

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 28.06.2016. Бумага офсетная 65 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 19,29. Уч.-изд. л. 23,26. Тираж 100 экз. Заказ 1432.

ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.03; 347.787

ТРАДИЦИИ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ САКРАЛИЗАЦИИ ОБЩЕСТВЕННОЙ ПАМЯТИ В МОНУМЕНТАЛЬНОМ ИСКУССТВЕ И АРХИТЕКТУРЕ БЕЛАРУСИ

д-р искусствоведения Т.В. ГАБРУСЬ

(Центр исследований белорусской культуры, языка и литературы, Минск)

Рассматривается проблема сохранения исторической памяти белорусского народа в аспекте традиций и актуальных задач современного отечественного сакрально-мемориального зодчества. Сакральное зодчество несет многовековой опыт мемориализации, освящения пространства-времени, что позволяет выявить его смысловое наполнение в большом историческом времени. Проведено теоретическое осмысление понятия “храм-памятник” как творческой идеи, получившей широкое распространение в монументальном искусстве и зодчестве Беларуси на рубеже второго и третьего тысячелетий в контексте раскрытия различных приемов взаимодействия новационных и традиционалистских идей.

Ключевые слова: монументальное искусство, архитектура Беларуси, традиции мемориализации, стилиевые характеристики мемориально-сакральных сооружений, храм-памятник, некрополь.

Язык зодчества – форма социальной памяти. То, что дошло до нас в разнообразных материальных и духовных носителях, исходно имеющих определенный смысл, историко-культурное насыщение, обеспечивает дальнейшую ориентацию и мотивацию поведения индивида в пространственно-временном и социокультурном континууме. Сакральное зодчество несет многовековой опыт мемориализации, освящения пространства-времени, что позволяет выявить его смысловое наполнение в большом историческом времени. В контексте раскрытия различных приемов взаимодействия новационных и традиционалистских идей в отечественной архитектуре нами проведено теоретическое осмысление понятия «храм-памятник» как творческой идеи, получившей широкое распространение в монументальном искусстве и зодчестве Беларуси на рубеже второго и третьего тысячелетий.

Традиция сохранения исторической памяти с помощью архитектурных сооружений – пирамид, скальных гробниц, мавзолеев – восходит к истокам человеческой цивилизации, отражая различные космогонические системы мировоззрения, как пантеистические, так и монотеистические. Уже на первых страницах ветхозаветной Книги Бытие в Библии есть упоминание об установке мемориального знака из камня. В христианстве традиция почетных захоронений в храмах, согласно вероисповеданию усопших, возникла на основе катакомбных захоронений первых христиан, гонимых официальной властью. С принятием христианства на государственном уровне в ряде стран Средиземноморья и Малой Азии распространилась традиция почетных захоронений в криптах, т.е. полуподземных помещениях храмов. Это касалось преимущественно епископата еще неразделенной на то время раннехристианской церкви. В условиях сухого и жаркого климата, натурального плотного песчаного грунта катакомб и крипт часто происходила естественная мумификация останков умерших, что являлось свидетельством их святости. Такого рода мемориализация была подчинена, прежде всего, идее личного духовного предстояния перед Богом и констатации праведной жизни усопшего.

Основная часть. Мемориалы в силу своей социальной значимости – тема чрезвычайно обширная и семантически насыщенная. В данной работе мы рассмотрим ее в аспекте традиций и актуальных задач отечественного сакрально-мемориального зодчества. Поскольку распространение христианства в целом продвигалось исторически и географически с юга на север Европы, то и традиция почетных храмовых захоронений, соответственно, перемещалась на северные широты, в более суровые климатические условия, в том числе на восточнославянские земли после принятия ими крещения по византийскому образцу в 988 году. На Руси наличие природных катакомб-«печор» с особым микроклиматом зачастую служило основанием возникновения древнейших православных монастырей (например, Киево-Печерской лавры, черниговского Антониево-Печерского монастыря, Псковско-Печерской лавры). Как известно, после захвата Константинополя крестоносцами в 1258 году в киевские печоры были перевезены мумифицированные останки святой Евфросинии Полоцкой. Там они хранились да 1910 года, затем торжественно, вверх по Днепру, перевезены в Полоцк.

Самостоятельное Полоцкое епископство было создано в 992 году. В середине XI века актом строительства величественного Софийского собора отмечено начало монументального каменного зодчества на белорусских землях, что отражало креативный дух и пассионарность «империи Рюриковичей». Однако после возведения семиглавого Софийского собора, архитектоника и семантика которого имела в

основном поздневизантийский генезис эпохи императора Льва Мудрого, каменное церковное строительство в Полоцке прекратилось почти на полстолетия. При епископе Мине (1105–1116) каменное храмо-строительство в Полоцке возобновляется, здесь возводится сразу несколько “мурованых” церквей. На сегодняшний день известно 8 памятников полоцкой школы сакрального зодчества древнерусского периода, ставших основой формирования национальной традиции в этой сфере [1]. Из них только единственная Спасо-Преображенская церковь Евфросиньевского монастыря дошла до нашего времени с сохранившимися в основном аутентичными конструкциями. Архитектурно-археологические фрагменты остальных раскрыты, зафиксированы и атрибутированы различными исследователями в разное время.

На основе анализа строительной техники археологами (А. Павлинов, И. Хозеров, Н. Воронин, П. Раппопорт, В. Булкин, Г. Штыхов и др.) весьма точно определены даты возведения каждого памятника.

В первой четверти XII века на противоположном от княжеского детинца левом берегу Западной Двины, при впадении в неё речки Бельчанки, в предместье Бельчицы сыном Всеслава Чародея, строителя Софийского собора, князем Борисом был основан монастырь в честь первых восточнославянских святых князей Бориса и Глеба. Канонизация этих святых произошла в 1127 году, но религиозный праздник в их честь отмечается в Ипатьевской летописи уже несколько ранее – в 1092 году. *Бельчицкий Борисоглебский монастырь* служил летней резиденцией князя и оборонительным форпостом при подходе к Полоцку с юга. Комплекс включал четыре каменные церкви, сооруженные на протяжении целого столетия, с начала XII по начало XIII века. Среди них своей необычной архитектурой выделяется небольшой бесстолпный храм с квадратной алтарной апсидой и криптой, так называемая *Пятницкая церковь* (разрушена в результате артобстрела белополяками в 1921 году). Из-за нетипичности ее композиции для древнерусского каменного зодчества она долгое время считалась дореволюционными учеными памятником храмо-строительства XVII века. При обследовании руин церкви И. Хозеровым выявлены первоначальные фрагменты XII века, а также фрески на евангельские сюжеты и изображения святых князей Бориса и Глеба [2]. Архитектоника храма не имеет аналогов среди всего восточнославянского круга древнерусских церквей крестово-купольного типа. Скорее всего, она является экстраполяцией в плинфе местного деревянного храма клетского типа. При этом данная церковь является первым в белорусском зодчестве храмом с подземной криптой. Этот архитектурный компонент заимствован, как очевидно, из более южных стран византийского ареала, которые имели иной влажностно-температурный режим. Церковь, как полагают, являлась усыпальницей князя Бориса Всеславовича.

Помимо Пятницкой церкви Бельчицкого монастыря в первой половине XII века в Полоцке имелись еще две церкви, в которых осуществлялись почетные захоронения. Их условные названия – «*храм-усыпальница*» *полоцких князей на Нижнем замке* и «*храм-усыпальница*» *полоцких епископов в предместье Сельце*, которые по своим архитектурным характеристикам относятся к типу русско-византийского четырехстолпного крестово-купольного храма. Церковь на Нижнем замке открыта и исследована П. Раппопортом в 1976 году. Считать ее усыпальницей позволяют найденные в раскопках фрагменты резного по камню саркофага из красного шифера и многочисленные куски глиняной обмазки, которой в то время покрывали кирпичные надгробия. К тому же эта церковь имеет необычную для полоцкой школы зодчества конструкцию фундамента, выложенного из бута насухо и заглубленного на глубину 1 м (полукрипта). С южной стороны к храму примыкала галерея, имевшая расширение на западном углу. Возможно, что захоронения осуществлялись в ней [3].

Церковь в Сельце под Полоцком, открытая Я. Ощепковым в 1947 году на территории Спасо-Преображенского монастыря, также служила усыпальницей. Этот факт подтверждается письменными источниками. В «Житии» святой Евфросинии Полоцкой отмечено, что епископ Илия передал ей место для монастыря Спаса в Сельце «идеже братия наша лежа, прежде нас бывши епископи». В 1960-х годах М. Каргером раскрыты значительные фрагменты нижней части стен храма и сделана его реконструкция. Основной объем с трех сторон (кроме алтарной, восточной) опоясывала обходная галерея с аркосолиями (нишами для установки саркофагов), возведенная одновременно с храмом. По характеру фундамента и общей композиции эта церковь напоминает церковь на Нижнем замке – близки по размерам, имеют общую технику кладки стен и фундаментов, а также особую мемориальную функцию. Это позволяет считать, что они составляют одновременную и отличительную группу памятников в контексте полоцкой школы зодчества XII века. Очевидно, что уже в то время на основе эмпирической практики строительства глубоких подземных крипт на территории Беларуси было отвергнуто. Традиция почетных захоронений переместилась на надземный уровень, в пристройки православных соборов.

О наличии почетных захоронений в сакральных сооружениях в период оборонного зодчества с элементами западноевропейской романики и готики (с XIII по начало XVI в.) письменные и археологические свидетельства почти отсутствуют. Образцом элитарной мемориализации периода правления династии Ягеллонов являются королевские захоронения в костеле св. Станислава на Вавельском замке в Кракове, представленные в виде готических катафалков с саркофагами и пристенных надгробий в пристроенных часовнях-капеллах (каплицах). В Польше данная историческая традиция сакрализации общественной памяти сохраняется и в наше время – торжественное захоронение останков президента Леха Качиньского и его

супруги Марии, погибших в авиакатастрофе под Смоленском 1 апреля 2010 года, именно в крипте собора св. Станислава в Кракове, древней столице государства, а не в современной Варшаве.

Единственным сохранившимся на территории Беларуси мемориальным сооружением конца XIV века являются боковые готические каплицы приходского (фарного) костела в Новогрудке (рис. 1), одного из самых ранних в Великом Княжестве Литовском.



Рисунок 1. – Костел Преображения Господня. Готические часовни, XIV век

Костел был основан в 1395 году Великим князем Витовтом, вскоре после государственного крещения этнической Литвы по католическому обряду. В нем в начале XV века вступал в брак король Польши Владислав Ягайло с княжной Софьей Гольшанской, о чем свидетельствует мемориальная плита на стене готической часовни, сохранившейся от первого костела, освященного в честь Всех Святых. Этот брак положил начало династии Ягеллонов, почти 200 лет правившей крупнейшим государством Центрально-Восточной Европы, объединившим Корону Польскую и Великое Княжество Литовское. В 1712–23 годах на месте готического костела был построен новый, в честь Преображения Господня, в стиле «сарматского» барокко, с выразительной массивной пластикой форм. В него органично вошли старые готические часовни, при этом для целостности композиции главный фасад был чуть сдвинут с продольной оси симметрии сооружения [4]. Эти три бессистемно размещенные гранёные часовни с готическими нервюрными сводами и цветными витражами в свинцовой оправе, ориентированные алтарями по разным сторонам света, изначально предназначались, вероятно, для почетных великокняжеских захоронений. В XVII веке их мемориальный характер был дополнительно подчеркнут барельефным надгробием из черного мрамора и песчаника, установленным в 1643 году каштеляном новогрудским Яном Рудоминою в память о брате и его соратниках, погибших в битве с турками под Хотимом в 1621 году, в данном храме не захороненных.

Уникальные православные памятники белорусской готики *церкви-крепости* в Супрасле (под Белостоком, ныне Польша), Сынковичах (Зельвенский р-н), Мурованке (Щучинский р-н), сооруженные в начале XVI века, имели относительно небольшие подземные помещения-крипты, которые использовались, как полагают, для хранения запасов продовольствия и оружия на случай осады. Захоронения служителей церкви осуществлялись на огражденной территории храмов.

С началом ренессанса в архитектуре Короны Польской, в период правления королевы Боны, получили распространение квадратные в плане, перекрытые полусферическими куполами, пристроенные к соборам «каплицы гробовые», прообразом для которых явились итальянские ренессансные капеллы, в том числе и известная усыпальница Лоренцо и Джулиано Медичи во Флоренции работы Микеланджело. По всей Европе получили распространение многоярусные *пристенные скульптурные надгробия* с изображением усопшего и его близких. После бегства королевы Боны из Речи Посполитой и смерти в изгнании в городе Бари на юге Италии ее дочь Анной Ягеллонкой, женой короля Стефана Батория, было сооружено величественное многоярусное пристенное надгробие, где король и королева изображены предстоящими перед усопшей матерью.

В Великом Княжестве Литовском наиболее значительным мемориальным сооружением в стиле ранне-го барокко стала *капелла св. Казимира при виленском кафедральном костеле св. Станислава*, сооруженная в 1623–1631 годах архитектором Константином Тенкалло по инициативе короля Сигизмунда III Вазы [5]. Чрезвычайно набожный королевич Казимир, четвертый сын короля Владислава Ягайлы, умер 4 марта 1484 года в Гродно. Его жизнь и смерть сопровождалась рядом сверхъестественных явлений, что способствовало его канонизации как святого, процесс которой длился более 100 лет (канонизирован 7 ноября 1602 г.). Святой Казимир почитался как небесный покровитель католического населения Великого Княжества Литовского. Останки его перезахоронены в раннебарочной купольной часовне при кафедральном костеле 14 сентября 1636 года в саркофаге из трофейного серебра, захваченного королем Сигизмундом III Вазой во время войны с Москвией в 1611–1619 годы.

На территории современной Республики Беларусь уникальным памятником элитарной мемориализации эпохи барокко является *некрополь князей Радзивиллов в костеле Божьего Тела* в Несвиже (рис. 2), построенном в 1587–1593 годах по проекту архитектора итальянца Д.-М. Бернадони. С ним связано появление в монументальной архитектуре Речи Посполитой проектного чертежа, что стало важным шагом не только в сфере технического прогресса, но и художественных средств искусства архитектуры [6].



Рисунок 2. – Костел Божьего Тела. Общий вид

Многочисленные исторические документы свидетельствуют, что в замысле и реализации в строительстве костела Божьего Тела в комплексе с грандиозным по тому времени зданием коллегии иезуитов принимал активное участие его основатель (фундатор) князь Н.Х. Радзивилл Сиротка.

