,76 & 0 \end{pmatrix}.$$

В качестве вектора отклика примем сумму значений пикселей по всем каналам для каждого ROI: (132; 507; 119; 526). Теперь составим задачу классификации первого объекта по остальным трем, полагая нулевое значение порога.

Матрица интерполяции  $\Phi$ , построенная по второму, третьему и четвертому объектам, здесь будет представлена в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} 0 & 2992,51 & 1302,62 \\ 2992,51 & 0 & 3059,76 \\ 1302,62 & 3059,76 & 0 \end{pmatrix}.$$

Вектор весов обозначим так:

$$h_1$$

$$h_2,$$

$$h_3$$

а в качестве вектора отклика примем

$$507$$

$$119.$$

$$526$$

Классификационную функцию (11) запишем следующим образом:

$$F(x) = h_1 \cdot 2881,63 + h_2 \cdot 1092,66 + h_3 \cdot 2881,93.$$

В соответствии с приведенным алгоритмом получены веса

$$h_1 = 0,028802; \quad h_2 = 0,16220; \quad h_3 = 0,01659$$

и значение классификационной функции  $F(x) = 290$ , которое по норме ближе всего к третьему объекту, отклик для которого равен 119. Из рисунка 2 следует, что эти два объекта классифицируют березовую рощу. Так что первый объект можно отнести к классу третьего объекта. Поскольку по норме расхождение по норме между 290 и 119 значительно, то необходимо выполнить исследования по уменьшению этой нормы и, соответственно, повышению эффективности классификации.

### 3. Исследование алгоритма и программного пакета классификации площадных объектов с применением метода радиальных базисных функций

Составленный на основе разработанного алгоритма программный пакет состоит из двух взаимосвязанных программных модулей: `oro_i_data_corr24bitRBF1.pro` и `Sub Макрос1ENVI_RBF()`. Первый написан в среде алгоритмического языка IDL комплекса ENVI, а второй – в среде VISUAL BASIC Excel.

Модуль `oro_i_data_corr24bitRBF1.pro` осуществляет следующие функции:

- создание ROI;
- чтение значений пикселей по всем каналам каждого ROI;
- построение матрицы интерполяции  $\Phi$  для заданных объектов;
- вычисление вектора отклика;
- вычисление коэффициентов классификационной функции  $F(x)$ ;
- установление связи с модулем `Макрос1ENVI_RBF()`;
- передача всех данных в модуль `Макрос1ENVI_RBF()`.

В свою очередь, модуль `Макрос1ENVI_RBF()` осуществляет классификацию объекта по алгоритму (1)–(11). Следует отметить, что несложно осуществить этот алгоритм и в языке IDL, но наличие таблиц Excel позволяет создавать удобный интерфейс, что важно с исследовательской точки зрения.

В исследованиях учитывались значения параметров  $c$  и  $\sigma$  *мультикватричной* функции и функции Гаусса на предмет эффективности классификации. Кроме того, классификация осуществлена по норме  $r$  и взаимной информации [3]. Для вычисления по функции Гаусса значение квадрата ее ширины  $\sigma$  определялось по формуле

$$\sigma^2 = ((255 - (-255)) / 3)^2 \text{Minnc} \cdot k \text{Kan}. \quad (25)$$

Величина (25) равна при  $k = 1$  дисперсии выражения

$$\sum_{k=1}^{\text{Kan}} \sum_{i=1}^N (x_{1ki} - x_{2ki}).$$

В (25) принято  $\text{Minnc}$  – количество пикселей в наименьшем ROI,  $255 - (-255) = 510$  – размах или максимальное значение разности  $(x_{1ki} - x_{2ki})$  пикселей, сравниваемых ROI (для простоты они обозначены цифрами 1 и 2);  $\text{Kan}$  – число каналов. В качестве  $c$  принималась величина

$$c = r_{\text{cp}} \cdot k, \quad (26)$$

где  $r_{\text{cp}}$  – среднее значение из всех ненулевых элементов матрицы интерполяции  $\Phi$ , полученных при нулевом значении параметра « $c$ » *мультикватричной* функции. Исследования, выполненные для различных  $k$ , приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты классификации рассматриваемыми методами

Оцениваемый объект	Объекты-учителя (эталонные)	Ожидаемый отклик для объекта	Норма (21) (в целых числах)	Значения классификационной функции при классификации по:						Взаимная информация [3]
				мультикватратичной функции			функции Гаусса			
				$k = 0$	$k = 0$ $k = 1$	$k = 0$ $k = 4$	$k = 1$	$k = 0$ $k = 2$	$k = 0$ $k = 4$	
1	2	132	2881	290	174	166	140	142	146	0,033
	3		1092							0,024
	4		2881							0,090
2	1	507		532	512	483	420	430	440	
	3		2992							0,019
	4		1302							0,185
3	1	119		322	181	140	117	120	124	
	2									
	4		3059							0,009
4	1	526		527	480	473	406	442	450	
	2									
	3									

Из данных таблицы следует, что по норме (24), по мультикватратичной функции, функции Гаусса при  $k$ , изменяющемся в интервале от 1 до 4, однозначно классифицируются все объекты. Даже самым простым евклидовым методом (по норме (24)) объекты 1 и 3 относятся к одному классу (норма равна 1092), а объекты 2 и 4 – к другому (при норме 1302). По максимуму взаимной информации (0,185) однозначно к одной группе относятся объекты 2 и 4. И лишь по остаточному принципу остальные объекты (1 и 3) можно отнести к другому классу. Метод максимума взаимной информации такой однозначностью, как метод RBF, не обладает. Так, взаимная информация 0,090 между объектами различного класса 1 и 4 больше, чем значение 0,023 той же величины между объектами одного класса 1 и 3.

**Выводы.** Метод радиальных базисных функций (RBF) при рекомендованных в настоящей работе параметрах позволяет однозначно классифицировать все объекты. В свою очередь, метод взаимной информации уступает в такой однозначности и должен применяться в комплексе с методами RBF и евклидовой нормы. Программный комплекс по классификации данным методом рекомендован в производство.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Галушкин, А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. – М. : Горячая линия, 2010. – 480 с.
2. Хайкин, С. Нейронные сети : полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. испр. ; пер. с англ. – М. : И.Д. Вильямс, 2006. – 1104 с.
3. Ярмоленко, А.С. Расчет взаимной информации между объектами для дешифрирования многоканальных изображений по ее максимуму / А.С. Ярмоленко, О.А. Куцаева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 3 – С. 108–116.

Поступила 11.05.2017

#### JUSTIFICATION OF THE METHOD OF RADIAL BASIS FUNCTIONS FOR CLASSIFICATION OF GEOSPATIAL OBJECTS

A. YARMOLENKO, A. KUTSAYEVA

*The development of new and more reliable methods of pattern recognition is an important issue nowadays. On the basis of the values of the radial basis functions a system of equations and the coefficients a dividing plane that extend the class classification of objects and to increase their stability is made. The equations have been made with the threshold as a free member or without. According to the results of the theoretical development the software package performing object classification, which consists of two interlinked software modules: `oro1_data_corr24bitRBF1.pro` and `Sub Макрос1ENVI_RBF()` is composed. The first is written in the algorithmic environment language IDL of ENVI and the second in the VISUAL BASIC environment in Excel. Studies have shown that the method of radial basis functions (RBF) when the recommended in this article the parameters unambiguously classify all objects.*

**Keywords:** radial basic functions, classification of objects, program complex ENVI, algorithmic language of IDL.

УДК 528.4

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ  
ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ****М.Г. ГЛЕБКО, А.О. ГУРКО**  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрена инженерно-геодезическая задача «Съемка фасадов здания электронным тахеометром». Смоделированы стандартная ситуация при решении указанной задачи, а также соответствующие измерения. Выполнен анализ двух способов решения поставленной задачи, произведена оценка их точности.*

**Ключевые слова:** съемка фасадов здания, электронный тахеометр, оценка точности, погрешности.

В общем понятии под инженерно-геодезическими задачами в строительстве мы понимаем отдельные, независимые части более крупных и общих задач, например, таких как создание планово-высотного обоснования для строительства здания [1]. Таким образом, рассматриваемая задача состоит из множества “подзадач”: создание сетки квадратов (закрепление пунктов, их редуцирование, контрольные измерения); вынос проектных осей основных сооружений (использование различного рода засечек) и т.д.

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что необходимость рассмотрения таких задач актуальна.

Рассмотрим инженерно-геодезическую задачу – **съемка фасадов зданий электронными тахеометрами**, стандартную для обеспечения строительного производства.