Согласно акту фундации костел принадлежал одновременно несвижской коллегии иезуитов и прихожанам, изначально задумывался как фамильная усыпальница княжеского рода, что отразилось на архитектуре храма. По своей архитектонике костел Божьего Тела – первая в белорусском зодчестве трехнефная крестово-купольная базилика. Её купол по своей конструкции и размерам (диаметр 10 м), возведенный архитектором И. Бризио из Падуи, также первый на нашей земле. В дальнейшем недостаток опыта возведения куполов большого пролета из кирпича также ограничивал их сооружение в Великом Княжестве Литовском. После обрушения купола при строительстве костела иезуитов в Вильне генерал ордена Матеус Вителески запретил возведение куполов в литовской провинции ордена.

В несвижском костеле Божьего Тела находится один из крупнейших в Европе фамильных некрополей. Под трансептом сооружена обширная полуподземная крипта-мавзолей, включающая ряд склепов, где на сегодняшний день находятся 154 захоронения представителей рода Радзивиллов (последнее захоронение Антония Радзивилла 8 июня 2000 г.). Здесь находится алтарь Девы Марии и 71 саркофаг с набальзамированными останками, а также ряд погребальных урн в кладке стен крипты. Этот уникальный секрет набальзамирования был приобретен Н.Х. Радзивиллом Сироткой, вероятно, во время паломничества в Святую землю: вместе с ним забальзамирован и любимый гайдук князя, который не раз спасал его во время опасного путешествия. Вход в крипту сделан в северном крыле трансепта, где расположены также

пристенные скульптурные надгробия основателя храма Радзивилла Сиротки и двух его сыновей, выполненные в стиле раннего барокко, являющие важный историко-культурный компонент оформления интерьера. Эпитафия под изображением князя в одежде пилигрима констатирует, что перед лицом смерти каждый – не воин, а всего лишь странник на этом свете. Рядом с трансептом за стены базилики симметрично выступают гранёные в плане купольные каплицы св. Петра и св. Андрея, предназначенные соответственно для почетных захоронений служителей церкви и уважаемых граждан. Очевидно, что вся система почетных захоронений иерархически структурирована.

В 1594–1627 годах на средства канцлера Великого Княжества Литовского Льва Сапеги в Вильне возведен костел Михаила Архангела. Здесь находится один из самых ценных памятников мемориального искусства начала XVII века – надгробие самого канцлера и двух его жен Дороты Фирлей и Елизаветы Радзивилл, сооруженное в 1640-е годы (скульптор С. Сало) в виде мощной многоярусной композиции, которая увенчана распятием и преклоненными перед ним ангелами [7]. Похожее пристенное надгробие сына Льва Сапеги, подканцлера литовского Казимира Льва Сапеги, существовало ранее в построенном по его фундации костеле картезианцев в Березе.

В эпоху барокко большинство каменных храмов католических монастырских комплексов имели обширные крипты, часто соединенные подземными ходами на случай военной опасности. В инвентарях и архивных документах отмечаются захоронения в криптах и каплицах мощей выдающихся служителей католической церкви, например, св. Фабиана Милашевича в столбцовском костеле доминиканцев, св. Андрея Боболи в пинском костеле иезуитов, выдающегося религиозного мецената XVII века воеводы мстиславского Иосифа Корсака в заложенном по его фундации костеле кармелитов босых в Глубоком и др. В Мозыре деревянный костел ордена бернардинцев Михаила Архангела существовал с 1645 года по фундации Стефана Лозки, на его месте в 1760–1778 годы маршалком мозырским Казимиром Оскеркой был возведен каменный костел в стиле позднего барокко. Известно, что из крипты этого костела за 3 км на юг от него шел подземный ход в предместье Кимбаровка, где находился костел родственного ордена цистерцианцев (теперь в пределах города). Монастырь бернардинцев был закрыт в 1832 году, а костел Михаила Архангела передан под православную церковь с тем же названием [7]. В 2000-е годы в крипте храма были обнаружены многочисленные останки жертв репрессий 1930-х годов и сооружена мемориальная часовня в память о невинно убиенных.

Специфика мемориализации эпохи Просвещения выявлена в белорусском зодчестве – Троицкий костел в Волчине (Каменецкого р-на) с характерной светской позднебарочной стилистикой в архитектонике и орнаментике сооружения, которому присуща равнозначность всех фасадов и отсутствие алтарной апсиды. Костел возведен по фундации каштеляна краковского Станислава Понятовского в 1729–1733 годы; в 1770-е годы перестроен архитектором Я. Хемплем. Этим памятником в целом отмечены даты жизни последнего короля Речи Посполитой Станислава Августа Понятовского, который в 1733 году был крещен в этом храме, а в 1798 году похоронен здесь же. В 1938 году его останки перевезены в Варшаву.

В эпоху Просвещения в Европе остро стал вопрос соотношения светского и сакрального начал в художественном воплощении гражданской памяти. Великая Французская революция способствовала разрушению устоев феодализма, что отчетливо отразилось на характере мемориализации государственного масштаба. Так, например, еще в 1791 году согласно указу Национального собрания церковь св. Женевьевы в Париже переоборудована в Пантеон – место захоронения выдающихся мужей Франции, среди которых были убежденные атеисты Вольтер и Руссо. С 1806 года здание служило одновременно церковью и мавзолеем, но в период Реставрации в 1822 году по указу Людовика XVIII здание снова стало исключительно культовым сооружением, а не светским некрополем, поскольку король уделял особое внимание восстановлению католичества как гаранта лояльного и благонаправленного поведения парижан. Ту же практику продолжал Карл X (1825–1830 гг.), который последним совершал даже так называемое королевское «исцеление прикосновением». Религиозное возрождение изрядно раздражало весьма безразличных к христианству парижан, которые с подозрением смотрели на «союз трона и алтаря». Король-радикал Луи-Филипп, наоборот, старательно дистанцировался от «союза трона и алтаря», отказался принимать участие в публичной воскресной мессе; уличные религиозные шествия при нем были запрещены. Поэтому в 1831 году, в период Июльской монархии, здание вновь было отдано под мавзолей, однако в 1851 году Луи Бонапарт в очередной раз превратил его в церковь.

Роман Виктора Гюго «Собор Парижской Богоматери» (1831 г.) способствовал пробуждению в обществе интереса к Средневековью и памятникам старины. Гюго стал одним из первых борцов за сохранение исторических памятников. Он завещал похоронить себя на кладбище Пер Лашез в простом гробу, как хоронят бедняка. Однако именно смерть и торжественные похороны Виктора Гюго в 1885 году (церемония длилась 8 часов) заставила Национальное собрание еще раз и окончательно определить церковь св. Женевьевы как государственный Пантеон Франции. «Это не памятник, а термометр гражданских страстей», – заметил о парижском Пантеоне французский журналист [8].

После разделов Речи Посполитой в конце XVIII века, присоединения белорусских земель к Российской империи и последующей радикальной смены политической и конфессиональной ориентации общества «гражданские страсти» кипели здесь на протяжении всего XIX века не менее бурно, чем в революционной Франции. Социальное противостояние вылилось в национально-освободительные восстания 1830–1831 и 1863–1864 годов, что отразилось на специфике монументального мемориально-сакрального искусства, его тематике и стилистике. Стилиевые направления сакральной мемориализации представляли широкий спектр от барочного классицизма до модерна, включая так называемые исторические стили, возникновение которых было обусловлено философско-эстетическими течениями романтизма и славянофильства, а также государственной политикой. В дворцово-усадебном строительстве получило распространение строительство камерных часовен-усыпальниц в стиле ложной готики (ретроспективного и неоготического направлений), как, например (рис. 3), в шляхетских усадьбах Закозель (Дрогичинский р-н), Грушевка (Ляховичский р-н) и других имениях дворянства католического вероисповедания [9].



Рисунок 3. – Усадебная часовня-усыпальница, XIX век

Примером усыпальницы периода классицизма является некрополь знатного магнатского рода Тизенгаузов в крипте костела Успения Девы Марии в г.п. Желудок Волковысского р-на, где находятся надгробия министра финансов (подскарбия надворного) Великого Княжества Литовского Антония Тизенгауза, выдающегося ученого-орнитолога Константина Тизенгауза и других. Историко-культурной ценностью является также усыпальница графского рода Умястовских в крипте костела св. Владислава в Субботниках (Ивьевский р-н), построенного в 1906–1907 годах на месте более старого храма. Строгое убранство обширного невысокого сводчатого помещения включает мемориальные доски из черного полированного гранита, мозаичные панно на подпружных арках, кованые решетки.

Весь XIX век и начало XX – время активного строительства многочисленных камерных фамильных усыпальниц раздельно на кладбищах католического и православного вероисповедания.

Стилиевые характеристики мемориально-сакральных сооружений второй половины XIX века отражали верноподданнические намерения определенных социальных пластов.

В регионах Приднепровья и Подвинья с преимущественно православным населением памятники мемориально-сакрального строительства представлены в ярко выраженной псевдорусской стилистике. Таковыми, например, стали фамильные часовни-усыпальницы в усадьбах пророссийской светской и духовной элиты в Гомеле, Рогачеве, Минске, Петрикове, Бездедовичах (Полоцкий р-н), храмы-памятники, посвященные боевым победам русского воинства над шведами в 1708 году под д. Лесная (Славгородский р-н) и французами в 1812 году на Брилёвском поле (Борисовский р-н) [10].

К ярким образцам мемориально-сакрального зодчества относится часовня-усыпальница князей Паскевичей в Гомеле, построенная в 1870–1889 годах в «русском стиле». Проект общей композиции необычного подземно-надземного сооружения разработан московским академиком архитектуры Е.И. Червинским, детализация убранства принадлежит А.Х. Пелю, строительными и декоративными работами руководили петербургские архитекторы немецкого происхождения М. Месмахер и О. Вегенер [11]. Часовня представляет собой центрический квадратный в плане объем, увенчанный высоким шатром в сочетании с пятью ложными луковичными главками. Структура венчающих масс, характерная для московско-ярославской архитектуры XVII века, обильно дополнена псевдорусскими декоративными деталями: многоярусными кокошниками, орнаментальными фризами, процветшими крестами, фигурными столбиками и пр. В архитектурной орнаментике памятника использованы многообразные строительные материалы: желтый кирпич, резной камень, терракота и майолика, художественный металл, мозаика и настенная роспись (художник С.И. Садиков). Фасады часовни с четырех сторон венчают фигурные изразцовые кокошники с изображением двуглавых орлов, увенчанных царской короной. Неподалёку от часовни расположен входной объем в крипту-усыпальницу представителей рода Паскевичей. Противоположная от входа стена украшена мозаикой с изображением двух ангелов. Памятник реставрирован в 1971–1975 годах. Характерно, что общая композиция гомельской часовни тяготеет к форме четырехгранной пирамиды, которая имеет вневременной метафизический смысл и восходит еще к космологии древних египтян.

Аналогичную объемно-пространственную композицию двухъярусной усеченной пирамиды, увенчанной высоким шатром с главкой, имеет также храм-памятник в Лесной (рис. 4), возведенный в 1908 году по проекту архитектора А. Гогена в честь 200-летия победы русских войск, одержанной здесь в битве 28 сентября 1708 года над шведским корпусом генерала А. Левенгаупта. Стилистика этого сооружения представляет неорусское направление в контексте модерна. Хотя в целом композиция памятника содержит скрытую семантику «пирамиды вечности», архитектура его строится по традиционному образцу крепостной башни – символа защиты родной земли от врагов, сочетая таким образом сакральное и гражданское начала. Ярусы пирамиды завершены стилизованными машикулями и «ласточкиными хвостами», имитируя крепостные стены. В то же время входные церковные порталы, ориентированные по четырем сторонам света, и главка с крестом акцентируют сакральную сущность памятника.

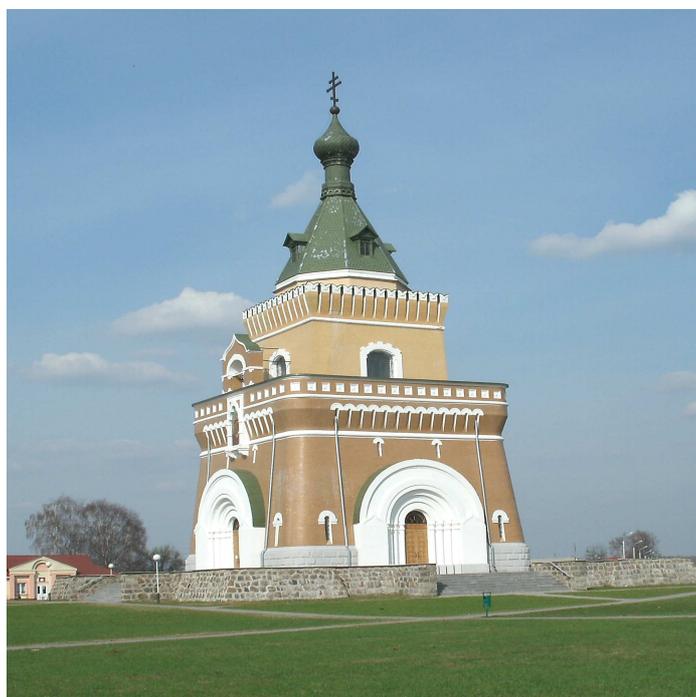


Рисунок 4. – Мемориальный храм св. Петра и Павла, XIX век

Ярким примером мемориального сакрального сооружения периода эклектизма с элементами модерна служит фамильная усыпальница князей Святополк-Мирских (рис. 5) в местечке Мир Кореличского р-на, возведенная по проекту архитектора Р. Марфельда в 1904 году [12].

Часовня имеет динамичную асимметричную объемно-пространственную композицию, нарастающую по высоте к юго-западному углу. В архитектуре памятника эклектично сочетаются детали древнерусского зодчества, древнеримской античной классики и необарокко, красный кирпич, бутовая

кладка и ордерный декор из серого бетона, мозаика с изображением Христа и лепной геральдический картуш. Княжеская усыпальница располагалась в обширной крипте с крестовыми сводами и кафельной печью. Памятник реставрирован в 2000-х годах.



Рисунок 5. – Часовня-усыпальница Сятополк-Мирских, XIX век

В период господства атеистической идеологии в БССР строительство мемориалов сакрального характера полностью прекратилось, а многие существующие были либо полностью разрушены, либо доведены до состояния руин. Центр тяжести в деле сохранения исторической памяти переместился в сферу монументальной пропаганды, сооружение многочисленных мемориальных архитектурно-скульптурных комплексов, посвященных преимущественно истории Октябрьской революции и Великой Отечественной войны. Многие из них имели яркое художественное воплощение, как, например, Монумент Победы в Минске, мемориалы «Хатынь», «Брестская крепость-герой» и др. При этом следует отметить, что масштаб этих пространственно-пластических конгломератов постепенно увеличивался соответственно возрастанию пафосности идеологической программы, а также увеличению общего масштаба градостроительной среды, росту этажности, расширению транспортных артерий. В 1970-е годы произведения монументально-мемориального искусства обретают черты «гигантомании», явно завышенного масштаба к мере человеческой сущности.