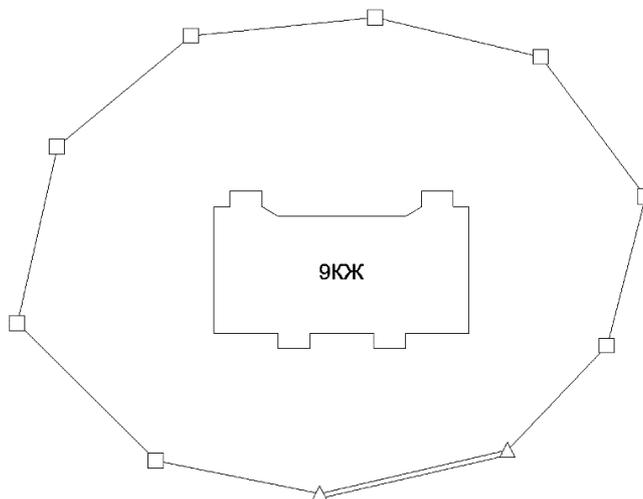
*Съемка фасадов зданий электронными тахеометрами:*

- смоделируем стандартную ситуацию, возникающую при съемке фасадов зданий;
- смоделируем измерения и произведем оценку точности выполняемой съемки.

Съемка фасадов зданий необходима для контроля отклонений конструктивных элементов фасада от проектных значений: 1) перед облицовкой здания (для уточнения точной формы фасадов здания); 2) перед реконструкцией здания (по причинам, названным выше);

*Первый* из них заключается в создании вокруг снимаемого здания планово-высотного обоснования. Такой способ целесообразно применять при съемке фасадов зданий сложной формы.

На рисунке 1 для визуального примера изображено здание несложной.



**Рисунок 1.** – Схема планово-высотного обоснования для съемки здания

*Второй способ* не подразумевает создания вокруг снимаемого здания планово-высотного обоснования. Здесь достаточно нескольких базисов напротив каждого фасада, с точек которого и ведется съемка (рисунок 2). Этот способ нашел применение при съемке небольших зданий и сооружений, достаточно простых по конфигурации и лишенных каких-либо архитектурных излишеств.

При решении вышеуказанных задач использовался тахеометр марки «Trimble m3 dr3». Прибор выбран исходя из его технических характеристик как среднестатистический тахеометр, используемый в строительстве [2–4], а также как тахеометр, позволяющий работать в безотражательном режиме. Поскольку в усло-

вию не ставилась необходимость получить определенную точность съемки, мы ограничились лишь малыми критериями при выборе прибора.

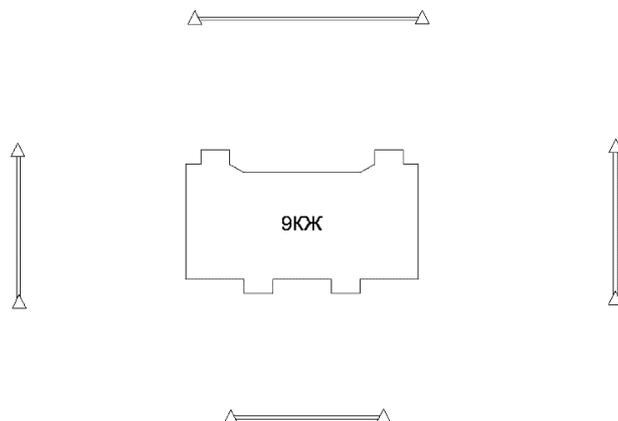


Рисунок 2. – Съемка здания с нескольких закрепленных базисов

Перед началом выполнения работ следует рационально выбрать систему координат (СК), чтобы при дальнейшей обработке полученных измерений не возникало затруднений. Систему координат следует выбрать так, как показано на рисунке 3. Начало системы координат совмещается с углом здания, ось  $X$  идет вдоль него, ось  $Z$  направлена вертикально, а ось  $Y$  дополняет систему до левой. Подобное расположение системы координат, помимо прочего, удобно тем, что отклонения искомой точки от вертикали являются значениями координат по оси  $Y$ .

Точки, с которых производится съемка, располагаются вдоль оси  $X$  на расстоянии от здания 1,5...2 его высоты так, чтобы было минимум таких ситуаций, при которых угол между плоскостью здания и лучом тахеометра был мал, поскольку это негативно сказывается на точности результатов безотражательной съемки.

Точки, имеющие синий и фиолетовый цвет, как показано на рисунке 4, это точки, снимаемые с первой и второй исходной станции; точки зеленого цвета подлежат съемке с двух исходных пунктов. Это выполняется для контроля. Далее координаты точек импортируются в САПР Autocad и происходит их обработка – соединение точек в грани конструкций здания. В результате получим 3D-модель здания, которая в нашем случае и является результатом съемки (рисунок 5). При необходимости получения развертки фасада большинство САПР обладают возможностью извлечения разрезов, проекций на различные плоскости из 3D-объектов.

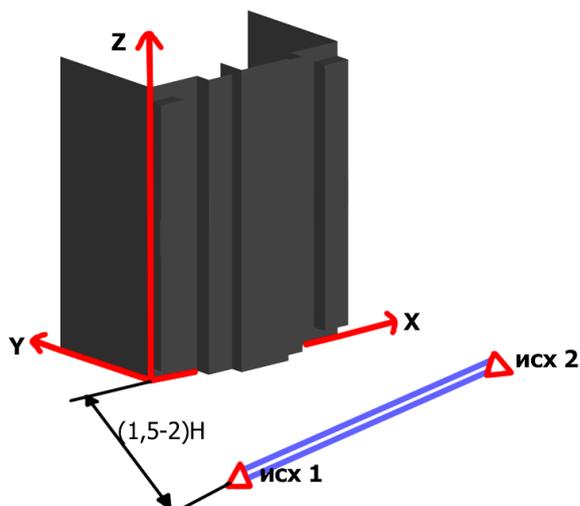


Рисунок 3. – Предлагаемая система координат для решения поставленной задачи

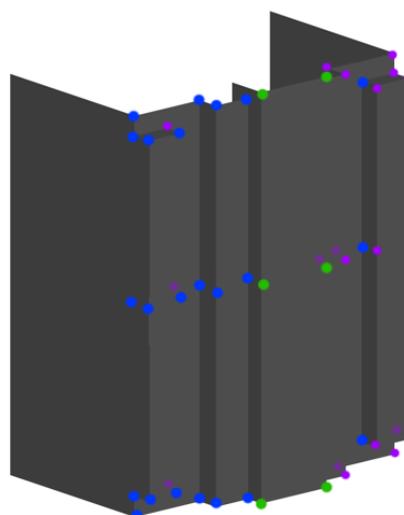


Рисунок 4. – Точки фасада, подлежащие съемке

Оценку точности предполагается выполнять, принимая во внимание, что точность зависит от следующих факторов: погрешности определения горизонтальных расстояний  $m_D$ ; погрешности измерения горизонтальных углов  $m_\beta$ ; погрешности определения высотных отметок  $m_h$ ; погрешности визирования  $m_{\text{виз}}$ .

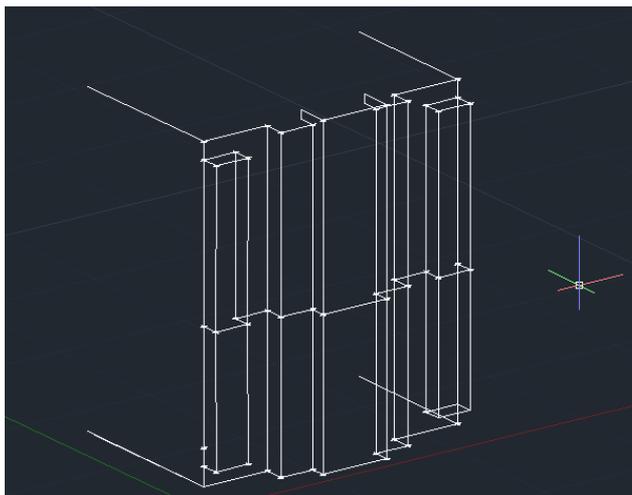


Рисунок 5. – 3D-модель здания

Погрешность измерения горизонтальных углов, выраженная в линейной мере ( $l_\beta$ ):

$$l_\beta = \frac{Dm_\beta}{\rho}, \quad (1)$$

где  $D$  – длина линии (м);  $m_\beta$  – погрешность измерения горизонтального угла;  $\rho = 206265''$ .

Погрешность установки оси вращения прибора в отвесное положение ( $m_\tau$ ) в линейной мере:

$$l_\tau = \frac{Dm_\tau}{\rho} \cdot \sin \nu, \quad (2)$$

где  $\nu$  – угол наклона визирного луча.

Вычисления средней квадратической погрешности положения выполняли для всех снимаемых точек. Удобнее всего реализовать это в электронных таблицах Excel.

Погрешность определения высотных отметок ( $m_h$ ):

$$m_h^2 = m_D^2 \operatorname{tg}^2 \nu + \frac{D^2 m_v^2}{\cos^4 \nu \rho^2}.$$

Влияние погрешности визирования  $m_{\text{виз}}$  при увеличении зрительной трубы в 30× составило 0,7 мм. Из этого следует, что влияние погрешности визирования на конечный результат пренебрежимо мало.

Руководствуясь принципом равных влияний, вычисляется итоговое значение погрешности определения пространственных координат произвольной точки фасада  $m_{\text{изм}}$ .

На основании проведенной оценки точности для иллюстрации полученных результатов построены два графика:

- зависимость средней квадратической ошибки (СКО) положения точки от расстояния до прибора (рисунок 6);

- зависимость СКО положения точки от угла наклона (рисунок 7).

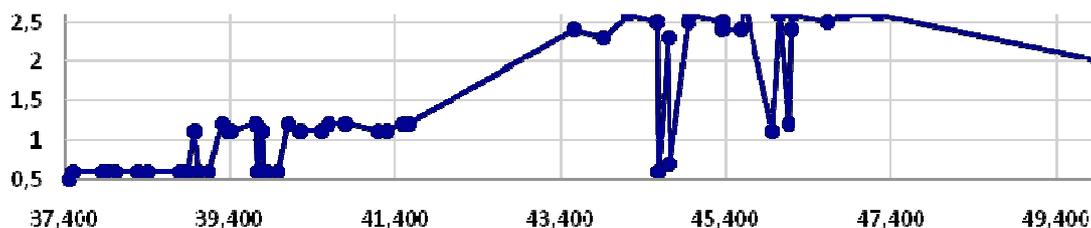


Рисунок 6. – Зависимость средней квадратической ошибки положения точки от расстояния до прибора

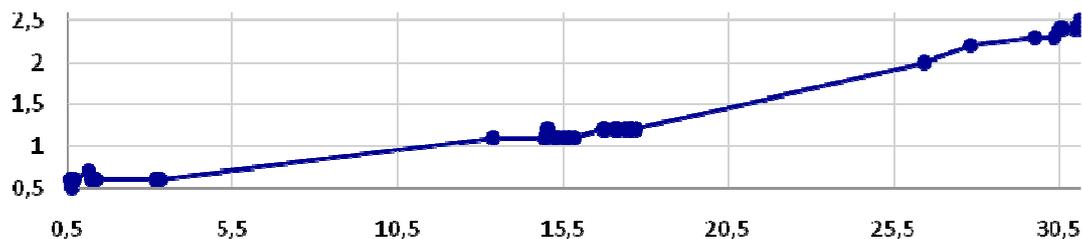


Рисунок 7. Зависимость средней квадратической ошибки положения точки от угла наклона

Из графиков (см. рисунки 6, 7) видно, что основная масса точек подчиняется возрастанию функции, т.е. с увеличением расстояния до снимаемой точки либо увеличением угла наклона точность положения точки ухудшается, что следует из анализа формул, используемых для вычисления точности. Однако на графиках есть точки, противоречащие этому утверждению. На графике, приведенном на рисунке 6, это заметно более отчетливо и можно объяснить тем, что средняя квадратическая погрешность положения точки зависит не только от  $D$ , но и от угла наклона, который согласно «эффекту сложения волн» уменьшает погрешность в точках, где она должна быть больше.

**Заключение.** Максимальная средняя квадратическая ошибка положения точки составила 2,8 мм, что вполне достаточно для проведения основных работ.

Однако на практике точность моделирования фасада зависит не только от точности геодезических работ, но и от того, какие точки выбираются для съемки (правильность интерпретации результатов), – не всегда можно четко визировать на тот или иной контур здания вследствие того, что его невозможно определить из-за оплыва штукатурки, трещин либо другого дефекта. Следовательно, необходимо проводить измерения на наиболее четкие точки элементов фасада. То есть измерения любых контуров здания предлагаем выполнять по граням, а не по углам. Особенно важные элементы фасада целесообразно измерять в натуре, и по этим измерениям контролировать результаты съемки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инженерная геодезия в строительном производстве : учеб. пособие для вузов / И.П. Интулов ; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2004. – 329 с.
2. Валтонен, Д.А. Съемка фасадов зданий с помощью электронных тахеометров / Д.А. Валтонен // Гео-профи. – 2010. – № 1. – С. 99–105.
3. Геодезические работы в строительстве. Правила проведения : ТКП 45-1.03-26-2006. – Введ. 01.07.06. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2006. – 66 с.
4. Höglund, R. Технология безотражательных измерений dg для геодезистов и инженеров-строителей / R. Höglund // White Paper. – 2005 – С. 1–14.

Поступила 28.02.2017

#### ENGINEERING AND GEODESIC WORKS IN SOLVING APPLIED PROBLEMS IN CONSTRUCTION

*M. HLEBKO, A. GURKO*

*The engineering and surveying task “Shooting facades total station” is considered. Standard situation for solving this problem, as well as the corresponding measurement is modeled. analysis of two ways to solve this problem and their assessment of accuracy is submitted.*

**Keywords:** shooting building facades, electronic total station, accuracy assessment, error.

УДК 504.062.2

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭКОЛОГО-БЕЗОПАСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
КАК ОСНОВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ СТРАНЫ**

*канд. техн. наук, доц. В.А. РЫБАК; А.Д. ГРИБ  
(Центральный научно-исследовательский институт  
комплексного использования водных ресурсов, Минск)*

*Рассматриваются перспективные эколого-безопасные технологии. Выявляется связь между развитием «зеленой» экономики и устойчивым развитием страны в целом. Показаны направления реализации задач по снижению вредных воздействий на окружающую среду и восстановлению природных комплексов в рамках международного сотрудничества в области развития «зеленой» экономики. Представлена методика оценки экологичности ресурсоемких технологий, выделены наиболее значимые параметры, характерные для ресурсоемких производств.*

**Ключевые слова:** «зеленая» экономика, устойчивое развитие, рациональное природопользование, оценка ресурсоемких технологий, принципы экологической оценки, перспективные эколого-безопасные технологии.

**Введение.** В современных условиях проблема эколого-экономической безопасности страны, устойчивого социально-экономического развития, а также использования человеческих возможностей в сфере рационального природопользования решается качественно новым образом. Непрерывно растущий спрос на природные ресурсы становится актуальной темой и требует к себе повышенного внимания – более эффективного их использования, а также поддержки тех экологических систем, которые являются источниками этих ресурсов.

Об актуальности рассматриваемого вопроса говорит и создание концепции «зеленой» экономики, которая на сегодняшний день является важным элементом государственной политики в области охраны окружающей среды.

Изучив различные подходы к определению сущности понятия «зеленая» экономика, можно говорить о том, что это хозяйственная деятельность, нацеленная на экономический рост и социальное развитие, основанная на разработке, производстве и эксплуатации технологий и оборудования рационального природопользования, а также мониторинга и прогнозирования климатических изменений. В рамках данной концепции предполагается гармоничное согласование между экономическим, экологическим и социальными компонентами, каждый из которых базируется на общих принципах устойчивого развития и в то же время имеет свои особенности функционирования и взаимодействия.

Возникновение феномена «зеленой» экономики связано с тем, что современный технологический уклад является экорасточительным и далеким от выполнения принципов устойчивого развития. Естественно, что его следствием становятся многочисленные эколого-экономические проблемы [1]. Наиболее актуальные из них – загрязнение атмосферного воздуха; значительная антропогенная нагрузка на поверхностные водные объекты; образование и накопление отходов; деградация экологических систем; сокращение биологического разнообразия; другие проблемы, результатом которых является изменение климата [2].

Несмотря на работу, проводимую в рамках единой политики перехода к «зеленой» экономике, в стране существует ряд нерешенных проблем. Среди них отсутствие четкого и последовательного определения «зеленой экономики» как основы перспективных эколого-безопасных технологий и отсутствие инструментов управления качеством окружающей среды, позволяющих оценивать используемую технологию на предмет экологичности и сравнивать технологии между собой, а также в полной мере отвечающих на вопрос: «Как технологии стать более экологичной?», и др.

Таким образом, решение обозначенных проблем будет являться одним из условий успешной реализации комплекса мер по снижению вредных воздействий на окружающую среду и восстановлению природных комплексов.

**Аналитический обзор**

По мнению многих экспертов, концепция «зеленой» экономики должна рассматриваться в увязке с более широкой концепцией устойчивого развития. Так, в итоговом документе конференции ООН «Рио+20» (2012 г.) «Будущее, которого мы хотим» «зеленая» экономика сводится к устойчивому развитию, то есть к способности рационально использовать природные ресурсы с меньшими отрицательными последствиями для окружающей среды, повышению эффективности использования ресурсов и уменьшению количества отходов.

Заметим, что концепция «зеленой» экономики не заменяет собой концепцию устойчивого развития, однако Т.Д. Макарецкая считает, что сейчас все более распространено признание того, что достиже-

ние устойчивости в основном зависит от создания правильной экономики. Устойчивость, по мнению А.В. Червякова, подразумевает модель экономического развития, обеспечивающего рост благосостояния и удовлетворение потребностей живущих людей и одновременное сохранение природной среды в том виде, который позволит будущим поколениям удовлетворять их потребности.

Необходимо отметить, что важнейшими задачами обеспечения устойчивого развития в области экологии является снижение негативного воздействия на окружающую среду и улучшение ее качественного состояния, а также восстановление нарушенного экологического равновесия.