На всевозможных художественных конкурсах последних двух десятилетий прошлого века в воздухе буквально витала идея «храма-памятника» как основной темы создания мемориала общегражданской скорби. Однако, несмотря на свою очевидную привлекательность, богатые образно-пластические средства, возможность с помощью укрупнения архитектурных форм добиться завышенного масштаба, адекватного не отдельному человеку, а в целом новой городской среде, на наш взгляд, сущность идеи «храма-памятника» весьма спорная. В современном поликонфессиональном обществе Беларуси абстрактная идея «храма-памятника» как символа общегражданской скорби, не имеющая конкретной художественно-семантической традиции, если не провокационна, то очевидно бесплодна или локальна.

Есть много разных «но». Прежде всего, как понимать понятия «храм» и «памятник», написанные через дефис? Что это в реальности – настоящий храм, дом Божий, где осуществляется Божественная литургия? Или это – только мемориальный знак, малая архитектурная форма, которая всего лишь имитирует образ храма? Архитектоника христианского храма содержит глубочайшую религиозную символику во всех своих формах и даже конструкциях, основанную на литургическом каноне и художественной традиции. Сущность и эволюция этого явления проанализирована на примере наиболее значимых сакрально-мемориальных объектов Республики Беларусь рубежа второго и третьего тысячелетий [13].

В июне 1996 года в Минске, на «Острове мужества и скорби», был открыт мемориал «Сынам Отечества, погибшим за его пределами» (авторский коллектив под руководством Ю. Павлова). В истории создания мемориала воинам-интернационалистам, «афганцам», в многозначности его образного языка отразились сложные социальные проблемы постсоветского периода. Основная идея мемориала – эпическая скорбь и христианская жертвенность, именно христианская, а не гражданская, что не одно и то же. Такая небольшая «подмена» позволила авторам мемориала подчинить его художественный образ теме сакрализации, «христианизации» любой жертвы, и таким образом как бы снять социальную противоречивость «афганской» войны. Ядром композиции мемориального комплекса является «храм-памятник», о чем свидетельствует надпись на стеле с бронзовым барельефом Божьей матери, открывающей мемориал. На реализованном проекте видно, что главной целью было всего лишь создание знака-каркаса православного храма, силуэт которого вызывал бы определенные религиозные ассоциации. Важной составляющей мемориала является скульптурная пластика, насыщенная сюжетами скорби, материнской утраты и неприятия войны. Тема героизма и гражданского долга выступает на втором плане.

В идее «храма-памятника» есть еще одно «но»: какой конфессии должен принадлежать храм, выражающий общегражданскую скорбь нашего поликонфессионального общества? Характерно, что один из вариантов конкурса на проект мемориала в Куропатах в начале 1990-х годов представлял так называемый «храм-памятник» в виде дома культуры сталинских времен. Другой проект решался в виде горы черепов, на которой стояло нечто невразумительное, дополненное на четырех углах символами основных религий, исповедуемых в нашей стране: православия, католичества, ислама и иудаизма. В настоящее время религиозные приоритеты однозначно отданы православию, что обусловлено государственным патронатом над деятельностью Белорусского экзархата.

В Минске 2 июля 2010 года состоялось торжественное открытие некрополя в память безвинно убиенных в крипте храма во имя Всех Святых (рис. 6), которое сопровождалось захоронением в нем земли с прахом воинов, павших на белорусской земле в Отечественную войну 1812 года, Первую мировую и Великую Отечественную.



Рисунок 6. – Церковь в честь Всех Святых, 2010 г.

Акция проводилась с участием Президента Республики и имела государственное значение, что отражает возрастание значения сакральных ритуалов в жизни современного нам общества. Участие в ней тысяч минчан, крестный ход, транспортирование урн с прахом на военной технике, воинский парад, праздничный фейерверк сопровождался телевизионной трансляцией. Важную составляющую этой акции являет современная архитектурно-градостроительная среда, сформированная художественно-семантическим образом храма и торжественно-парадным благоустройством окружающей территории, что, в свою очередь, стабильно и надолго формирует общественное сознание.

Однако очевидно, что в данной акции сакрализация исторической памяти белорусского народа вновь фокусируется только в рамках принадлежности к российской православной церкви. На наш взгляд, идеологически более обоснованно было бы открыть этот мемориал захоронением земли с прахом участников Грюнвальдской битвы, в которой с высокой и победной миссией участвовали полки всех славян-

ских народов. Тем более это было бы актуально в год её 600-летнего юбилея. Можно было бы вспомнить еще более давнюю и трагическую страницу истории, а именно битву древнерусских князей на Немиге, упомянутую в «Слове о полку Игореве», что раскрыло бы исторический вектор Минска и его относительно новый столичный статус.

Заключение. В контексте формирования общенациональной идеологии в Республике Беларусь актуализируется задача сохранения исторической памяти общества. Увековечение памяти выдающихся деятелей государства, науки и культуры до настоящего времени складывается у нас хотя и иерархически регламентированно, но спонтанно, хаотично и неоднородно в художественном отношении. Большинство государств мира исторически сформировали собственные архитектурно оформленные государственные некрополи (часто не один), которые помимо духовной ценности для своего народа имеют также всемирную историко-культурную ценность, являясь к тому же важным объектом туризма. Проблема создания некрополя, имеющего целостный и самобытный художественный образ, выступает в нашем поликонфессиональном обществе в качестве непростой, но актуальной общегосударственной задачей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Габрусь, Т.В. Мураваная сакральная архітэктурна беларускіх земляў XI–XIII стст.: Старажытнарускі перыяд / Т.В. Габрусь // Архітэктурна Беларусі : Нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксце / А.І. Лакотка [і інш.] ; навук. рэд. А.І. Лакотка. – Мінск : Беларус. навука, 2005. – Т. 1 : IX–XIV стст. – С. 106–211.
2. Хозеров, И.М. Белорусское и смоленское зодчество XI–XIII вв. / И.М. Хозеров. – Минск : Наука и техника, 1994. – С. 44–47. – (Репринтное издание).
3. Раппопорт, П.А. Русская архитектура X–XIII вв. / П.А. Раппопорт // Археология СССР : Свод археологических источников. – Л. : Наука, 1982. – Вып. Е 1–47. – С. 93–99.
4. Габрусь, Т.В. Мураванья харалы : Сакральная архітэктурна беларускага барока / Т.В. Габрусь. – Мінск : Ураджай, 2001. – 287 с.
5. Wileńska architektura sakralna doby baroku. Dewastacja i restauracja / Fotografie Kęstutis Stoškus // Herder-Institut Marburg. Institut Sztuki PAN. – Warszawa, 2005. – S. 115–121.
6. Габрусь, Т.В. Мураваная сакральная архітэктурна XVI–XVIII стст. / Т.В. Габрусь // Архітэктурна Беларусі : Нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксце / А.І. Лакотка [і інш.] ; навук. рэд. А.І. Лакотка. – Мінск : Беларус. навука, 2006. – Т. 2 : XV – сярэдзіна XVIII ст. – С. 144–159.
7. Wileńska architektura sakralna doby baroku // Herder-Institut Marburg. Institut Sztuki PAN. – Warszawa. – S. 123.
8. Джонс, К. Париж: биография великого города / К. Джонс. – М. – СПб., 2006.
9. Архітэктурна Беларусі : Энцыклапедычны даведнік. – Мінск : Беларус. энцыкл., 1993. – С. 189, 218, 463.
10. Чернатов, В.М. Сынам Отчизны: Мемориальные сооружения воинской славы на территории Белоруссии / В.М. Чернатов. – Мінск : Выш. школа, 1980. – 95 с.
11. Литвинова, Т.Ф. Из истории создания фамильной часовни-усыпальницы Паскевичей в Гомеле / Т.Ф. Литвинова // Матэрыялы Міжнар. навук.-практ. канф., прысвеч. 150-годдзю з нараджэння Е.Р. Раманава, Гомель, 25–26 кастр. 2005 г. – Гомель, 2005. – С. 200–205.
12. Архітэктурна Беларусі : Энцыклапедычны даведнік. – Мінск : Беларус. энцыкл., 1993. – С. 346–347.
13. Габрусь, Т.В. Храм-памятник: проблема совмещения смыслов / Т.В. Габрусь // Философия в Беларуси и перспективы мировой интеллектуальной культуры. К 80-летию ин-та философии НАН Беларуси // Материалы междунар. науч. конф. – Минск : Право и экономика, 2011. – С. 516–519.

Поступила 06.06.2016

TRADITION AND MODERN TRENDS IN THE SACRALIZATION OF SOCIAL MEMORY IN MONUMENTAL ART AND ARCHITECTURE OF BELARUS

T. GABRUS

The sacral architecture bears a long-lasting memorialization experience as well as sanctification of the time and space. This feature allows to ascertain the essential content of the architecture within the big historic time. In present paper the problem of historical memory preservation of Belarusian People is discussed from the point of view of traditional and modern national sacral and memorial architecture. Here, we have evaluated the concept of a “temple-monument” as a creative idea, that met a wide acception during the fall of millenium in the monumental art and architecture of Belarus in context of the interaction of various ways of innovational and traditional thinking.

Keywords: *monumental art, architecture Belarus, the tradition of memorialisation, the stylistic characteristics of the memorial and sacred buildings, the temple, a necropolis.*

УДК 727.11

РАЗВИТИЕ АРХИТЕКТУРЫ УЧРЕЖДЕНИЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДЕТЕЙ В БЕЛАРУСИ

*Е.Н. КНИГА**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Представлены результаты исследования развития архитектуры зданий для целей дополнительного образования детей в Беларуси. На основании полученных данных определены периоды развития архитектуры учреждений дополнительного образования детей: зарождение (1917–1930 гг.), становление (1930–начало 1990-х гг.), развитие (1991–2015 гг.). Раскрыты особенности архитектурных решений с конкретными примерами в населенных пунктах республики. Рассмотрены нормативные материалы, определяющие правила проектирования зданий для дополнительного образования детей. Выявлены тенденции, которые характеризуют процессы развития и совершенствования системы дополнительного образования.

Ключевые слова: *история архитектуры, учреждения дополнительного образования, система дополнительного образования, нормативные документы, типовые проекты.*

Введение. Процесс развития и становления системы учреждений дополнительного образования детей в Беларуси начинается с 1919 года. Термин «дополнительное (внешшкoльное) образование» известен давно, в системе дополнительного образования России формировались уникальные единичные внешшкoльные учреждения в виде кружков, клубов, мастерских и т.д., созданные прогрессивными русскими педагогами, интеллигенцией по просвещению и воспитанию взрослых и детей. Именно эта просветительская деятельность общественных организаций и частных лиц стала называться «внешшкoльное образование». Зарождение внешшкoльного образования связано с деятельностью «Общества любителей русской словесности» Сухопутного шляхетского кадетского корпуса (для дворянских детей) Петербурга, открытого в 1732 году [1].

После окончания Первой мировой войны (1918 г.) на территории Беларуси начинается формирование системы внешшкoльного образования детей, что было официально зафиксировано в резолюции по докладу наркома просвещения А.В. Балицкого на пленуме ЦК Союза работников просвещения СССР в 1926 году [2].

Новизна представляемого исследования заключается в том, что изучение системы дополнительного образования детей и архитектуры зданий для этой цели в Беларуси позволило выявить периоды возникновения и развития учреждений дополнительного образования детей.

Основная часть. Причины возникновения системы организованного внешшкoльного воспитания детей предопределялись социокультурными условиями Беларуси. Первая мировая война, задачи создания белорусского государства, оккупация белорусской территории белополяками, Великая Отечественная война 1941–1945 годов, территориальное укрупнение Беларуси (1924, 1926, и 1939 г.), преобладание сельского населения страны, 80% неграмотного населения накануне революции – все это предопределяло особенности образовательной политики, а также особенности зарождения, становления и развития системы организованного дополнительного (внешшкoльного) образования детей в Республике Беларусь.

Зарождение (1917–1930 годы)

В Минске 9–13 января 1921 года состоялся губернский съезд работников просвещения и социалистической культуры, на котором отмечалось удручающее положение школьного дела: разрушенные здания и библиотеки, несовершенство инвентаря, недостаток школьных кадров и работников в Наркомпросе в связи с военной обстановкой, а также отсутствие связи с местами. В документах съезда не упоминается термин «внешшкoльное образование». И в дальнейшем, до 30-х годов, внешшкoльная работа с детьми (в значении организации кружков, летних площадок и других формирований для детей) характеризовалась как культпросвет или политпросвет работа. Значение дальнейшей внешшкoльной работы с детьми в Беларуси содержится в пункте 7 принятой на съезде резолюции: «Работники просвещения и социалистической культуры, которые работают во всех школах, дошкольных и внешшкoльных учреждениях Белоруссии, должны обратить внимание на бытовые, местные, этнографические и исторические особенности нашего края» [3]. Общая задача белорусизации, стоявшая перед страной и народом, всей системой образования, предопределила одно из первых направлений внешшкoльной работы с детьми – краеведение – и обозначила приоритеты: знание своего языка, традиций, культуры, истории. Внешшкoльная краеведческая деятельность концентрировалась в школах, народных домах и избах-читальнях. Понятия «пионердом», «дом пионеров» впервые были введены в 1925 году на 3-м Всебелорусском съезде инспекторов соцвоса (отделы социального воспитания) в выступлении Л. Розенблюма, представителя ЛКСМБ [4.] Таким обра-

зом, впервые появилась возможность создания Дома пионеров, нового типа учреждения дополнительного образования. С 1922 года, момента создания первых детских общественных формирований, начинают открываться пионерские клубы при канцеляриях, военкоматах, школах, клубах для взрослых на производстве. За период с 1924–1926 годов появились центральные клубы как прообразы *Домов пионеров* в Речице (рис. 1), Борисове, Копыле (в здании еврейской школы), Узде и Пинске. В Борисове в 1924 году Дом пионеров располагался в помещении напротив рыночной площади, в 1951 году – в здании бывшей большой Синагоги, построенной в 1913 году (рис. 2). В годы советской власти здание вначале было перестроено под рабочий клуб, затем передано детям.



Рисунок 1. – Дом пионеров в Речице



Рисунок 2. – Дворец пионеров в Борисове

В Минске в 1928 году по улице Советской в здании бывшей немецкой кирхи (лютеранская церковь) открылся Центральный пионерский клуб для пионеров города (рис. 3).



Рисунок 3. – Центральный пионерский клуб (Немецкая кирха, 1928 г.)

Приспособление исторического наследия происходило без трансформации объёмно-планировочной структуры зданий, вследствие чего было невозможно обеспечить необходимые условия для организации учебно-воспитательного процесса. Таким образом, метод приспособления здания исторического наследия под учреждения дополнительного образования детей, на наш взгляд, заведомо являлся нецелесообразным и был в большей степени связан не с эстетической красотой городских дворцов и усадеб, а с поспешными решениями, принятыми правительством того времени.