Новый аспект понимания экономического устойчивого развития выдвинул О.С. Пчелинцев, предложив трактовать его как переход от экономики использования ресурсов к экономике их системного воспроизводства, что связано, по мнению автора, с обустройством территории и развитием инфраструктуры. Однако, на наш взгляд, человечество сегодня не обладает необходимыми средствами и технологиями для воспроизводства, например, нефти или драгоценных металлов.

Интересным представляется мнение Т.А. Савицкой, которая говорит, что «зеленая» экономика – это, по сути, практический подход к достижению устойчивого развития, то есть указание пути, который позволит сформировать экономику завтрашнего дня.

Примечательно, что Т.Д. Макарецкая считает, что возникновение феномена «зеленой» экономики связано с тем, что современный технологический уклад является экорасточительным и далеким от выполнения принципов устойчивого развития. Естественно, что его следствием становятся многочисленные экономические, экологические и социальные проблемы.

В современном мире важнейшими задачами обеспечения устойчивого развития в области экологии являются «снижение негативного воздействия на окружающую среду и улучшение ее качественного состояния, а также восстановление нарушенного экологического равновесия» [3, с. 29].

В рамках международного сотрудничества в области развития «зеленой» экономики реализация этих задач должна включать такие направления [4]:

- *создание общей системы мониторинга экологических показателей в рамках геоинформационной системы*, включающей спутниковое слежение и предупреждение об экологических бедствиях;
- *создание общего информационно-вычислительного пространства в области экологических технологий и альтернативных расчетов* по их эффективному производству и применению;
- *общий бюджет для расходов на экологические мероприятия по всем важнейшим направлениям* – от поддержания биоразнообразия до разработки и внедрения «зеленых» технологий.

Результатом этих мероприятий станет развитие такой экономики, «которая приведет к повышению благосостояния людей и укреплению социальной справедливости при одновременном существенном снижении рисков для окружающей среды и дефицита экологических ресурсов, экономики с низким уровнем загрязнения окружающей среды и эффективным использованием природных ресурсов» [5, с. 72].

В настоящее время в качестве одного из приоритетных направлений инновационного развития Республики Беларусь выступает промышленность. Экспертами обозначена намеченная ориентация промышленного комплекса на экологически безопасные производства со щадящим режимом потребления ресурсов. Однако сегодня приоритетным направлением промышленной политики, направленным на сведение к минимуму техногенных воздействий на окружающую среду, является внедрение экологических стандартов. Так, к настоящему времени в республике введены и действуют свыше 20 тыс. стандартов, соблюдение которых направлено на обеспечение экологической безопасности и безопасности потребительских товаров [6]. Эти инструменты хотя и являются важными элементами государственной политики в области охраны окружающей среды, однако не позволяют оценивать текущую технологию на предмет экологичности, а также сравнивать технологии между собой.

Вместе с тем эколого-безопасные технологии являются важнейшим инструментом повышения безопасности и качества жизни современного общества, формирование которых возможно только на основании постоянного мониторинга и оценки их экологичности. Такая оценка экологичности ресурсоемких технологий должна базироваться на определенных принципах, которые в совокупности определяют подходы к отбору *содержания методики оценки экологичности проектов и технологий*.

Так, при разработке методики оценки экологичности ресурсоемких технологий необходимо следовать следующим принципам [7]:

1) *принцип системности*, в соответствии с которым каждый отдельный процесс или производство рассматривается как элемент динамичной системы – территориально-производственный комплекс в регионе и эколого-экономическая система в целом. Так, принцип системности должен учитывать существующую взаимосвязь производственных, социальных и природных процессов;

2) *принцип комплексного использования ресурсов*. Данный принцип требует максимального использования всех компонентов сырья, сопутствующих элементов, максимально возможной замены первичных сырьевых и энергетических ресурсов вторичными;

3) принцип цикличности материальных потоков, который должен привести к формированию в отдельных регионах и во всей техносфере сознательно организованного и регулируемого техногенного круговорота вещества и связанных с ним превращений энергии;

4) принцип ограничения воздействия производства на окружающую природную и социальную среду (атмосферный воздух, воду, поверхность земли, рекреационные ресурсы и здоровье населения). Данный принцип, в первую очередь, связан с планомерным и целенаправленным ростом объемов производства и его экологического совершенства;

5) принцип рациональности организации производства, который предполагает оптимизацию производства одновременно по энерготехнологическим, экономическим и экологическим параметрам. Основным путем достижения этой цели являются разработка новых и усовершенствование существующих технологических процессов и производств.

#### **Практическая часть**

В рамках создания методики оценки экологичности ресурсоемких технологий выделены параметры, наиболее значимые для оценки экологичности ресурсоемких производств. К данным параметрам относятся: безотходность, ресурсоемкость, энергоемкость и землеемкость.

*Безотходность* как параметр эколого-безопасных технологий предполагает такой способ производства, который обеспечивает максимально полное использование перерабатываемого сырья и образующихся при этом отходов.

*Ресурсоемкость* рассматривается как показатель, отражающий степень эффективности использования ресурсов предприятия (материалов, сырья и т.д.) при производстве единицы продукции.

*Энергоемкость* предусматривает рациональное использование энергетических ресурсов, то есть экономически оправданное расходование, электроэнергии, газа и тепла в отношении к объему производимой продукции.

*Землеемкость* раскрывает отношение используемой земли к объему продукции, произведенной на данной земле.

Расчет коэффициентов вышеназванных параметров экологичности производится с помощью следующих формул:

1) коэффициент безотходности:  $K_6 = m_{\text{отходов}} / m_{\text{исп. сырья}}$ , где  $m_{\text{отходов}}$  – количество отходов, произведенных за год;  $m_{\text{исп. сырья}}$  – количество использованного сырья за год; количество отходов ( $m_{\text{отходов}}$ ), полученное при производстве цельномолочной продукции (ЦМП) рассчитывается как процент от общего количества произведенных отходов предприятием за год.

Количество отходов ( $m_{\text{отходов}}$ ) определяется суммой значений следующих видов показателей: выбросы в атмосферный воздух, отходы производства, сточные воды.

$K_6 < 1$ ;  $K_6$  должен стремиться к 0, то есть количество отходов ( $m_{\text{отходов}}$ ) должно быть значительно меньше количества использованного сырья ( $m_{\text{исп. сырья}}$ ). Так, технология может считаться безотходной в случае, если  $K_6 = 0$ . Наиболее безотходной технологией может считаться технология, которая имеет минимальное значение  $K_6$ ;

2) коэффициент ресурсоемкости:  $K_7 = m_{\text{исп. сырья}} / V$ , где  $m_{\text{исп. сырья}}$  – количество использованного сырья;  $V$  – количество продукции, выпущенной за год.

Количество использованного сырья ( $m_{\text{исп. сырья}}$ ) определяется суммой значений следующих видов показателей: молоко для ЦМП, дополнительное сырье, упаковка.

$K_7$  должен стремиться к 0, то есть количество использованного сырья должно быть значительно меньше количества выпущенной продукции;

3) коэффициент энергоемкости:  $K_8 = F / V$ , где  $F$  – использованные энергоресурсы;  $V$  – количество продукции, выпущенной за год;  $F$  для производства ЦМП рассчитываются как процент от общего потребления энергоресурсов предприятием за год.

Использованные энергоресурсы ( $F$ ) для производства ЦМП определяются суммой значений следующих видов показателей: природный газ, электроэнергия, теплоэнергия.

$K_8$  должен стремиться к 0, то есть чем меньше  $K_8$ , тем менее энергоемка технология и, соответственно, более экологична;

4) коэффициент землеемкости:  $K_9 = X_{\text{га}} / V$ , где  $X_{\text{га}}$  – количество гектаров, занимаемое предприятием, для производства продукции;  $V$  – количество продукции, выпущенной за год. Количество гектаров, занимаемое предприятием ( $X_{\text{га}}$ ) для производства ЦМП, рассчитывается как процент от количества гектаров, занимаемых предприятием для производства всей продукции.

Коэффициент землеемкости  $K_9$  должен стремиться к 0, то есть на единице площади должно производиться больше продукции.

Таким образом, расчеты коэффициентов выделенных эколого-экономических параметров перспективных эколого-безопасных технологий позволяют оценить применяемую технологию на предмет экологичности и сравнить технологии между собой.

Для практической апробации предложенных параметров выполнены исследования экологичности ресурсоемких технологий в области производства молочной продукции. Данное направление актуально для Республики Беларусь и в общем объеме промышленного производства занимает лидирующее положение, о чем свидетельствуют данные, представленные в таблице.

Средние объемы производства отдельных видов промышленной продукции за 2000–2015 годы (тыс. т)

Производство пищевых продуктов	Период 2000–2015 годы
Мясо и пищевые субпродукты, тыс. т	10 206,2
Колбасные изделия, тыс. т	4 047,6
Масло сливочное, тыс. т	1 447,1
Цельномолочная продукция (в пересчете на молоко), тыс. т	21 827,0
Сыры, тыс. т	1 726,3
Маргарин и аналогичные пищевые жиры, тыс. т	275,8
Растительные масла, тыс. т	1 772,0
Шоколад, кондитерские изделия из шоколада и сахара, тыс. т	1 170,9

По результатам оценки и анализа параметров экологичности выполняется подбор наиболее оптимальных природоохранных мероприятий. Система включает мероприятия по оптимизации выделенных параметров безотходности, ресурсоемкости, энергоемкости и землеемкости.