Становление (1930 – начало 1990-х годов)

Следующий исторический этап развития архитектуры дополнительного образования начинается с первого специально построенного внешкольного учреждения в Беларуси, которое открылось в 1936 году. В строительстве новых зданий для дворцов и домов пионеров преобладало подражание формам дворцовой архитектуры прошлых эпох.

На базе недостроенного клуба строителей был создан представленный на рисунке 4 Дворец пионеров и октябрят им. Н.Ф. Гикало (арх. А. Воинов, В. Вакарсин). В столице появилось выразительное трехэтажное здание. Фасад здания с отделкой под серый гранит расчленен пилястрами, главный вход подчеркнут портиком и шестью колоннами.

На площадках у главного входа были установлены статуи пионеров: мальчика с планером и девочки с горном, выполненные скульптором А. Грубе. Авторы использовали пионерскую эмблематику в отделке интерьеров и фасадов, показывая жизнь советских девчонок и мальчишек. Планировка здания достаточно ясная. Общий вестибюль объединяет зрелищную часть и помещения учебного и развлекательного назначения. Около дворца был организован уютный живописный сад с игровыми и физкультурными площадками, с продуманным сочетанием зеленых посадок и малых архитектурных форм. Сейчас мы можем наблюдать восстановленный в 1947–1950 годах несколько измененный дворец ассиметричной формы (арх. А.П. Воинов и Л. Усова) [5]. Сегодня здание – исторический культурный памятник, в нем находится Национальный Центр художественного творчества детей и молодежи.

Дворцы пионеров в период становления продолжали размещаться главным образом в переоборудованных для этих целей особняках и дворцах аристократии, конфискованных после революции. Поспешное приспособление не отвечало никаким нормам учебно-воспитательного процесса. В 1937 году в Гомеле появляется второй Дворец пионеров и октябрят, для этого было приспособлено поместье князей Паскевичей на берегу реки Сож (рис. 5).

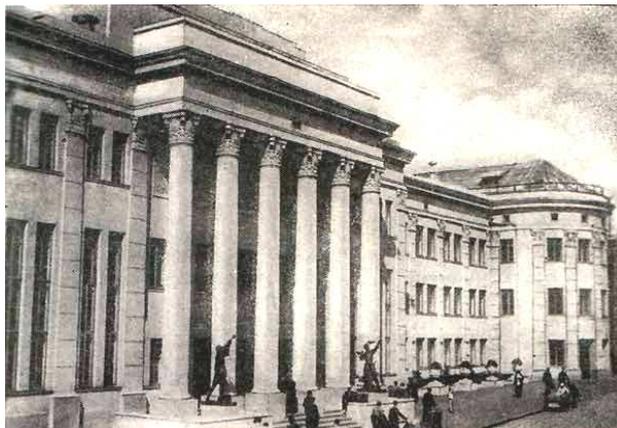


Рисунок 4. – Дворец пионеров и октябрят им. Н.Ф. Гикало



Рисунок 5. – Дворец пионеров и октябрят в Гомеле (дворец Румянцевых и Паскевичей)

После Вселоборусского партийного собрания, посвященного вопросам народного образования и общекультурного строительства (25 апреля 1930 г.) в республике, впервые было принято решение о сети внешкольных учреждений, работа которых должна была быть комплексно увязана со школьным обучением.

Другим значимым фактом, повлиявшим на развитие внешкольного воспитания в Беларуси и придавшим ему массовый характер, был приказ по Народному комиссариату просвещения от 28.12.1934 «О воспитательной работе». Приказ ориентировал отделы образования, партийные, комсомольские, профсоюзные организации всех учреждений на создание условий для плановой и систематической внешкольной работы с детьми. Тем самым во внешкольное воспитание детей вовлекались широкие массы населения, все организации и учреждения. Закладывалась сеть внешкольной работы с базой дислокации и методическим обеспечением. Организация внешкольного воспитания возводилась в ранг государственной задачи. Кружковая работа строилась по примерным программам, утвержденным Министерством просвещения СССР и Центральным советом Всесоюзной пионерской организации, и не дублировала школьные программы. Клуб, секция, кружок и другой коллектив (учебная мастерская, лаборатория, ансамбль, оркестр, хор, детский театр). Во всех школах организовывались клубные комнаты с необходимым оборудованием. В Минске, Могилеве, Орше, Борисове, Бобруйске, Полоцке, Слуцке, Дзержинске, Толочине были открыты новые клубы для пионеров и школьников. Во многом этому способствовала позиция Н.К. Крупской, которая писала, что «внешкольную работу мы не можем рассматривать вне пионерской организации. Внешкольная работа только в том случае оправдывает свое назначение, когда она служит целям пионерского движения. Пионеры должны быть основными ее организаторами. Отдел народного образования не должен проводить никакой внешкольной работы, не согласованной с местным бюро юных пионеров» [6]. Постепенно, наряду с термином «внешкольная работа», начинает активно использоваться термин «внешкольное воспитание».

В период до 1950-х годов в строительстве новых зданий для дворцов и домов пионеров преобладали подражания формам дворцовой архитектуры прошлых эпох. Ситуация изменилась после Всесоюзного совещания 1954 года, где было сформулировано требование отождествить архитектурную форму с экономически и технологически оптимальной конструкцией. За ним последовало постановление от ноября 1955 года «Об устранении излишеств в архитектуре и строительстве» [7]. Это означало невозможность для архитектора всякого рода «вхождения» в эстетические и психологические особенности создаваемого объекта, здания проектировались согласно жестким функционально-технологическим схемам [8]. Лишь с конца 1950-х годов появились новые образцы этого типа зданий.

В 1960–1970-х годах центром проектирования внешкольных учреждений становится ЦНИИЭП учебных зданий, где работали К. Френкель, молодые архитекторы А. Агафонов, Г. Газеров, А. Михе, В. Подольский, И. Саксельцев, Ю. Шаронов, А. Щеглов и др.

В декабре 1961 года открывается Дворец пионеров в Бресте (рис. 6), который проектировали архитекторы А. Щеглов (руководитель), Н. Коротков, В. Орлов, инженер А. Назаров.

На XII Всесоюзном смотре лучших архитектурных произведений 1988 года Дворец пионеров в Бресте был удостоен диплома Союза архитекторов СССР.

Особенность здания в том, что при необходимости Ленинский зал, фойе и зрительный зал путем трансформации можно объединить в единое целое пространство с центральным расположением сцены. При этом создаются оптимальная пространственная среда для зрителей и главный акцент композиционного решения силуэта здания. В уровне первого этажа размещаются кружки технического творчества, в уровне второго – кружки художественной самодеятельности. В здании три основных входа, которые под-

черкнуты протяженными пандусами. Цветовое решение основано на контрасте красной облицовки с белой декоративной штукатуркой.



Рисунок 6. – Дворец пионеров в Бресте

Основными принципами проектирования Дворцов пионеров этого периода является баланс функциональной целесообразности и экономичности. Силуэт здания стараются сделать активным и динамичным, целесообразно применяют ограниченное число материалов, контрастирующих по цвету. Используют открытые внутренние пространства галерей и холлов для объединения каждой группы помещений. Основным принципом является возможность дальнейшего развития комплекса и его окружения, а также создания благоприятных условий для развития творческих способностей и творческого общения, формирования романтического образа здания. Таким образом, к 1970-м годам в основном сложились содержание и формы работы внешкольного учреждения. Внешкольные учреждения становятся одним из полноправных воспитательных институтов социума, усиливается их методическая роль в распространении педагогических знаний, пропаганде наиболее активных форм воспитательного воздействия по месту жительства, в индивидуализации работы с неблагополучными детьми. Следующий шаг (1961–1970 гг., 1971–1980 гг., 1981–1990 гг.) – появление типовых проектов. Архитекторы тогда не могли себе позволить создание собственных архитектурных произведений. В этот период появляются новые типовые проекты внешкольных учреждений, разработанные ЦНИИЭП учебных зданий:

- дом пионеров и школьников на 300 мест с залом на 340 мест (типовой проект № 264-19-5). Авторы проекта архитекторы К. Френкель, В. Буйнов, инженер Л. Шурмухина;
- дом пионеров и школьников на 500 мест с залом на 500 мест (типовой проект № 264-19-6). Авторы проекта архитекторы И. Саксельцев, М. Дрожжин, инженеры В. Анофриев, В. Маргулец;
- станция юных техников на 300 мест (типовой проект № 264-19-11). Авторы проекта архитектор В. Подольский, инженеры Н. Быков, Г. Лыткина;
- блок лабораторий автоконструирования с гаражом для станции юных техников на 300 мест (типовой проект № 264-10-11). Авторы проекта архитектор В. Подольский, инженеры Н. Быков, В. Агапитов, Г. Лыткина;
- станция юных техников на 200 мест (типовой проект № 264-19-12). Авторы проекта архитекторы Ю. Кузнецов, Р. Дрогицкий, инженер Л. Домарук;
- станция юных натуралистов на 220 мест (типовой проект № 264-19-15). Авторы проекта архитекторы В. Буйнов, И. Артамонова, инженеры Л. Шурмухина, Г. Нидеккер;
- детская музыкальная школа на 312 учащихся (типовой проект № 224-2-2). Авторы проекта архитекторы А. Агафонов, Б. Есауленко, инженер В. Бредво.

Архитектурные решения типовых проектов основывались на принципах жесткой экономии и целесообразности. Опыт проектирования и строительства такого типа учреждений был незначительный, а прообразы типовых проектов школ и детских садов уже были созданы, как следствие, в уже готовую объемно-планировочную структуру здания встраивается необходимый функциональный набор помещений.

В Москве в 1984 году Центральный научно-исследовательский и проектный институт типового и экспериментального проектирования школ, дошкольных учреждений и высших учебных заведений выпускает рекомендации по проектированию зданий детских школ искусств, до этого времени зданиям детских школ искусств не уделялось должного внимания, полностью отсутствовали нормы на проектирование этих учреждений. В издании были даны рекомендации по упорядочению организации сети таких зданий, а также по созданию принципиально новых типов зданий детских школ искусств. Представлены восемь проектов детских школ искусств, которые были выбраны по итогам конкурса, проведенного в 1981 году.

Развитие (1991–2015 годы)

В начале становления государственной системы образования Беларуси как независимого государства (после 1991 г.) – решение задач обеспечения грамотности и уровня образования населения за счет развития сети учреждений внешкольного, профессионально-технического, среднего специального и высшего образования. Новый период развития архитектуры учреждений дополнительного образования детей в Беларуси был связан с отказом от типового проектирования. Архитектура зданий учреждений образования формируется с учетом социальных, экономических, демографических и градостроительных требований. Появляется нормативный документ «Номенклатура (состав и площади помещений) общеобразовательных школ, школ-центров, школ-детских садов для городов и сельских населенных пунктов Республики Беларусь». Система образования Республики Беларусь в период с 1991 по 2011 год развивалась довольно динамично, сопровождаясь многочисленными реформами. Важным шагом на пути к совершенствованию системы образования, в том числе и дополнительного, стала принятая в 2004 году Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития на период с 2004 по 2020 год (НСУР-2020), а также Программа социально-экономического развития Республики Беларусь 2001–2005, 2006–2010, 2011–2015, 2016–2020 годов [5].

В 2000-е годы существенные средства направляются на обновление материальной базы образовательной системы в целом: построено около 300 новых образовательных объектов, осуществлен капитальный ремонт трети функционирующих учреждений образования, в том числе и учреждений дополнительного образования детей. Разработаны и реализованы программы по внедрению в учебно-воспитательный процесс новейших компьютерных технологий. В сфере дополнительного образования благодаря этим реформам улучшено состояние помещений для внешкольных занятий, увеличено количество кадров, задействованных в работе системы дополнительного образования.

Говоря непосредственно о дополнительном образовании, следует заметить, что в соответствии с новым Образовательным кодексом Республики Беларусь учреждения внешкольного воспитания и обучения еще 6 лет назад были переименованы в учреждения дополнительного образования. Новое название подчеркивает тот факт, что формальное и неформальное образование дополняют друга, а дополнительное образование не является «избыточным», «факультативным».

В течение двух десятков лет в Беларуси открылось множество дворцов и домов пионеров и школьников, центров художественного и технического творчества, туризма и краеведения, эколого-биологической работы, школ по физической культуре и спорту. В 2012 году получило распространение разделение занятий по системе дополнительного образования на направления: культурно-досуговое, социально-педагогическое, технического, туристско-краеведческого, эколого-биологического и художественного профилей.

Были изданы указы об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к учреждениям дополнительного образования детей и молодежи, специализированным учебно-спортивным учреждениям» 28 декабря 2005 года и 10 апреля 2008 года, в которых изложены не только гигиенические нормы, но и подробно описана нормативная материально-техническая база подобных учреждений, период, в течение которого там может находиться учащийся и т.п. Принятие законодательных и нормативных актов специально по отношению к дополнительному образованию свидетельствует о придании ему особой важности и стратегического значения в развитии системы образования страны.

Также следует отметить, что первое десятилетие 2000-х годов ознаменовано появлением значительного числа частных (коммерческих) центров дополнительного образования, а также возрастанием популярности инновационных и прогрессивных направлений в дополнительном образовании – школы моделей, школы цифровой фотографии, обучение работе с графическими редакторами, курсы программирования для школьников. На базе учреждений внешкольного воспитания обучения сегодня функционирует разветвленная сеть объединений по интересам (кружки, секции, студии), основными направлениями деятельности которых являются: развитие физических и творческих способностей обучающихся, углубление знаний и развитие познавательных интересов, культивирование здорового образа жизни, физическая культура и спорт. В учреждениях образования созданы условия для сочетания учебы и занятий различными видами спорта. В системе образования насчитывается 134 специализированных учебно-спортивных учреждения, в которых занимаются почти 70 тысяч детей (5,6% от общего числа обучающихся), созданы специализированные классы по спорту.

В 2012 году в стране насчитывалось 353 учреждения дополнительного образования детей и молодежи, организована работа 31694 объединений по интересам (кружков, секций, студий, и т.д.), в которых занимаются более 404,7 тысяч детей и молодежи. В частности, действует 36 многопрофильных учреждений дополнительного образования; 59 центров (Дворцов) художественного профиля; 69 центров туристско-краеведческой работы; 29 центров физкультурно-спортивного профиля; 27 центров технического профиля; 25 центров экологического профиля; 8 других учреждений, таких как Оршанский авиатехнический центр, Гомельский центр моряков и другие. За последние несколько лет в рамках Программы по оптимизации сети учреждений дополнительного образования детей и молодежи их количество незначительно сократилось (с 384 в 2008 году до 353 в 2012 году. Однако число учащихся, посещающих такие учреждения, выросло и составляет 44,2% (в 2010–2011 годах – 44%) от общего количества учащихся учреждений

общего среднего образования. Как правило, внешкольные занятия организуются на базе школ, а также на базе всевозможных детско-юношеских спортивных школ, спортивных детско-юношеских школ олимпийского резерва и т.п. Также популярны так называемые дворцы детского творчества и молодежи. Одними из наиболее популярных в столице Беларуси являются сеть дворцов детей и молодежи «Ранак» и «Золак».