Данная система разработана как в общем для предприятий, так и отдельно для предприятий каждой отрасли.

В общем, мероприятия по оптимизации безотходности как параметра эколого-безопасных технологий предполагают использование такого способа производства, который обеспечивает максимально полное использование перерабатываемого сырья и образующихся при этом отходов. Кроме того, важно разрабатывать и внедрять прогрессивные способы утилизации обходов и нейтрализации веществ, загрязняющих окружающую среду.

В комплекс мероприятий по сокращению до минимума количества вредных отходов и уменьшению их воздействия на окружающую природную среду, по рекомендациям различных авторов, входят:

1) разработка различных типов бессточных технологических систем и водооборотных циклов на основе очистки сточных вод. Одно из основных мероприятий на начальном внедрении малоотходной и безотходной технологии – наличие систем повторного и оборотного использования воды.

Совершенствование основного технологического процесса, рост количества и мощностей водоочистных сооружений, методов очистки сточных вод и стабилизации очищенных, использование образующихся осадков позволяет создавать в последующем системы замкнутого (бессточного) водоснабжения. Так, при создании оборотных и замкнутых систем водоснабжения необходимо рассматривать основной технологический процесс и очистку сточных вод как единое целое.

2) разработка систем переработки отходов производства во вторичные материальные ресурсы. Это возможно посредством создания комплекса предприятий с цепочной, от одного к другому, схемой использования отходов, когда образующиеся отходы производства используются в качестве сырья для производства другой продукции;

3) создание и выпуск новых видов продукции с учетом требований повторного ее использования;

4) создание принципиально новых производственных процессов, позволяющих исключить или сократить технологические стадии, на которых происходит образование отходов. Так, при разработке безотходного производства необходимо учитывать, что производственный процесс должен осуществляться при минимально возможном числе технологических стадий и аппаратов, поскольку на каждой из них образуются отходы и теряется сырье;

5) разработка мероприятий по оценке и уменьшению степени токсичности отходов и их компонентов, а также их опасности для окружающей среды. Мероприятия по оптимизации ресурсоемкости как параметра эколого-безопасных технологий рассматриваются как увеличение степени эффективности использования ресурсов предприятия (материалов, сырья и т.д.) при производстве единицы продукции. Это возможно путем создания технологий с замкнутыми циклами производства и комплексным использованием сырья.

Мероприятия по оптимизации энергоемкости как параметра эколого-безопасных технологий предусматривают рациональное использование энергетических ресурсов, то есть экономически оправданное расходование, электроэнергии, газа и тепла при производстве продукции. Это возможно 1) путем исполнения освещения в соответствии с действующими нормами, недопущения избытка или недостатка освещенности; 2) путем замены ламп.

Мероприятия по оптимизации землеемкости как параметра эколого-безопасных технологий предполагают минимальное использование земли для реализации проектов и технологий либо увеличение стоимости платы за землю.

Кроме того, одним из основных мероприятий по ускорению темпов внедрения перспективных эколого-безопасных технологий является разработка новых экономических принципов создания и проектирования промышленных производств с учетом экологических вопросов.

#### **Заключение**

Сегодня концепция «зеленой» экономики становится общемировой тенденцией, новой глобальной экономической моделью устойчивого развития, а наличие в Республике Беларусь крупного промышленного комплекса наряду с ограниченным количеством природных сырьевых и энергетических ресурсов диктует необходимость применения современных достижений науки и передового опыта в процессе освоения перспективных эколого-безопасных производственных технологий.

Так, эксперты обращают внимание на необходимость создания благоприятных условий для разработки, внедрения, распространения и передачи эколого-безопасных технологий, опираясь на поддержку международного сообщества, а также на важность укрепления национального научно-технического потенциала в целях устойчивого развития.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Макарецкая, Т.Д. «Зеленая экономика» как основа устойчивого развития государства / Т.Д. Макарецкая // Науч. тр. ; Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь. – Минск, 2013. – Вып. 15, ч. 1. – С. 262–269.
2. Национальный план действий по развитию «зеленой» экономики в Республике Беларусь до 2020 года [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Республики Беларусь 21 декабря 2016 № 1061. – Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/fileb9cfb7e9401807aa.PDF>. – Дата доступа: 10.03.2017.
3. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2020 г. / Нац. комис. по устойчивому развитию Респ. Беларусь ; редкол.: Л.М. Александрович [и др.]. – Минск : Юнипак, 2004. – 202 с.
4. Титова, Е.О. Формирование «зеленой экономики» в Союзном государстве = Creation of the green economy in the Union State / Е.О. Титова // Гуманітарна-эканамічны веснік. – 2013. – № 3. – С. 96–104.
5. Шимова, О.С. Оценка эффекта декарбонизации для мониторинга «зеленой» экономики / О.С. Шимова // Белорус. экон. журн. – 2012. – № 2. – С. 71–83.
6. Хамчуков, Д.Ю. «Зеленый» сектор в экономике / Д.Ю. Хамчуков // Стратегия устойчивого развития Беларуси: экологический аспект / Е.А. Антипова [и др.]. – Минск, 2014. – С. 12–25.
7. Основные принципы оценки экологичности производства [Электронный ресурс] // studopedia.ru – информ. ресурс. – Режим доступа: <http://studopedia.org/1-137715.html>. – Дата доступа: 14.07.2016.

*Поступила 11.05.2017*

#### **PROMISING ENVIRONMENTAL-FRIENDLY TECHNOLOGIES AS THE MAIN DIRECTION OF SUSTAINABLE INNOVATIVE DEVELOPMENT OF THE COUNTRY**

**V. RYBAK, H. HRYB**

*Promising environmental-friendly technologies are considered. The relationship between the development of the “green” economy and the sustainable development of the country as a whole is revealed. The directions of the implementation of tasks to reduce the harmful effects on the environment and restore natural complexes within the framework of international cooperation in the development of the “green” economy are shown. The methodology for assessing the environmental friendliness of resource-intensive technologies is presented, the most significant parameters characteristic for resource-intensive industries are identified.*

**Keywords:** “green” economy, sustainable development, environmental management, evaluation of resource-intensive technologies, the principles of the environmental assessment, promising environmental-friendly technologies.

УДК 66.013.8

**ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
ОТ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТРАБОТАННЫХ РАСТВОРОВ,  
ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПОГРУЖНОЙ ОЧИСТКЕ МАШИН И ДЕТАЛЕЙ**

**В.А. ДРОНЧЕНКО; канд. техн. наук, доц. В.И. СЕМЕНОВ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Представлены результаты исследования с целью разработки технологии регенерации и утилизации очистных растворов. Осуществлена оценка объемов отработанных растворов технических моющих средств, образующихся при очистке машин и деталей технологического оборудования. Даны рекомендации, позволяющие уменьшить объем отработанных очистных растворов. Предложен способ утилизации этих растворов.*

**Ключевые слова:** погружные очистные машины, технические моющие средства, отработанные растворы, геоэкология, регенерация, утилизация, эмульсии.

Ремонт технологического оборудования сопровождается одной из важнейших операций – очисткой деталей от эксплуатационных загрязнений, на долю которой приходится 6...8% затрат на капитальный ремонт машин [1]. Затраты на очистку машин и деталей могут быть значительно сокращены при условии использования эффективных технических моющих средств (ТМС) и применении очистного оборудования, обеспечивающего снижение расхода тепла и электроэнергии, экономию ТМС и воды.

По данным профессора Н.Ф. Тельнова [2], предприятия по ремонту машин применяют более 100 наименований различных ТМС, из которых наиболее широкое применение получили средства серий Лабомид (Лабомид-101, Лабомид-102, Лабомид-203), разработанные в ГОСНИТИ (Москва), и МС (МС-6, МС-8, МС-15, МС-32), разработанные в МИИСП (Москва). Основными действующими компонентами этих ТМС являются поверхностно-активные вещества (ПАВ) и щелочные добавки.

Перед многими предприятиями остро стоит проблема утилизации отработанных растворов ТМС. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, сравнительно небольшие объемы этих жидкостей для большинства малых и средних предприятий делают установку специализированного оборудования по переработке и утилизации этих жидкостей экономически нецелесообразной. Во-вторых, ввиду того, что основной компонент отработанных растворов ТМС – вода, а транспортные расходы по доставке на предприятия, обладающие таким оборудованием, велики, то утилизация для таких предприятий оказывается экономически невыгодной. Это вынуждает некоторые предприятия к нелегальному сбросу отработанных растворов ТМС в сточные воды, что представляет потенциальную угрозу окружающей среде.

Для предотвращения этой проблемы необходимо проведение исследований по поиску как способов снижения объема образования этих жидкостей, так и способов их использования непосредственно на предприятии, либо других предприятиях региона.

Уменьшить вредное воздействие на окружающую среду отработанных растворов, образующихся при погружной очистке машин и деталей технологического оборудования, и является целью данной работы.