Государственное учреждение образования «Центр дополнительного образования детей и молодежи «Ранак» г. Минска», где существуют объединения по интересам изобразительного, декоративно-прикладного творчества и дизайна, спортивно-оздоровительного и экологического направления, вокального, театрального и хореографического творчества, интеллектуального и технического профиля. Дворец творчества и образования «Золак» – это сеть объединений по всему Минску, представленная в Чижовке, Автозаводском районе, Центральном районе, которая оказывает помощь в освоении школьной программы, внешкольные занятия (сценическое мастерство, хореография, рисования, пение и др.). Именно две эти организации многократно признавались одними из лучших в Беларуси.

Таким образом, в стране работает около 10 тысяч учреждений образования, на базе которых функционирует разветвленная сеть объединений по интересам (кружки, секции, студии), основными направлениями деятельности которых являются: развитие природных способностей обучающихся, углубление знаний и развитие познавательных интересов, культивирование здорового образа жизни, физическая культура и спорт.

Заключение. В результате анализа исторических фактов выявлены три периода возникновения учреждений дополнительного образования: зарождение, становление и развитие. Период *зарождения* характеризовался приспособлением зданий исторического наследия под функции учреждений дополнительного образования, эти поспешные решения не соответствовали учебно-воспитательному процессу. Самым длительным периодом является *становление*, этот период был знаменателен появлением специально построенных учреждений для получения дополнительного образования, а также использованием разработанных типовых проектов, что не позволяло создавать уникальную архитектуру для детей.

Современная система учреждений дополнительного образования Республики Беларусь продолжает развиваться: появляются новые учреждения образования как государственные, так и частные, проводится реконструкция, модернизация уже существующих. Архитектурные решения новых объектов для дополнительного образования детей становятся все более разнообразными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хазин, О.А. Пажи, кадеты, юнкера. Исторический очерк (к 200-летию Пажеского Его Императорского Величества корпуса) / О.А. Хазин. – М. : Издатель Воробьев А.В., 2006. – 152 с.
2. Народная асьвета БССР (3 доклады Народнага Камісара Асьветы БССР т. Баліцкага на Пленуме ЦК Союзу працаўнікоў асьветы СССР) // Асьвета. – 1926. – № 7. – С. 3–21.
3. Губернский съезд работников просвещения и социалистической культуры // Школа и культура Советской Белоруссии. – 1921. – № 1–2. – С. 87–97.
4. Буравін Л. Піонэрскі рух і дзіцячы дом / Л. Буравін // Асьвета. – 1925. – № 2. – С. 146–148.
5. Воинов, А.А. История архитектуры Беларуси: советский период : учеб. пособие для вузов / А.А. Воинов ; науч. ред. В.А. Чантурия. – Минск : Выш. шк., 1975. – С. 35–36.
6. Сухомлинский, В.А. О воспитании / В.А. Сухомлинский. – М. : Политиздат, 1973. – 172 с.
7. Иконников, А.В. Архитектура и история / А.В. Иконников. – М. : ARCHITECTURE, 1993. – 25 с.
8. Лежава, И.Г. Функция и структура формы в архитектуре / И.Г. Лежава. – М. : ВНИИЦ, 1988. – 212 с.
9. Статистический ежегодник Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_105. – Дата доступа: 20.02.2015.

Поступила 08.06.2016

THE DEVELOPMENT OF ARCHITECTURE IN INSTITUTIONS OF ADDITIONAL EDUCATION OF CHILDREN IN BELARUS

E. KNIGA

The article presents the results of a study of the architectural development of additional education of children in Belarus. On the basis of the obtained data were used to determine periods of architectural development of institutions of additional education of children: the beginning (1917–1930), continuation (1930s – early 1990s), development (1991–2015), as well as the features of architectural solutions with specific examples in the Republic. Reviewed regulatory materials rules governing the design of buildings to further the education of children. Trends that characterize the development processes and improvement of the system of additional education.

Key words: history of architecture, institutions of additional education, system of additional education, normative documents, typical projects.

УДК 711.04

**ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМАТИКА И ТЕНДЕНЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ СТУДЕНЧЕСКОГО ЖИЛЬЯ
ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНОЕ РЕШЕНИЕ СТУДЕНЧЕСКИХ ОБЩЕЖИТИЙ
ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА****А.А. БОРОВКОВА***(Полоцкий государственный университет)*

Рассматриваются принципы и приемы проектирования жилых и общественных интерьеров общежитий для студентов. Анализируется отечественный и зарубежный опыт проектирования студенческого жилья. Изучены ретроспективный и современный периоды проектирования и строительства общежитий. Выполнен анализ состояния жилого фонда студенческих общежитий Полоцкого государственного университета. Проанализирована динамика численности студентов высших учебных заведений в период 2014/2015 учебного года. На основании социального опроса студентов выявлены существующие проблемные ситуации и жилищные условия в общежитиях. Показаны основные факторы, влияющие на формирование жилой студенческой среды. Сформулированы требования и предпосылки к организации внутреннего пространства студенческих общежитий, обоснована необходимость разработки перспективной модели общежития для студентов с учетом их потребностей.

Ключевые слова: студенческое жилье, организация внутреннего пространства студенческих общежитий, перспективная модель общежития для студентов.

Молодежь – особая категория населения с большим жизненным потенциалом и достаточной мобильностью. Как правило, из-за ограниченных финансовых возможностей студенчество отдает предпочтение такому виду жилья, как общежитие или хостел. Общежитие – это микросоциум, который способен влиять на формирование у молодежи определенных жизненных ценностей и приоритетов. Общее материально-техническое, санитарно-гигиеническое состояние жилого фонда высших учебных заведений часто не отвечает современным требованиям проектирования и потребностям молодежи. Многие общежития построены достаточно давно и нуждаются в частичной модернизации и перепланировке. Студенческое жилье должно соответствовать многофункциональному комплексному объекту, учитывающему определенные потребности молодого контингента студентов. Эти требования формируются под воздействием многих факторов: социальных, психологических, эмоциональных и т.д.

Таким образом, цель данной работы – проанализировать взаимодействие архитектурной среды и человека и определить оптимальность тех или иных приемов пространственной организации студенческого жилья.

В качестве основного метода исследования использовался анализ научных трудов, конкурсных работ, материалов международной компьютерной сети Интернет, социологического опроса студентов о предпочтительных условиях проживания, экспериментального проектирования.

Основная часть. На сегодняшний день взаимосвязь организации архитектурной среды и учет психосоматических характеристик человека при проектировании данной среды исследованы недостаточно. Быстро меняющаяся реальность, темп жизни, ритм города и рабочие процессы требуют дополнительных исследований, учитывающих психологию современного человека, законы поведения, моторику его движений, выносливость, направленность, темперамент и др. В то время как в условиях социально-экономического реформирования общества значительно трансформировалась типологическая структура многих общественных зданий, проектирование и строительство жилых зданий ведется по сложившимся стереотипам типового проектирования прошлого этапа развития жилой архитектуры. В ситуации, когда пространственные характеристики жилой среды формируются в основном исходя из потребностей «рынка», представляется актуальным и целесообразным исследование пространственных характеристик, сформированных с учетом потребностей обитателя. Студенческая среда – особое пространство, входящее в состав средних специальных и высших учебных заведений.

В процессе изучения отечественного опыта проектирования и строительства студенческих общежитий были рассмотрены ретроспективный и современный периоды. Проведенный анализ показал, что в советский период система проектирования жилья для молодежи, в том числе студентов, соответствовала требованиям общественно-экономического развития страны и социальным условиям.

С 1920 года в стране проводились регулярные исследования по совершенствованию архитектуры студенческого жилья, выполнялись экспериментальные проекты по данной тематике.

В октябре 1920 года III съезд РКСМ предложил государственное декретирование домов-коммун рабочей молодежи. Партийные деятели всецело поддерживали молодежный коммунальный задор, считая, что коммуна – это организация на почве обобществления быта новых общественных отношений.

Общежития-коммуны создавались как при различных предприятиях и учебных заведениях, так и самими молодыми людьми. Чаще всего они размещались в квартирах старых доходных домов, казармах, заводских помещениях. Борьба за улучшение быта молодёжи привела к строительству специальных общежитий и целых городков. На фоне свёртывания новой экономической политики возродилась дискуссия о новых типах рабочих жилищ, главным из которых понимался дом-коммуна (рис. 1).

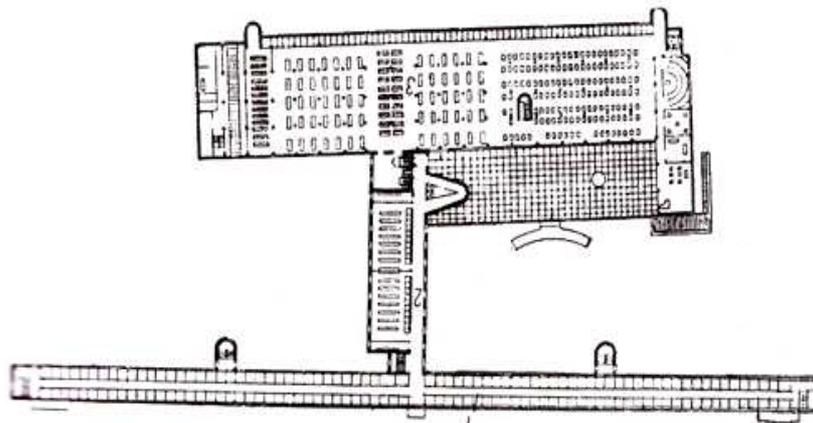


Рисунок 1. – Студенческий дом-коммуна в Москве, 1929–1931 (И. Николаев)
План жилого этажа

Участники дискуссии были убеждены в том, что новый быт в старых архитектурных пространствах строить невозможно [1]. Период формирования нового жилища длился лишь 5 лет – с 1925 по 1930 год [2].

Благоустроенные студенческие общежития строились в это время и в других городах. Например, в Ереване было выстроено общежитие Зооветинститута, состоящее из трех корпусов – двух жилых и расположенного между ними общественного корпуса, соединенного с жилыми переходами (рис. 2). В начале 30-х годов идея коллективного жилища шагнула из Советского Союза в зарубежные страны.

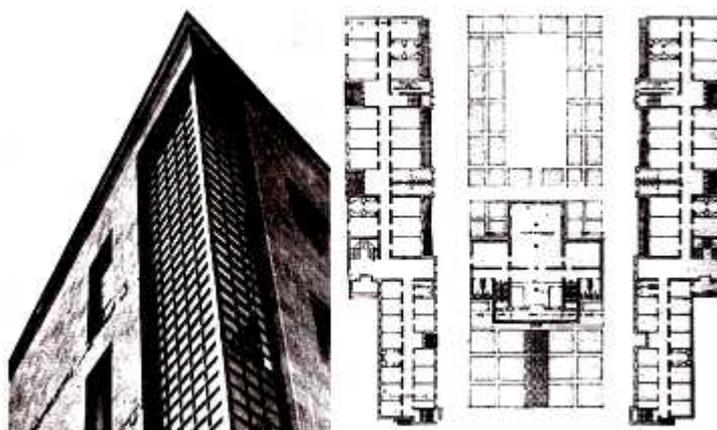


Рисунок 2. – Студенческое общежитие зооветинститута в Ереване, 1931
(Г. Кочар)

В зарубежных странах многие архитекторы и теоретики архитектуры вели поиск новых типов студенческого жилища. Исследования проводились архитекторами и специалистами Канады, Великобритании, Германии, США. Целью данных исследований являлось определение общих тенденций проектирования и строительства, выявление предпосылок для разработки новых рациональных проектов. Опыт показал целесообразность разработки функциональной структуры здания на основе жилых ячеек, каждая из которых представляла собой самостоятельную в планировочном отношении группу комнат с некоторыми помещениями общего пользования. Планировочное решение комнат должно было разрабатываться на основе детального анализа многообразной деятельности студента с целью создания наиболее благоприятных условий для занятий, отдыха, сна, приема гостей (рис. 3). Невозможность предвидеть заранее индивидуальные особенности каждого жильца-студента предопределила основную тенденцию проекти-

рования к отказу от стандартизации типов комнат. С помощью такого решения создавались наилучшие условия для проживания, удачно сочетающие независимость личного мира каждого студента и наличие контактов между всеми членами студенческой общины [3].

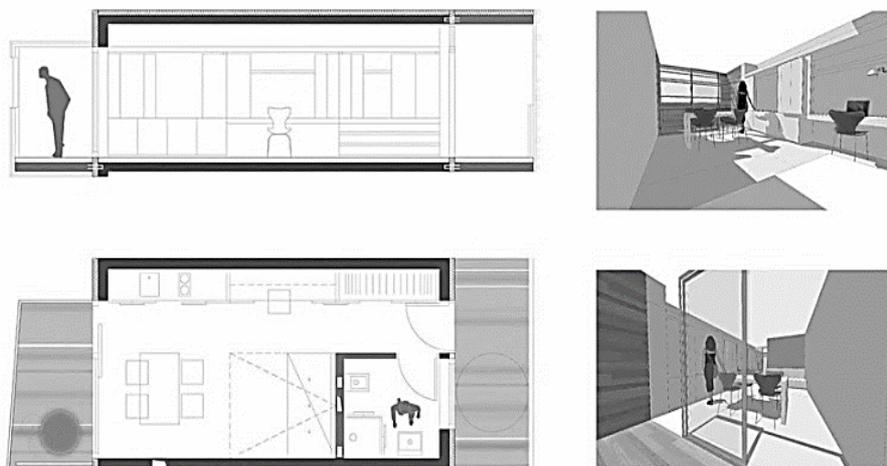


Рисунок 3. – Жилой интерьер. Проект общежития. Франция

В настоящее время в Беларуси принят ряд документов, которые подтверждают, что молодежная политика государства признается важнейшим направлением его деятельности, важнейшей частью концепции демографического развития республики, важнейшим направлением социальной политики. Вместе с тем действует программа «Молодежь Беларуси», осуществляется дальнейшее развитие различных форм стимулирования и государственной поддержки строительства жилья для молодежи и молодых семей (представление субсидий, долгосрочных кредитов, целевых займов, привлечение внебюджетных источников финансирования). Однако сложная экономическая ситуация в стране не позволяет быстро и в полной мере решить жилищную проблему молодежи.

Анализ результатов вступительной кампании в высшие учебные заведения Республики Беларусь в 2014 году показал: в 54 высших учебных заведениях республики на начало 2014/2015 учебного года обучалось около 363 тыс. студентов, что на 8% меньше, чем на начало предыдущего учебного года. В расчете на 10 тыс. человек населения численность студентов составила 383 человека. За счет бюджетных средств обучалось 38% всех студентов, в государственных вузах – 60% студентов дневной формы обучения. В рассматриваемом учебном году высшее образование получали свыше 14 тыс. иностранных граждан (4% от всех студентов). Как правило, именно студенты дневной формы обучения нуждаются в общежитиях, за исключением местных жителей. Примерно 32,2% студенчества вынуждены снимать жилье. Несмотря на тот факт, что 67,8% студентов обеспечены проживанием в общежитии, их трудно отнести к качественному и полноценному жилью. Таким образом, вопрос жилья для молодых людей в Республике Беларусь стоит остро. Жилье для молодежи должно быть не только доступным, но и обеспечивающим полноценные условия жизнедеятельности, которые могут быть созданы только в специализированном жилище, т.е. жилых зданиях (общежития), предназначенных для проживания студентов и отвечающих их потребностям с учетом всех аспектов жизнедеятельности [4].

В Беларуси жилая студенческая среда формируется как из отдельных зданий общежитий, так и их комплексов – «студенческих городков». Эти архитектурные объекты включают в себя жилые ячейки, обслуживающие помещения, коллективные комнаты для различного рода мероприятий и административный блок.

В ситуации, когда пространственные характеристики жилой среды формируются в основном исходя из потребностей «рынка», представляется актуальным и целесообразным исследование пространственных характеристик, сформированных с учетом потребностей обитателя.

В таблице приводится перечень студенческих общежитий Полоцкого государственного университета, расположенных в Новополоцке, обследованных в рамках изучения отечественной практики проектирования и строительства.

С целью выявления жилищных условий современной студенческой молодежи, а также предпочтений молодых людей были проведены социальные исследования. Респондентами являлись студенты специальности «Архитектура» 1–5 курсов Полоцкого государственного университета (Новополоцк), проживающих в общежитиях. Анкетирование на данном этапе исследования рассматривается как своего рода

пилотажный опрос, который должен предшествовать более глубокому социологическому анализу. Анкетный опрос проводился с целью выявления существующей проблемной ситуации в общежитиях, а также определения идеальной жилой студенческой среды (по мнению самих студентов). Проблемы, рассмотренные в исследовании, отражены на аналитических диаграммах (рис. 4–5).

Таблица – Объемно-планировочная организация общежитий студентов Полоцкого государственного университета

Номер общежития	Этажность	Тип объёмно-планировочного решения	Заселение в комнату (чел.)	Балкон	Умывальник	Туалет	Ванна/душ	Кухня
1, 3, 5	5	Коридорный, жилая комната с выходом непосредственно в коридор	2–3–4	Отсутствует	Позэтажное расположение	Позэтажное расположение	Первый этаж	Позэтажное расположение
2	12	Коридорный, жилая комната с выходом в блок	4–5	Присутствует	В блоке	В блоке	В блоке	В блоке
4	9	Коридорный, жилая комната с выходом в блок	2–3	Присутствует	В блоке	В блоке	В блоке	Позэтажное расположение



Рисунок 4. – Жилая студенческая среда глазами студентов 1–2 курсов (а); 3–4 курсов (б); 5 курса (в)

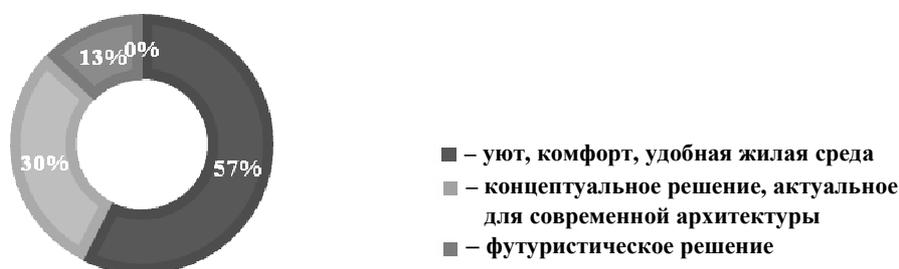


Рисунок 5. – Выбор архитектурно-пространственного решения жилого студенческого интерьера (1–5 курс)

Шкала ценностных приоритетов студентов подтверждает мировые современные тенденции в организации студенческих общежитий. На первое место студенты ставят комфорт, уют, функциональность и удобство – неизменные основные показатели любого жилого дома, которые определяют качество жизни человека. Специфика жилой среды, где обитают студенты, состоит в сложной целостной взаимосвязи

отдыха и работы, общения и учебы. Анализ данных социологического опроса показал высокую неудовлетворенность как проживающих, так и не проживающих в общежитии студентов качеством существующих зданий и помещений студенческого жилища.

Большинство проживающих высказалось о необходимости наличия в комнатах: душа – 67%; умывальника – 96%; туалета – 100%; оборудованного рабочего места – 99%; мини-кухни – 38%.

Предпочтение двухместным комнатам отдают 80% студентов, остальные 20% – одноместным.

«Пассивные» методы исследования исключают контакт с субъектами и предполагают наблюдение, изучение архивных и литературных источников. В результате чего составляются поведенческие карты, схемы ценностного зонирования реального пространства, суммируется информация по средовому контексту [5].

На основе вышеперечисленных требований и натурных обследований нами разработана экспериментальная модель жилой ячейки для студентов Полоцкого государственного университета.

На рисунке 6 представлена жилая двухместная комната в общежитии № 1.



а

б

а – входная зона, рабочая зона, зона хранения вещей; б – зона отдыха и сна

Рисунок 6. – Интерьер жилой комнаты общежития № 1 Полоцкого государственного университета

Нами разработана экспериментальная модель интерьера жилой комнаты с учетом данных социологического опроса. Проработана дополнительная функциональная зона – уборная, входящая в минимальный перечень оборудования жилой ячейки (рис. 7).

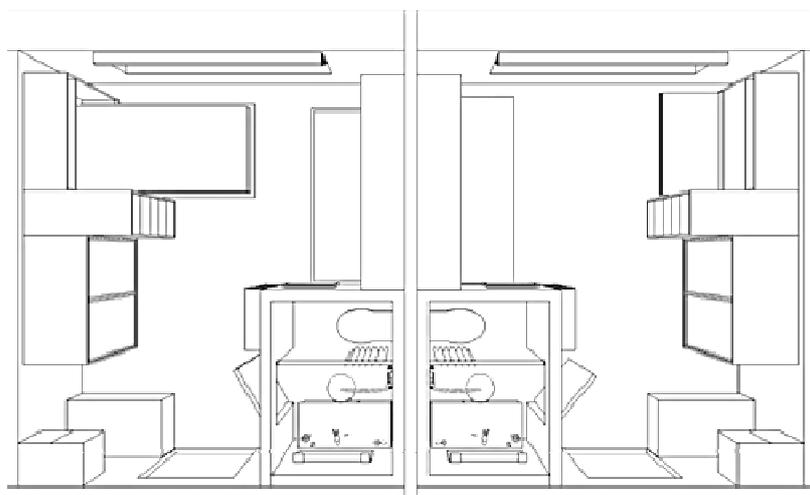


Рисунок 7. – Экспериментальная модель интерьера

Заключение. Полноценные условия жизнедеятельности молодежи, а именно студентов, могут быть созданы только в специализированном жилище, т.е. в общежитиях, предназначенных для заселения

молодежи. Общежития такого типа должны учитывать потребности и специфику будущей профессии студентов, тем самым объединяя их в группы по интересам.

Исходя из принципов организации внутренних пространств, а также предпосылок их формирования, возможно создание и реализация в Республике Беларусь новых современных студенческих общежитий и студенческих городков.

Результаты проведенного научного исследования и разработанная экспериментальная модель жилой ячейки могут быть использованы в реальном проектировании как при новом строительстве, так и при реконструкции существующих объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молодёжный жилой комплекс [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энциклопедия. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>. – Дата доступа: 25.01.2014.
2. Градов, Г.А. Город и быт (перспективы развития системы и типов общественных зданий) / Г.А. Градов. – М. : Изд-во лит. по стр-ву, 1968. – 43 с.
3. Коссаковский, В.А. Студенческие общежития за рубежом / В.А. Коссаковский, О.И. Ржехина. – М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву, архитектуре и стройматериалам, 1963. – 32 с.
4. Боровкова, А.А. Современные тенденции проектирования общежитий для студентов Республики Беларусь. Жилищный вопрос / А.А. Боровкова // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров. – Брест : БГТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 12–16.
5. Иовлев, В.И. Введение в проектирование архитектурной среды : учеб. пособие / В.И. Иовлев. – Екатеринбург : Архитектон, 2002. – 95 с.

Поступила 10.06.2016

THE MAIN ISSUES AND TRENDS SHAPING THE STUDENT HOUSING SPACE-PLANNING DECISION OF THE STUDENT HOSTELS OF POLATSK STATE UNIVERSITY

A. BOROVKOVA

The principles and methods of designing residential and public interiors of hostels for students are examined. Domestic and foreign experience of designing student housing are considered. Retrospectively and modern periods of the design and construction of hostels are studied. The analysis of hostels for university students of PSU is given. The main factors influencing the formation of student residential environment are shown. The requirements for the organization of the interior space of student dormitories revealed the background and necessity of the development of a promising model for the hostel students according to their needs are given.

Keywords: *student accommodation, organization of internal space student dormitories, a promising model of dormitories for students.*

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 696.973

К ВОПРОСУ ОБ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МАЛОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

канд. техн. наук, доц. Д.И. САФОНЧИК

(Гродненский государственный университет имени Янки Купалы)

Демонстрируются результаты исследования взаимосвязи изменения величины сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и величины теплопотерь на примере малоэтажного здания. Установлено, что в нормативных документах, регламентирующих теплотехнические характеристики строительных конструкций в Республике Беларусь, значения величины сопротивления теплопередаче для разных конструкций увеличены за период с 1979 по 2006 год до 2,4 раза. Выполненные расчеты теплопотерь наружной стены, перекрытия и покрытия позволяют предполагать увеличение нормативного значения сопротивления теплопередаче, однако этому должно предшествовать появление долговечных эффективных теплоизоляционных материалов, срок службы которых приближался бы к сроку службы эксплуатации ограждающих конструкций.

Ключевые слова: *проблемы энергоэффективности, малоэтажные здания, эксплуатация, ограждающие конструкции, теплоизоляционные материалы и изделия, микроклимат помещений, теплопотери, сопротивление теплопередаче.*

В настоящее время проблема энергоэффективности для Беларуси является весьма актуальной, так как для дальнейшего развития экономики страны, ее энергетической безопасности и повышения конкурентоспособности отечественных товаров на мировом рынке необходимо эффективное использование всех видов ресурсов. Несмотря на важность указанной проблемы, в республике до сих пор не создана целостная система экономии материальных ресурсов, что снижает эффективность использования всех видов топлива, энергии, сырья, материалов и оборудования [1].

Правовые основы отношений в сфере энергосбережения определяются Законом Республики Беларусь от 15 июля 1998 года № 190-3 «Об энергосбережении» [2], а также рядом нормативно-правовых актов.

Основная часть. Решение проблем, связанных с эффективным расходованием энергетических ресурсов, требует комплексного и системного подхода. Необходимо выполнение мероприятий, направленных на рациональное использование энергетических и других ресурсов в производственной сфере, на бытовом уровне, при использовании природных ресурсов, при осуществлении ресурсозамещения нетрадиционными источниками энергии.

Задача проектирования энергоэффективных зданий относится к так называемым задачам «системного анализа» или задачам «исследования операций», поиск решения которых связан с выбором альтернативы и требует анализа сложной информации различной физической природы.

Энергоэффективные здания включают в себя совокупность архитектурных и инженерных решений, наилучшим образом отвечающих целям минимизации расходования энергии на обеспечение микроклимата в помещениях здания.

При выборе оптимальных решений конструирования энергоэффективных зданий необходимо рассматривать три взаимосвязанные физические модели, такие как:

- теплоэнергетическая модель воздействия здания с окружающей средой;
- теплоаккумуляционная модель оболочки зданий;
- теплоэнергетическая модель теплового баланса помещений зданий.

Для каждой модели проводится поиск наилучшего решения, определяются принципы, в соответствии с которыми должно проектироваться и строиться энергоэффективное здание.

Общие тенденции строительства и эксплуатации зданий в разных странах в настоящее время неодинаковы. В Америке, например, предложены следующие направления, которые необходимо учитывать при проектировании энергоэффективных объектов строительства [3]:

- строительство и эксплуатация здания должны способствовать развитию технологий, связанных с использованием окружающей среды;
- здание не должно «производить» никаких сточных вод, то есть здание должно и потреблять, и сбрасывать только воду, пригодную для питья;
- здание должно производить больше электрической энергии, чем использовать;
- в здании не должны использоваться канцерогенные, мутагенные или вызывающие эндокринные заболевания материалы;

- энергия и материалы должны использоваться максимально эффективно;
- здание должно использовать материалы и оборудование, произведенные без ущерба для окружающей среды;
- строительство и эксплуатация здания должны способствовать развитию экологической компетентности и внимательности к окружающей среде;
- здание должно стать инструментом обучения;
- здание должно обеспечивать строгий учет стоимости его эксплуатации.

Приведенные выше направления в Республике Беларусь в полной мере еще не могут быть реализованы. Наиболее реальные пути уменьшения расхода энергоресурсов следующие:

- снижение теплопотерь через ограждающие конструкции, повышение степени их герметизации и увеличение величины сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций;
- применение энергоэффективного оборудования, необходимого для обеспечения комфортного микроклимата в помещениях.

В настоящее время значительная часть ресурсов в стране тратится на то, чтобы в осенне-зимний период года поддерживать требуемые параметры микроклимата в зданиях и сооружениях. Расход энергетических ресурсов тем больше, чем менее эффективными являются ограждающие конструкции.

Эффективность ограждающих конструкций определяется множеством факторов. В данной работе приводится некоторая информация о влиянии величины нормативного сопротивления теплопередаче на величину теплопотерь через ограждающие конструкции малоэтажного здания, размеры которого в осях составляли 12,9×12,3 м, общая площадь – 202,7 м², высота этажа – 3,1 м.

Нормативные значения величины теплопередаче ограждающих конструкций с течением времени меняются, это свидетельствует о том, что в стране выполняются исследования, связанные с изучением влияния величины теплопотерь в зависимости от нормативного сопротивления теплопередаче.

В таблице 1 представлены значения сопротивления теплопередаче строительных конструкций, определенные на основании СНиП II-3-79* [4], СНБ 2.04.01-97 [5] и ТКП 45-2.04-43-2006 (02250) [6].