**Материалы, оборудование методы.** В Полоцком государственном университете ранее были проведены экспериментальные исследования [3–5], которые позволили определить процентное содержание воды в эмульсии на основе нефтесодержащих отходов (НСО), приготовленной с требуемой стабильностью с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем.

Исследования проводились нами на опытно-промышленной установке по приготовлению эмульсии с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем [3–5], с установленной частотой импульсов 1 Гц при давлении сжатого воздуха в сети подвода 0,4 МПа.

Перед новыми экспериментальными исследованиями были выдвинуты следующие гипотезы:

- возможное использование для приготовления эмульсии отработанных водных растворов ТМС вместо воды;

- возможно снижение количества эмульгатора, необходимого для получения стабильной эмульсии, так как основными действующими веществами при эмульгировании являются ПАВ, а отработанные моечные растворы содержат в своем составе ПАВ и щелочные добавки, благоприятно влияющие на стабильность эмульсии.

Исследования проводились по методике, которая подробно изложена в [5].

Эмульгатор при проведении экспериментальных исследований использовался в долях от объема, использованного при экспериментальных исследованиях, в которых использовались НСО и вода.

**Моечные машины, объем отработанных растворов ТМС и их влияние на окружающую среду.**

При ремонте технологического оборудования для очистки от остатков масел и смазок, асфальто-смолистых загрязнений, как правило, используют струйные и погружные моечные машины.

Внедрение новых высокоэффективных ТМС способствует тому, что погружные машины постепенно вытесняют с рынка струйные [6]. Это объясняется высоким пенообразованием последних, а также тем, что высокая кратность перекачивания моющего раствора (до  $20 \text{ ч}^{-1}$ ) приводит к образованию стабильных эмульсий частиц загрязнения в растворе, в результате чего растворы быстро загрязняются. При этом большая часть молекул ПАВ адсорбируется на уже очищенных частицах загрязнения и в процессе дальнейшей очистки не участвует. Такие эмульсии практически не поддаются расслоению и регенерации, а их слив в канализацию наносит огромный урон окружающей среде.

На участках по разборке и очистке технологического оборудования, как правило, используют погружные моечные машины, реализующие способ интенсификации процесса очистки линейными возвратно-поступательными колебаниями очищаемых изделий в моющем растворе. Кроме данного типа, используют моечные машины с маятниковыми колебаниями очищаемых объектов; роторные моечные машины; моечные машины с лопастными винтами и роторами-активаторами.

По данным Л.М. Гурвича [7], срок службы растворов ТМС составляет от 1...2 до 2...4 недель. Исходя из этого рассчитан предполагаемый средний годовой объем отработанных растворов ТМС для различных типов моечных машин (результаты приведены в таблице), который составляет на одну моечную машину от  $2,25 \text{ м}^3$  (ОМ-9101) до  $1320,00 \text{ м}^3$  (ОМ-14286).

Таблица. – Средний годовой объем отработанных растворов ТМС, образующихся при работе моечных машин на участках разборки и очистки технологического оборудования

Марка машины	Производительность очистки деталей машин и оборудования, т/ч	Объем раствора ТМС в моечной машине, $\text{м}^3$	Средний объем раствора, необходимого для очистки единицы массы, $\text{м}^3/\text{т}$	Средний годовой объем отработанных растворов ТМС, $\text{м}^3$
<i>Моечные машины с возвратно-поступательными колебаниями грузовой платформы</i>				
ОМ-9101	0,02	0,07	0,0125	2,25
ОМ-12190	0,05...0,10	0,5	0,034	16,25
Мирин	0,2	0,5	0,0095	16,25
Мингус АЖ-ЛИФ	0,6	1,2	0,0075	39,00
ОМ-22609	1,5	3,0	0,0075	97,50
ОМ-22602	4,0	6,0	0,005	195,00
<i>Моечные машины с маятниковыми колебаниями очищаемых объектов</i>				
ОМ-21630	3	5,0	0,0025	165,00
ОМ-21629	5	10,0	0,0075	330,00
ОМ-21628	8	20,0	0,0095	660,00
<i>Моечные машины с лопастными винтами</i>				
ОМ-28101	1,5	3,6	0,009	117,00
ОМ-14251	4,0	4,6	0,0045	149,50
ОМ-5333	12	22,0	0,007	665,00
<i>Моечные машины с роторами-активаторами</i>				
ОМ-14295	2,7	7,0	0,0095	227,50
ОМ-14286	8	40	0,0185	1320,00

Исходя из результатов расчетов (см. таблицу) видно, что наименьшее потребление раствора при очистке 1 тонны деталей составило  $0,0045 \text{ м}^3/\text{т}$  (ОМ-14251) и  $0,0050 \text{ м}^3/\text{т}$  (ОМ-22602); наибольшее –  $0,0185 \text{ м}^3/\text{т}$  (ОМ-14286). Эти величины не дают ответ на вопрос, какая из машин наиболее или наименее эффективна, так как каждая из машин предназначена для очистки деталей определенной номенклатуры. Однако позволяют дать ориентировочную оценку объему растворов ТМС, который необходим предприятию. Например, для производств с массой очищаемых деталей 100 тыс. тонн в год необходимый объем раствора составляет  $1,15 \text{ тыс. м}^3$ .

Из данных О.И. Фокина [8] следует, что моющие растворы ТМС способны накапливать в своем составе до 43 г/л масел. Это около 50 тонн масел применительно к производству по объему ремонта, сопоставимому с производством, приведенным в качестве примера. Отработанные растворы ТМС содержат в своем составе наряду с нефтесодержащими продуктами значительное количество щелочных добавок и различных ПАВ, которые трудно выделить из раствора и утилизировать. Все известные технологии разделения этих растворов на отдельные компоненты требуют не только существенных капитальных

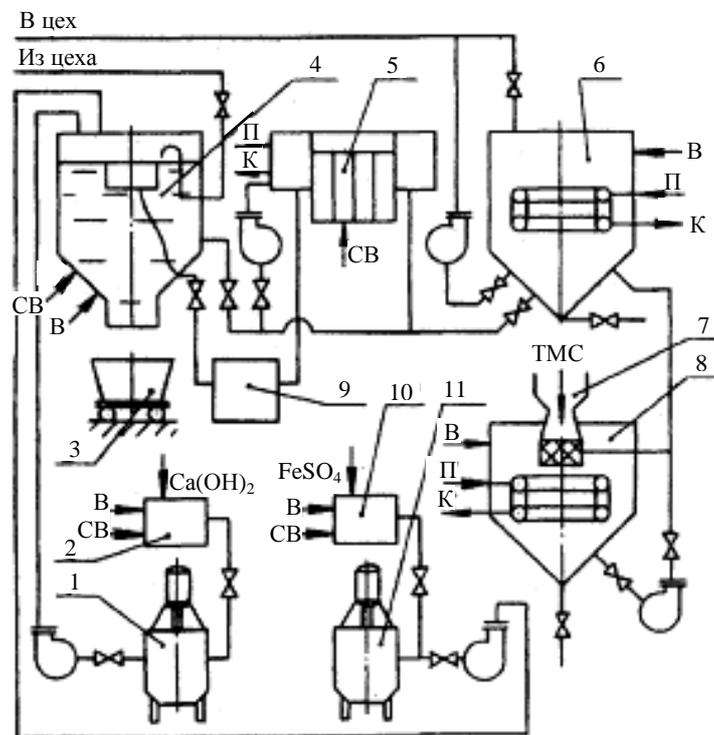
вложений, но и значительных текущих расходов, что для большинства средних и малых предприятий является труднодостижимым.

Современные системы и схемы канализации городов Беларуси предусматривают в большинстве случаев совместную очистку коммунальных и производственных сточных вод в общих очистных сооружениях биологической очистки [9]. Однако при сливе отработанных моющих растворов содержащиеся в них ПАВ, попадая в водоемы, образуют стойкую пену, которая препятствует аэрации и ухудшает очистительную способность водоемов. В пене концентрируются другие органические загрязнения и различные микроорганизмы в такой степени, что содержание их может многократно превышать предельно допустимую концентрацию. Но главная опасность состоит в том, что эмульгированные нефтепродукты и ПАВ вызывают отмирание первичных звеньев пищевых цепей водоемов. Гибель водорослей и планктона в сочетании с замедлением процессов самоочищения водоемов ведет к массовой гибели живых организмов [9]. Кроме того, ПАВ способны проникать в водоносные слои и загрязнять подземные воды, что приводит к снижению количества пресной воды, пригодной к использованию, обостряя проблему ее дефицита, имеющуюся в настоящее время практически повсеместно в мире [9].

**Регенерация очистных растворов.** Для регенерации отработанных растворов ТМС технологические машины, реализующие способы отстаивания, коагуляции и флотации, применяют при создании индивидуальных и централизованных пунктов регенерации этих растворов. Рациональный путь использования растворов предполагает периодическое удаление загрязнений и добавку свежего продукта.