Таблица 1 – Нормативные сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Наименование ограждающей конструкции	Сопротивление теплопередаче R, м ² ·°C/Вт		
	СНиП II-3-79*	СНБ 2.04.01-97	ТКП 45-2.04-43-2006 (02250)
Наружные стены из штучных материалов	1,6	2,0	3,2
Покрытия теплых чердаков	2,5	По расчету, обеспечивая перепад между температурами потолка и воздуха помещения последнего этажа не более 2 °C	6,0
Перекрытия над неотапливаемым подвалом	2,2	По расчету, обеспечивая перепад между температурами пола и воздуха помещения первого этажа не более 2 °C	2,5
Заполнение световых проемов	0,45	0,6	1,0

Значения сопротивлений ограждающих конструкций постоянно увеличивают. Изменение нормативной величины сопротивления теплопередаче за период с 1979 по 2006 год составило:

- для наружной стены из штучных материалов – в 2 раза (с 1,6 до 3,2 м²·°C/Вт);
- для покрытия теплых чердаков – в 2,4 раза (с 2,5 до 6,0 м²·°C/Вт);
- для перекрытия над неотапливаемым подвалом – в 1,14 раза (с 2,2 до 2,5 м²·°C/Вт);
- для заполнения световых проемов – в 2,2 раза (с 0,45 до 1,0 м²·°C/Вт).

Значительное увеличение численного значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций привело к необходимости использования эффективных строительных материалов, применяемых для создания многослойных ограждающих конструкций. На смену традиционным строительным материалам постепенно стали приходиться более эффективные теплоизоляционные и конструкционно-теплоизоляционные материалы и изделия.

На рынке строительных услуг среди теплоизоляционных материалов наибольшим успехом пользуются минеральная вата и пенополистирол. Эти материалы имеют высокие теплотехнические показатели, но относительно небольшую долговечность. Кроме того, в ограждающих конструкциях значительная доля теплопотерь приходится на окна.

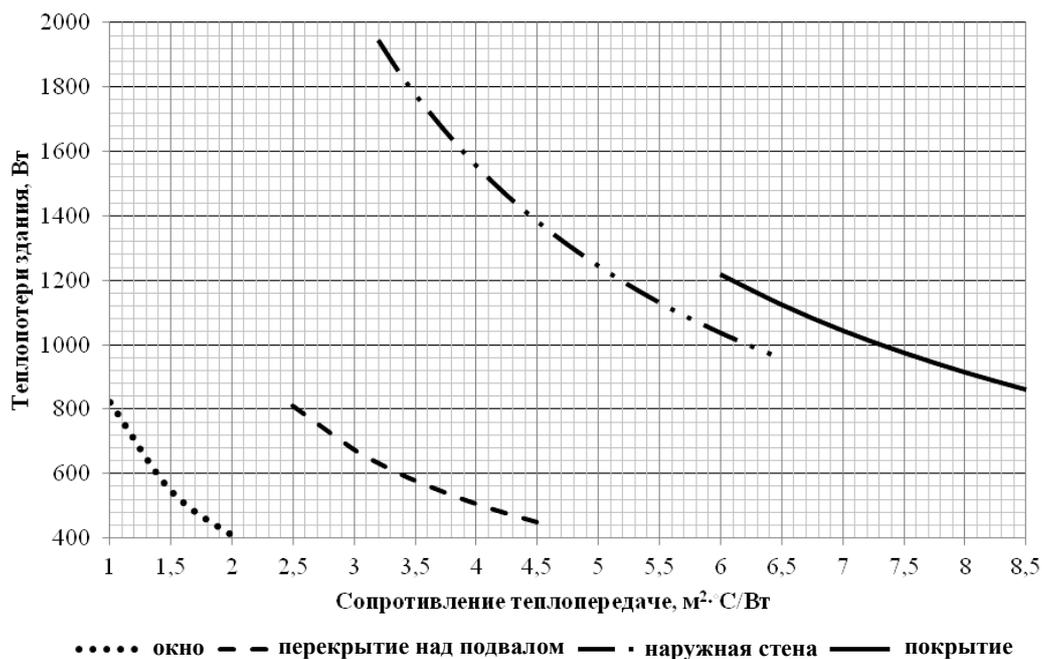
Как следует из таблицы 1, нормативное значение величины теплопередачи для материалов, применяемых для заполнения световых проемов, должно быть не ниже, чем 1,0 м²·°C/Вт. При этом для наружной стены из штучных материалов – 3,2 м²·°C/Вт, что значительно ниже, чем у световых проемов. Связано это с тем, что даже величины в 1,0 м²·°C/Вт достигнуть трудно из-за отсутствия эффективных материалов, которые были бы одновременно светопрозрачными, прочными и «теплыми».

Указанные выше значения величин нормативных значений сопротивления теплопередаче в Республике Беларусь хоть и были увеличены, однако они по-прежнему ниже значений аналогичных параметров, применяемых в странах Западной Европы и Америки.

Для изучения целесообразности дальнейшего увеличения нормативных значений величины сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций выполнены расчеты теплопотерь по стандартной методике, при этом был составлен тепловой баланс помещений. Полученные результаты представлены в таблице 2 и проиллюстрированы графически на рисунке.

Таблица 2 – Изменение величины теплопотерь ограждающих конструкций при изменении нормативного значения величины сопротивления теплопередаче

Наименование ограждающей конструкции	Наименование показателя		
	сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	величина теплопотерь здания, Вт	величина изменений теплопотерь смежных значений, Вт
Наружная стена	3,2	1945	–
	4,0	1556	389
	4,5	1383	173
	5,0	1245	138
	5,5	1131	114
	6,0	1037	94
Перекрытие над подвалом	2,5	810	–
	3,0	675	135
	3,5	579	96
	4,0	507	72
	4,5	450	57
Покрытие	6,0	1220	–
	6,5	1126	94
	7,0	1045	81
	7,5	976	69
	8,0	915	61
Заполнение световых проемов (окно)	1,0	822	–
	1,5	548	274
	2,0	411	137



Изменение величины теплопотерь через ограждающие конструкции здания

На примере рассмотренного здания можно сделать вывод, что рекомендуемыми величинами сопротивлений теплопередаче для отдельных ограждающих конструкций могут в дальнейшем стать следующие значения:

- наружная стена – $5,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;
- перекрытие над подвалом – $4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;
- покрытие – $7,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;
- окно – $1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Указанные значения величин сопротивления теплопередаче могли бы способствовать значительному сокращению величины теплопотерь через ограждающие конструкции здания, однако увеличение нормативных значений величины сопротивления теплопередаче потребует увеличения и расхода теплоизоляционных материалов. При этом необходимо учитывать относительно невысокую долговечность теплоизоляционных искусственных материалов, применяемых в настоящее время в многослойных ограждающих конструкциях. В связи с этим изменению значений величины нормативного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций должно предшествовать появление более долговечных теплоизоляционных материалов. В противном случае эффект от повышения энергоэффективности ограждающей конструкции при повышении ее теплотехнических характеристик может быть перекрыт затратами, связанными с необходимостью выполнения замены утеплителей через каждые 20–30 лет. То есть при решении проблем, связанных с энергоэффективностью ограждающих конструкций, на первый план выходит проблема долговечности применяемых теплоизоляционных материалов.

Заключение. Сопоставление стоимости современных теплоизоляционных материалов и стоимости работ, связанных с возведением и обслуживанием ограждающих конструкций, свидетельствует о том, что при долговечности материалов и изделий менее 50 лет затраты на содержание ограждающих конструкций в работоспособном состоянии, скорее всего, перекроют ожидаемый экономический эффект от улучшения теплотехнических характеристик здания при увеличении величины нормативного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экономика и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства : Директива Президента Респ. Беларусь, 14 июня 2007 г., № 3 // Эталон 6.0 [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2010.
2. Об энергосбережении : Закон Респ. Беларусь, 15 июля 1998 г., № 190-3 : в ред. Закона Респ. Беларусь от 31.12.2009 // Эталон 6.0 [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2010.
3. Табунщиков, Ю.А. Основы математического моделирования теплового режима здания как единой теплоэнергетической системы : дис. ... д-ра техн. наук / Ю.А. Табунщиков. – М. : НИИСФ, 1983.
4. Строительная теплотехника : СНиП II-379*. – Взамен СНиП II-A.7-71 ; введ. 1986.01.07. – М. : НИИСФ Госстроя СССР, 1986. – 49 с.
5. Строительная теплотехника : СНБ 2.04.01-97. – Взамен СНБ 2.01.01-93 ; введ. 1997.23.12. – Минск : Минстройархитектуры, 1998. – 45 с.
6. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-2.04-43-2006 (02250). – Взамен СНБ 2.04.01.97 ; введ. 2006.29.12. – Минск : Минстройархитектуры, 2006. – 50 с.

Поступила 07.06.2016

QUESTION OF ENERGY FENCING STRUCTURES LOW-RISE BUILDINGS

D. SAFONCHYK

The result of studies on the relationship changes the resistance of heat losses cottage-walling and heat value of the example of the low-rise buildings. Found that the regulations governing the thermal performance con-enforcement structures in the Republic of Belarus, the resistance values of heat transfer values for the time structures increased in the period from 1979 to 2006 to 2,4 times. Calculations heat losses of the outer walls, floors and coatings suggest an increase in regulatory value thermal resistance, but this should be preceded by the appearance of durable efficient thermal insulation materials, which term would be nearer to the service lifetime operation walling.

Keywords: energy efficiency problems, low-rise buildings, maintenance, fenced-giving structures, thermal insulation materials and products, indoor climate, heat losses, resistance to heat transfer.

УДК 666.973.2:666.972.1

**СТЕНОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СОЛОМЫ И КОСТРЫ ЛЬНА
С ВЫСОКИМИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

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

Рассматривается мировой опыт утилизации соломы и костры льна в промышленности, в частности использование в строительной отрасли. Исследованы экспериментальные составы арболита с различным содержанием растительных заполнителей. Определены основные характеристики арболита на основе соломы и костры льна. Установлена минимальная толщина наружной стены, равная 300 мм, из разработанных арболитовых блоков, обеспечивающая требуемое сопротивление теплопередачи. Невысокая прочность на сжатие 2...2,4 МПа обуславливает применение блоков для возведения несущих стен в каркасных зданиях.

Ключевые слова: *стенные материалы, арболит на основе соломы и костры льна, теплоизоляционные свойства, прочностные свойства.*

Введение. Существенный сегмент в производстве агропромышленного комплекса Республики Беларусь занимает растениеводство, включая выращивание зерновых культур и льна. По данным статистического ежегодника [1] в 2015 году на территории Беларуси посевные площади зерновых культур составили около 2,7 млн гектаров, льна-долгунца – 48 тыс. гектаров.

Количество целлюлозы в костре льна достигает 64% [2], тогда как в древесине лиственных пород ее содержание составляет около 47%, хвойных пород – 58% [3]. В костре льна содержится меньше сахаросодержащих соединений, чем в древесине, что делает возможным использование костры для производства строительных материалов на минеральных вяжущих, включая цемент. В ряде случаев костра льна позволяет заменить древесное сырье и получить плиты или блоки с более высокими физико-механическими характеристиками.

Основная фракция частиц 5...20 мм позволяет использовать костру для изготовления композитной фанеры и древесно-стружечных плит, а при высоком давлении формования и плит без вяжущего компонента. Физико-химическое строение дает возможность использовать костру в составах древесно-полимерных композитов в производстве деталей в автомобилестроении и конструкционных элементов.

Достаточно неэффективным применением является использование льняной костры как топливного сырья для специальных топок с полным сгоранием или с образованием золы для удобрения почвы. Также под высоким давлением из костры изготавливают топливные брикеты или пеллеты в качестве твердого топлива для обогрева жилых домов и производственных зданий [4].

Солома зерновых культур по объемам значительно превосходит получаемое количество костры льна. Большинство сельхозпредприятий солома заготавливается в качестве добавки к кормам, для чего предварительно измельчается, а также как подстилочный слой для скота на сельскохозяйственных фермах.

В последнее время широко применяется метод резки соломы непосредственно на поле с прицепными или навесными соломорезками с одновременным разбрасыванием измельченной соломы по полю в качестве органического удобрения почвы. Но такой способ эффективного применения соломы является весьма сомнительным, так как вместе с соломой перерабатываются сорняки и попадают в землю при перепашке, что приводит к дополнительному засорению почвы.

Обзор применения соломы и костры в строительстве. При строительстве домов из соломенных блоков существуют два конструктивных решения. Наиболее распространенной является конструкция здания из несущего деревянного каркаса с заполнением соломенными блоками наружных стеновых проемов. Второй вариант предусматривает использование соломенных блоков в качестве сборных элементов несущих стен. Блоки укладываются с перевязкой швов, как в кирпичной кладке, а для дополнительной жесткости и устойчивости стен в блоки вертикально вбивают деревянные колья. При устройстве стропильной системы по верху стены предварительно укладывают распределительные балки [5].

На рубеже XX–XXI веков актуальность использования растительных отходов приобрела новое переосмысление, обусловленное экологической чистотой материалов и быстрой возобновляемостью сырья. В связи с этим на сегодняшний день большое внимание уделяется научным исследованиям по рациональной утилизации отходов растениеводства в строительной отрасли, прежде всего в Европе и России.

На сырьевой базе Пензенской области проведены исследования свойств эффективных материалов с использованием в качестве заполнителя многотоннажных отходов растительного сырья [6]. В исследо-

ваниях отмечается, что одной из главных проблем при проектировании и производстве арболитовых изделий на цементе является низкая адгезионная прочность на границе «заполнитель – вяжущее», что обусловлено большими влажностными деформациями растительного заполнителя и выделением водорастворимых производных сахарозы, являющихся вредными для нормальной гидратации цемента. В качестве основного структурообразующего компонента для изготовления теплоизоляционного арболита крупнопористой структуры выбрана гречишная солома, обработанная комплексным минерализатором, с максимальным размером частиц до 30...40 мм, что препятствует значительному конвективному переносу тепла в сообщающихся порах. Мелким пористым заполнителем в разработанных составах служит овсяная лузга. Полученный материал обладает следующими характеристиками: плотность 544...617 кг/м³, предел прочности на сжатие 0,39...1,32 МПа, коэффициент теплопроводности 0,06...0,084 Вт/м·°С.

Возможно также применение соломы в виде гранулированного заполнителя в легком бетоне. При введении в бетон гранул из соломы обеспечиваются плотность 810 кг/м³, предел прочности на сжатие 5,2 МПа, коэффициент теплопроводности 0,28 Вт/м·°С. В результате легкий бетон на гранулированном растительном заполнителе по усадке и сжимаемости находится на уровне обычных легких бетонов на керамзитовом гравии и золошлаковой смеси, а также имеет существенные резервы восприятия нагрузки по сравнению с арболитом. Проявление эффекта смягчения способствует восприятию всех эксплуатационных воздействий и нагрузок без трещинообразования [7].

В технологии производства кострбетона для малоэтажного монолитного домостроения в качестве основных компонентов используются гипсоцементное вяжущее, костра, вода. Время укладки кострбетона регламентировано из-за ограничений по жизнеспособности смеси. Для решения данной проблемы потребовалось увеличение водовяжущего соотношения и введение воздухововлекающей добавки СДО (смола древесная омыленная) с целью повышения подвижности смеси. Данная технология позволяет получить кострбетон с плотностью 630...980 кг/м³, пределом прочности на сжатие 0,8...4,4 МПа. В результате получен гипсосодержащий кострбетон с широким диапазоном прочностных свойств, что позволяет использовать материал в различных по назначению конструкциях зданий [8].