Мероприятия по восстановлению первоначальных свойств отработанных растворов ТМС, включая своевременную очистку, позволяют продлить сроки службы растворов ТМС в 5...6 раз [10] и тем самым снизить расходы как на покупку ТМС, так и на утилизацию отработанных растворов.

Предложена схема цехового пункта приготовления подачи к технологическим машинам, очистки и регенерации растворов ТМС (рисунок 1). Основные части пункта: дозатор ТМС 7, бак концентрированного раствора 8, бак подготовки раствора 6, бак-отстойник 4, тележка для шлама 3, флотатор 5, сборник нефтепродуктов 9, бак приготовления известкового молока 2, бак смешивания железного купороса 10, расходные баки 1 и 11.



В – вода; П – пар; К – конденсат; СВ – сжатый воздух

Рисунок 1. – Цеховой пункт приготовления, очистки и регенерации растворов ТМС

Свежий раствор готовят с помощью дозатора ТМС, бака концентрированного раствора и бака подготовки раствора. В бак 8 подается вода, где нагревается паровыми регистрами до температуры 50 °С. В корзину бака из бункера дозатора 7 подают порцию ТМС из расчета 100 г/л. Корзина содержит коль-

цевой трубопровод с соплами, из которых поступает под давлением вода и перемешивается с ТМС. Раствор перемешивают до полного растворения порошкового ТМС.

Полученный раствор подают в бак 6, где он подогревается до рабочей температуры и смешивается с находящейся там водой с помощью насоса. Концентрация доводится до 30 г/л. Насосом подают приготовленный раствор к цеховым технологическим машинам.

Загрязненный раствор подают с разборочно-очистного участка в бак-отстойник 4.

На пункте предусмотрены такие фазы очистки и регенерации загрязненного раствора: отстаивание; удаление всплывших нефтепродуктов; удаление выпавшего осадка; коагуляция растворов и осаждение хлопьев гидрооксидов; флотация как тонкая очистка с удалением нефтепродуктов и пены; восстановление требуемой концентрации ТМС в растворе.

Слой всплывших нефтепродуктов после отстаивания раствора в баке-отстойнике 4 сдувают струями сжатого воздуха и подают в нефтесборник 9, а после слива раствора из бака-отстойника в бак 6 удаляют осадок в тележку 3. В баке 6, при необходимости, восстанавливают концентрацию раствора путем добавления концентрированного раствора из бака 8.

Раствор после 420 часов работы подвергают коагуляционной очистке, которая сопровождается укрупнением частиц загрязнений и выпадением из коллоидного раствора хлопьевидного осадка. Для коагуляционной очистки используют железный купорос и гашеную известь. В баки 2 и 10 вводят гашеную известь  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в виде пылянки и железный купорос  $\text{FeSO}_4$ . В баки 2 и 10 также подают воду и с помощью сжатого воздуха в течение 25...30 минут составляющие перемешивают. Гашеная известь растворяется в воде незначительно и ее в виде известкового молока подают в расходный бак 1. Железный купорос, полностью растворившийся в воде в баке 10, аналогичным образом подают в расходный бак 11. Коагулянты (из расчета их концентрации 4...5 г/л по активному веществу) подают насосами в бак 4 и при интенсивной подаче сжатого воздуха в раствор перемешивают с последним. На коагуляцию и осаждение хлопьев гидрооксидов необходимо 8...10 часов работы, причем последние 3,5...4 часа осаждение протекает без подачи барботажного воздуха.

Доочистку моющего раствора производят с помощью ЦНИИ-5 – флотационной установки 5, в которую поступает скоагулированный раствор.

Осадок от коагуляции и отходы от флотации поступают в тележку для шлама 3.

Очищенный раствор подают в бак 6 для восстановления концентрации ТМС, на что необходимо 30...50% от первоначального их количества.

Данные мероприятия позволяют продлить срок службы раствора в 5...6 раз и тем самым уменьшить объем полностью отработанного раствора, подлежащего утилизации.

Необходимо отметить, что по окончании срока службы природоохранный аспект превалирует над экономическим, учитывающим исключительно выгоды и техническую целесообразность повторного использования растворов. Беспредельно их регенерировать невозможно. Наступает необходимость утилизации отработанных водных растворов ТМС.

**Утилизация отработанных моечных растворов.** Отработанные растворы ТМС подлежат обезвреживанию и утилизации. За рубежом это считают не только экологическим мероприятием, но и источником получения прибыли, поскольку продукты, получаемые при разделении или переработке, могут являться товарными. Наличие в отработанных растворах ТМС нефтесодержащих продуктов повышает экономическую целесообразность их утилизации. Обезвреживание отработанных растворов ТМС, как правило, предполагает их разложение на водную и масляную фазы с последующей очисткой масла и воды. Масло, выделенное из смеси отработанных растворов ТМС, используется в основном в качестве топлива [10].

В качестве термических способов утилизации отработанных растворов используют, как правило, их ресурсозатратное сжигание [10]. Однако простое сжигание в специальных печах требует существенных затрат и экономически невыгодно.

Полностью отработанные растворы ТМС можно нейтрализовать реагентным методом до pH 6,8...8,5 непосредственно в погружных моечных машинах в следующей последовательности [6]. Замеряют концентрацию щелочи в растворе и его объем. Рассчитывают массы нейтрализующего вещества и реагента. Подают нейтрализующее вещество при помощи кислотостойкого насоса в отработанный раствор. Для нейтрализации щелочных растворов применяют серную или соляную кислоту. В течение 10 минут производят перемешивание раствора, например, с помощью воздушного барботажа. Водородный показатель раствора определяют с помощью универсальной индикаторной бумаги.

В Полоцком государственном университете проводятся исследования с целью разработки технологии приготвления мелкодисперсной эмульсии с высокой стабильностью из нефтесодержащих отходов с возможностью дальнейшего использования в технологическом процессе отработанных водных растворов ТМС [3–5; 10]. Эмульгирование основано на разрушении поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей ударными волнами, возникающими при работе пневматического излучателя. Использование этой технологии позволит решить проблему защиты окружающей среды от вредного воздействия отработанных растворов ТМС.

Результаты проведенных экспериментов (доля выделившейся воды в %) представлены на рисунке 2. Получено степенное уравнение регрессии:

$$y(k_3) = 919,53 \cdot k_3^{-1,503},$$

где  $y$  – объем выделившейся воды за время, равное одному месяцу, %;  $k_3$  – доля эмульгатора от его объема, необходимого для получения эмульсии из НСО и воды, %.

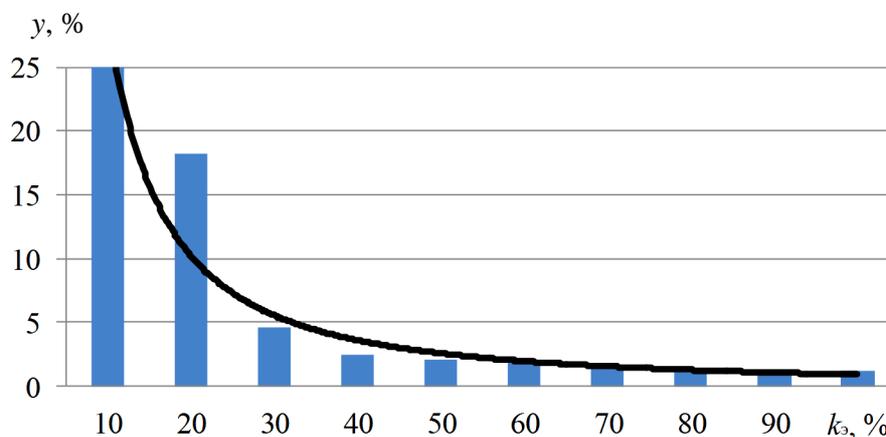


Рисунок 2. – Зависимость доли выделившейся воды  $y$  от доли эмульгатора  $k_3$  в % относительно его объема, необходимого для приготовления эмульсии без отработанного раствора ТМС

Адекватность полученного уравнения регрессии была проверена с помощью критерия Фишера при уровне значимости 5%. Для уравнения вычислены расчетные значения критерия  $F_T$ . Уравнение признано адекватным и может быть использовано для интерпретации.

Анализ уравнения показывает, что использование вместо воды отработанных водных растворов ТМС позволяет уменьшить применение эмульгатора при сохранении требуемой стабильности эмульсии. При уменьшении концентрации эмульгатора до 59,1% объема, требуемого для получения эмульсии с использованием НСО и воды, получается эмульсия, обладающая требуемой стабильностью (объем выделившейся воды не более 2% за месяц). Таким образом, при использовании вместо воды отработанных водных растворов ТМС содержание эмульгатора можно уменьшить на 40,9% по сравнению с его количеством в эмульсии «НСО – вода».

Полученная эмульсия использовалась в филиале «Новополоцкжелезобетон» ОАО «Кричевцементношифер» при изготовлении лестничных маршей ЛМП 57.11.14-5. Эмульсию наносили на рабочую поверхность форм, ее расход на одно изделие составил 2,657 кг, что сопоставимо с нормами расхода приобретаемых в 2015 году смазок на единицу продукции при изготовлении лестничного марша ЛМП 57.11.14-5, которые составили для промышленного эмульсола «АТ-5-Б» 2,646 кг, а для эмульсола «Бетанол-С» – 2,275 кг.

Показатели качества поверхностей при использовании предлагаемого материала, смазки «АТ-5-Б» и смазки «Бетанол-С» соответствовали требованиям, предъявляемым предприятием к качеству поверхности лестничного марша ЛМП 57.11.14-5. При этом приготовленный материал покрытия на основе НСО оказался в 1,4...2,5 раза дешевле товарных покрытий.

В заключение проведенного исследования сделаны следующие **выводы**:

- своевременная очистка и регенерация растворов ТМС позволяет продлить сроки службы этих растворов в 5–6 раз и тем самым не только снизить расходы на покупку ТМС и на утилизацию отработанных растворов, но и уменьшить загрязнение окружающей среды;

- использование отработанных водных растворов ТМС вместо воды для приготовления эмульсии уменьшает их объем, подлежащий утилизации, на величину объема использованного раствора, а также количество эмульгатора, необходимого для приготовления эмульсии на 40,9%, тем самым улучшается экологическая обстановка в регионе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология, оснащение и организация ремонтно-восстановительного производства : учебник / В.П. Иванов [и др.]. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015. – 551 с.

2. Тельнов, Н.Ф. Ремонт машин / Н.Ф. Тельнов – М. : Агропромиздат, 1992. – 558 с.
3. Иванов, В.П. Утилизация нефтесодержащих отходов вспомогательного производства нефтехимических предприятий / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Природопользование. – 2016. – № 30. – С. 136–145.
4. Иванов, В.П. Защита окружающей среды от отработавших водных растворов технических моющих средств / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 160–165.
5. Дронченко, В.А. Влияние содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов / В.А. Дронченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия, В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 82–86.
6. Коробко, В.И. Погружная очистка и утилизация отходов автотранспортных и авторемонтных предприятий / В.И. Коробко, В.И. Семенов, В.П. Иванов. – Полоцк : Наследие Ф. Скорины, 1997. – 112 с.
7. Гурвич, Л.М. Рекомендации по применению новых средств очистки машин и деталей при ремонте / Л.М. Гурвич. – М. : ГОСНИТИ, 1975. – 104 с.
8. Фокин, О.И. Совершенствование технологии регенерации моющих растворов на предприятиях технического сервиса агропромышленного комплекса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / О.И. Фокин ; ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. – М., 2009. – 19 с.
9. Мажугин, Е.И. Центробежная очистка моющих растворов при ремонте сельскохозяйственной техники / Е.И. Мажугин, А.Л. Казаков, А.В. Пашкевич. – Горки : БГСХА, 2015. – 185 с.
10. Иванов, В.П. Охрана труда рабочих и защита окружающей среды от вредного влияния нефтесодержащих отходов / В.П. Иванов, В.А. Дронченко. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – 248 с.

*Поступила 12.06.2017*

**PROTECTING THE ENVIRONMENT  
FROM HARMFUL WASTE SOLUTIONS GENERATED  
DURING IMMERSION CLEANING MACHINES AND PARTS**

**V. DRONCHENKO, V. SEMENOV**

*The results of the research are presented with the aim of developing a technology for regeneration and recycling of the treatment solutions. The volume of spent solutions of technical detergents formed during the cleaning of machines and parts of technological equipment is estimated. Recommendations are given that allow to reduce the volume of waste treatment solutions. A method for the utilization of these solutions is proposed.*

**Keywords:** *submersible cleaning machines, technical detergents, waste solutions, geoecology, regeneration, utilization, emulsions.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Бодяко О.А., Кабаева М.В.</i> Архитектурная колористика в структуре реставрационной деятельности и при реконструкции исторической застройки .....	2
<i>Шэстак Ю.Т.</i> Аднаўленне сядзібы Рэйтанаў у Грушаўцы (XVIII – пач. XX ст.) .....	9

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Романовский С.А., Бакатович А.А.</i> Применение микроскопического анализа для оценки перспективы использования очесов волокна льна в производстве теплоизоляционного материала .....	14
<i>Михальков Д.В., Михальков В.С.</i> Анализ возможности использования сырьевых материалов Беларуси для получения энергоэффективных ограждающих конструкций .....	19
<i>Кравченко В.В.</i> Моделирование параметров состояния поровой среды цементного камня в рамках концепции «внутреннего увлажнения» .....	28
<i>Бакатович А.А.</i> Микроструктура как основной критерий, определяющий использование мха сфагнума в качестве заполнителя для эффективного плитного теплоизоляционного материала .....	42
<i>Гречаников А.В., Ковчур А.С., Тимонов И.А., Ковчур С.Г.</i> Использование железосодержащих отходов ТЭЦ и станций обезжелезивания для изготовления керамического кирпича .....	47
<i>Лазовская И.В., Якубовский С.Ф., Глухов Д.О., Лазовский Е.Д.</i> Серобетон как перспективный строительный материал ...	53
<i>Парфенова Л.М., Вишнякова Ю.В., Шауро А.А.</i> Биостойкость модифицированного цементного камня к плесневым грибам ...	58
<i>Шабанов Д.Н., Зябкин Е.А., Трамбицкий Е.А.</i> Модельный анализ критериев прочности стеклопластиковой арматуры периодического профиля и напечатанных на 3D-принтере образцов .....	63
<i>Каткульская А.С., Вишнякова Ю.В., Парфенова Л.М.</i> Эксплуатационные свойства кладочных цементно-известковых растворов с заполнителем из шлама известкования.....	67
<i>Шабанов Д.Н., Зябкин Е.А., Трамбицкий Е.А.</i> Компьютерное моделирование и анализ эксплуатационных характеристик стеклопластиковой арматуры периодического профиля .....	72

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

<i>Уласик Т.М., Балыш А.В.</i> Моделирование работы одиночной буронабивной сваи в условиях дополнительного «стеснения» .....	77
<i>Лазовский А.Д., Глухов Д.О., Глухова Т.М.</i> Алгоритм расчета сопротивления изгибу многупустотных плит перекрытий безопалубочного формования в составе платформенных стыков зданий.....	82
<i>Киселев В.Н., Давыденко И.А.</i> Численный метод расчета тонкостенных призматических стержней открытого профиля с наклонными ребрами жесткости .....	90
<i>Моради Сани Б.</i> Уточненная методика определения несущей способности оснований свай по результатам статического зондирования в песчаных грунтах .....	99
<i>Надольский В.В., Дергачев М.Г.</i> Метод эффективной ширины для тонкостенных холодноформованных элементов согласно требованиям Еврокода 3.....	105
<i>Леонович С.Н., Передков И.И.</i> Усовершенствованная система поперечного армирования монолитных железобетонных плит перекрытия .....	112
<i>Пантелеенко Ф.И., Шумов О.В., Монфаред Хейдари А.</i> Снижение напряжений при дуговой сварке .....	125
<i>Агаев В.Н., Мартыненко Т.М., Пронкевич С.А., Мартыненко И.М.</i> Местное выпучивание оболочечных конструкций квадратных и прямоугольных в плане с шарнирным опиранием на примере модульного тренажерного комплекса для подготовки пожарных-спасателей .....	129

### ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ

<i>Воронин А.Н., Липский В.К.</i> Регулирование транспортирования нефтепродуктов методом последовательной перекачки прямым контактированием .....	137
<i>Глухов Д.О., Глухова Т.М., Богуш Р.П.</i> Мягкие вычисления для определения первого приближения в алгоритмах поиска решений стационарных неизотермических задач транспортировки газа.....	143
<i>Нияковский А.М., Гончаров Э.И., Мишутто О.И.</i> К выбору плотности теплового потока при проектировании тепловой изоляции тепловых сетей .....	147
<i>Мителев В.В., Кульбей А.Г.</i> Влияние влажности на стационарный потенциал при катодной защите подземных трубопроводов .....	156
<i>Прищеп А.В., Кульбей А.Г.</i> Контроль качества противокоррозионной защиты газопроводов с помощью метода интенсивных измерений .....	161

### ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Михеева А.А., Ялтыхов В.В., Волков Д.О.</i> Оценка возможности применения обзорной цифровой камеры, встроенной в электронный тахеометр для целей фотограмметрии .....	166
<i>Крячок С.Д., Мамонтова Л.С., Щербак Ю.В.</i> Усовершенствование визирных целей электронных тахеометров .....	174
<i>Ярмоленко А.С., Куцаева О.А.</i> Обоснование метода радиальных базисных функций для классификации геопространственных объектов .....	178
<i>Глебо М.Г., Гурко А.О.</i> Инженерно-геодезические работы при решении прикладных задач в строительстве.....	185
<i>Рыбак В.А., Гриб А.Д.</i> Перспективные эколого-безопасные технологии как основное направление устойчивого инновационного развития страны .....	189
<i>Дронченко В.А., Семенов В.И.</i> Защита окружающей среды от вредного воздействия отработанных растворов, образующихся при погружной очистке машин и деталей.....	194