Успешно развиваются производства по изготовлению стеновых соломенных панелей «Экобуд» (Россия) [9] и «ЕсоСосоп» (Литва) [10]. Панели производят из тюков ржаной соломы, запрессованных с помощью гидравлического пресса в деревянный каркас. Спрессованные соломенные тюки в каркасе не дают усадку с течением времени. Панели имеют теплопроводность 0,05...0,065 Вт/м·°С, коэффициент шумопоглощения 0,9 и высокую пожаробезопасность, так как солома в панелях спрессована настолько сильно, что в ней отсутствует воздух, который необходим для горения.

Известна технология получения соломенных плит под торговой маркой «Stramit» (Великобритания). Уникальная технология придает материалу ряд качественных преимуществ, включая прочность, огнестойкость. Соломенные плиты «Stramit» производятся в мире в соответствии с Британским Стандартом BS4046. Стандартные характеристики панелей «Stramit»: длина – 2500 мм, ширина – 1200 мм, толщина – 58 мм, масса около 67 кг, плотность – 398 кг/м³. Плиты могут быть использованы как самостоятельные несущие перегородки и наружные стены без конструктивных каркасов. Огнестойкость составляет 59 мин, класс по огнеупорности «0». Это обусловлено плотностью основы соломенной плиты, которая не содержит в необходимом количестве кислорода для поддержания горения. Материал также не содержит смолу, спиртовые компоненты или другие химические вещества, способствующие процессу горения. Экологически чистые панели «Stramit» изготавливаются из пшеничной соломы под высоким давлением и при высокой температуре без использования искусственных добавок, вредных для здоровья [11].

Анализ мирового опыта использования соломы и костры льна показывает, что разработки экологически безопасных эффективных стеновых арболитовых блоков на их основе будут востребованы на строительном рынке.

Методика испытаний. Основные физико-механические показатели арболита – плотность, прочность на сжатие – определяли в соответствии с ГОСТ 19222-84 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия».

Теплопроводность стенового материала измеряли по СТБ 1618 -2006 «Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме».

Экспериментальные исследования. Для получения стеновых материалов с пониженной теплопередачей на основе растительного сырья проведены комплексные исследования по подбору составов, включая подготовку заполнителя определенной фракции, исследованы основные физико-механические характеристики полученных образцов.

В качестве крупного заполнителя для получения арболита использовали солому ржи или пшеницы фракцией 20...40 мм. Костра льна размером до 10 мм использовалась как мелкий заполнитель. Связующим компонентом являлась цементно-известковая композиция при расходе цемента и извести по 180 кг на 1 м³.

Формовка образцов производилась под давлением. Выдержка в форме составляла от 1 до 4 суток. После извлечения из форм образцы хранили в естественных условиях при температуре 20 ± 2 °С и влажности воздуха 60...65%. Испытания на прочность проводились на образцах – кубах размером 150×150×150 мм в возрасте 28 суток. Теплопроводность арболита на основе смеси соломы и костры определяли на плитах размером 250×250×30 мм (рис. 1). До испытания плиты хранились 28 суток при влажности воздуха 60...65%. Результаты испытаний арболита на основе смеси соломы и костры льна представлены в таблице.



Рисунок 1. – Плита на основе смеси соломы и костры льна

Таблица – Физико-механические характеристики арболитовых блоков

№ состава	Расход заполнителей на 1 м ³ , кг		Расход воды на 1 м ³ , кг	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	Время выдержки в форме, сут
	солома	костра льна					
1	228	165	375	753	3,1	0,12	4
2	180	132	361	672	2,9	0,098	3
3	157	114	352	631	2,7	0,09	2
4	271	–	352	631	2,2	0,095	2
5	130	95	326	585	2,4	0,086	1
6	93	76	283	529	2	0,08	1
7	169	–	283	529	1,6	0,09	1

При увеличении количественной дозировки соломы и костры льна расход воды увеличивается соответственно с 283 до 375 кг на 1 м³ арболита. При этом соответственно возрастает плотность полученного арболита с 529 до 753 кг/м³.

Анализ составов 6 и 7 показал, что замена 40% соломы кострой при одинаковой плотности арболита позволяет увеличить прочность на 25% и уменьшить коэффициент теплопроводности на 0,01 Вт/м·°С; также наблюдается увеличение прочности на 23% и снижение коэффициента теплопроводности на 0,005 Вт/м·°С у состава 3 по сравнению с характеристиками состава 4.

При сопоставлении результатов анализа составов 6, 7 и 3, 4 получили, что плотность повышается на 19%, прочность на сжатие – на 35...38%, коэффициент теплопроводности – на 5...12%, а время выдержки в форме увеличивается до двух дней. Костра льна заполняет сообщающиеся пустоты, образуемые в структуре из трубок соломы, и формирует второй каркас, что обеспечивает повышение не только прочностных характеристик, но и позволяет снизить коэффициент теплопроводности за счет существенного снижения возникающих конвекционных воздушных потоков.

При сравнении составов 1 и 6 выявлены значительные изменения физико-механических характеристик. Так, для состава 1 плотность возросла на 42%, прочность на сжатие – на 55%, коэффициент теплопроводности – на 50%; однако время выдержки в форме возросло до четырёх дней.

В процессе исследований установлено: чем выше плотность арболита, тем больше времени необходимо для выдержки его в форме, что существенно снижает количество циклов оборачиваемости форм. Если произвести распалубку раньше минимально необходимого срока, происходит деформирование образцов-кубов в объеме, то есть разуплотнение арболита, за счет упругих деформаций соломы и недостаточной прочности цементно-известковой матрицы на момент распалубливания образцов.

Применение извести позволяет снизить негативное влияние сахаров на процесс формирования структуры цементного камня. Также присутствие извести обеспечивает увеличение объема вяжущего, в результате чего матрица вяжущего заполняет большее пространство в структуре композиции и расширяется площадь контакта цементно-известкового камня с соломой и кострой, и улучшается адгезия вяжущего с заполнителями, что способствует повышению прочности сцепления компонентов арболита. Для состава арболита, аналогичного составу 6, но с заменой цементно-известкового вяжущего на цемент в количестве 360 кг на 1 м³, получили прочность 1,6 МПа при коэффициенте теплопроводности, равный 0,095 (Вт/м·°С). Таким образом, прочность на сжатие образцов состава 6 выше на 25% именно за счет увеличения прочности сцепления вяжущего и соломы, так как прочность цементно-известкового камня на 21% ниже показателя цементного камня.

Основываясь на полученных данных и исходя из требований по обеспечению необходимых значений физико-механических характеристик, а также времени оборачиваемости форм, можно сделать вывод, что составы 5 и 6 являются наиболее оптимальными. Стеновые блоки из арболита (составы 5, 6) обладают достаточной прочностью для возведения ненесущих наружных стен высотой до 3 м в каркасных зданиях и при толщине стены 300 мм обеспечивают требуемое сопротивление теплопередаче.

Адгезия образцов арболита со штукатурным цементно-известковым раствором (рис. 2) изучалась визуально. Цементно-известковый раствор наносили вручную на боковую грань образца размером 150×150 мм. Образцы через 28 суток после нанесения раствора без следов отслоения штукатурного слоя.



Рисунок 2. – Поверхность арболита, оштукатуренная цементно-известковым раствором марки 50

При ударных воздействиях молотком по штукатурке отслоение раствора от поверхности арболита не установлено. В дальнейших исследованиях планируется определить прочность сцепления штукатурных растворов с арболитом, а также прочность сцепления кладки из арболитовых блоков.

Результаты визуальных исследований образцов дают основание предположить, что арболитовые стеновые блоки обладают высокой прочностью сцепления со строительными растворами.

Заключение. В результате проведенного исследования предложено техническое решение по рациональному использованию (утилизации) отходов растениеводства при получении строительного материала в виде экологически безопасных эффективных стеновых арболитовых блоков. Полученные костросоломенные блоки на цементно-известковом вяжущем при плотности 529...585 кг/м³ имеют прочность на сжатие 2...2,4 МПа и обладают низким коэффициентом теплопроводности для стеновых материалов из арболита, составляющим 0,08...0,09 Вт/м·°С.

Арболитовые блоки на основе соломы и костры льна обладают прочностью, необходимой для возведения ненесущих наружных стен высотой до 3 м в каркасных зданиях при толщине кладки 300 мм,

позволяющей обеспечить требуемое сопротивление теплопередаче. Кроме того, костросоломенные блоки обладают хорошей адгезией со штукатурными растворами.

По результатам исследований подана заявка на патент «Сырьевая смесь для изготовления арболита».

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистический ежегодник 2015. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2015. – 524 с.
2. Марков, В.В. Первичная переработка льна и других лубяных культур / В.В. Марков. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 375 с.
3. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б.Н. Уголев. – М. : Лесная промышленность, 1986. – 386 с.
4. Клёсов, А.А. Древесно-полимерные композиты / А.А. Клёсов. – СПб. : Научные основы и технологии, 2010. – 736 с.
5. Широков, Е.И. Экотехнология биопозитивных ограждающих конструкций из соломенных блоков в Беларуси : в 2 ч. / Е.И. Широков. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2007. – Ч. 1 : Экодома из соломы: технология строительства. – 40 с.
6. Солдатов, С.Н. Создание и исследование свойств утеплителей на основе местного сырья : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / С.Н. Солдатов. – Пенза, 2001. – 67 с.
7. Авраменко, В.В. Легкие бетоны на основе растительного сырья и минеральных вяжущих для стеновых ограждений : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / В.В. Авраменко. – Новосибирск, 2010. – 89 с.
8. Гаврикова, Т.А. Совершенствование технологии малоэтажного монолитного домостроения из костробетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / Т.А. Гаврикова. – Нижний Новгород, 2006. – 24 с.
9. Интернет портал [Электронный ресурс] / Производство и строительство каркасных домов из соломенных панелей. – Режим доступа: <http://eco-bud.com/>. – Дата доступа: 26.01.2016.
10. The Ecococon straw panel technology is unique, unmatched in the world [Electronic resource]. – Mode of access: <http://ecococon.lt/english>. – Date of access: 02.02.2015.
11. Интернет-портал [Электронный ресурс] / Энергоэффективное строительство. – Режим доступа: <http://straw.z42.ru/node/449>. – Дата доступа: 26.01.2016.

Поступила 06.06.2016

WALL MATERIALS ON THE BASIS OF STRAW AND FLAX BOON WITH HIGH HEAT-INSULATING PROPERTIES

A. BAKATOVICH, N. DAVYDENKO, A. DOLZHONOK

World experience of utilization of straw and flax boon in industry, particularly in construction sphere is observed. Experimental compositions of wood concrete with various contents of plant fillers are investigated. Main characteristics of wood concrete on the basis of straw and flax boon are defined. Minimum thickness of outside wall from developed wood concrete blocks is found out to be 300 mm that provides required heat transmission resistance. Low compression strength of 2...2,4 MPa determines application of such blocks for construction of structural walls in skeleton-type buildings.

Keywords: wall materials, cement wood-based straw and shive, thermal insulation properties.

УДК 691.328

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ
СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА****д-р техн. наук, проф. В.В. БАБИЦКИЙ; канд. техн. наук С.Н. КОВШАР
(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

Рассматривается метод прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций при агрессивном воздействии углекислого газа и жидких сред, содержащих хлор-ионы. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований авторов по обозначенной проблеме. Показано, что реализовать идею прогноза коррозионного состояния стальной арматуры железобетона можно только учитывая степень гидратации вкупе с традиционными влияющими факторами, определяющими динамику изменения структуры цементного камня и бетона, а следовательно и коррозионное состояние железобетона.

Ключевые слова: бетон, железобетонные конструкции, стальная арматура, метод прогнозирования коррозионного состояния.

Высокая щелочность поровой жидкости бетона и отсутствие в ней агрессивных ионов, ограниченность доступа кислорода создают ту благоприятную среду, в которой стальная арматура железобетона находится (и может находиться достаточно долго) в пассивном состоянии. Однако при определенных условиях сложившийся баланс нарушается, что вызывает переход стали в активное состояние с неизбежной последующей коррозией. Депассивация стали в бетоне может осуществляться по причинам карбонизации защитного слоя или накопления агрессивных ионов в приарматурной зоне бетона сверх определенного, так называемого критического, количества. В конечном итоге долговечность железобетона определяется как внешними (условия эксплуатации), так и внутренними (структура бетона) факторами. И закладывается она уже на стадиях проектирования состава бетона и реализации технологических приемов формирования и твердения конструкции.

Для математического описания длительности инкубационного периода (периода пассивного состояния стальной арматуры) российские ученые [1–3] предложили аналитические зависимости, учитывающие эффективные коэффициенты диффузии (ЭКД) агрессивных веществ в защитном слое бетона, и которые по причине масштабов их применения и общей признанности можно назвать классическими.

В случае карбонизации бетона текущую глубину нейтрализации можно рассчитать по уравнению:

$$x_k = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \tau \cdot D_{CO_2}}{m_0 \cdot \frac{C}{300}}}, \text{ см,} \quad (1)$$

где c – концентрация углекислого газа в воздухе, доли единицы по объему; τ – длительность эксплуатации конструкции, с; D_{CO_2} – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне, $\text{см}^2/\text{с}$; m_0 – реакционная емкость бетона при расходе цемента $300 \text{ кг}/\text{м}^3$ (может быть принята равной $42,0 \text{ см}^3$); C – расход цемента в 1 м^3 бетона, кг.

Если глубина карбонизации превышает толщину защитного слоя бетона, происходит активация стальной арматуры.

При диффузионном характере накопления хлор-ионов в приарматурной зоне бетона концентрация раствора хлоридов в поровой жидкости бетона (C_x) может быть рассчитана по уравнению:

$$C_x = C_0 \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{h}{2 \cdot \sqrt{D_{Cl} \cdot \tau}} \right), \% \quad (2)$$

Здесь C_0 – концентрация хлор-ионов в растворе во внешней среде, %; h – глубина расположения слоя бетона, см; D_{Cl} – эффективный коэффициент диффузии ионов хлора в бетоне, $\text{см}^2/\text{с}$.

В последующем по величине C_x рассчитывают содержание хлор-ионов в приарматурной зоне, и если оно превышает критическое значение, делают вывод о возможности депассивации стальной арматуры.

Зависимости (1) и (2) связывают кинетику деградации защитного слоя как с внутренними параметрами бетона, характеризующимися эффективными коэффициентами диффузии, так и внешними и могут быть положены в основу разрабатываемой модели прогнозирования коррозионной стойкости желе-

зобетона. Однако их решение должен предварять расчет (а не длительное и дорогостоящее экспериментальное определение) количественных значений ЭКД углекислого газа и хлор-ионов в бетоне, что, однако, не нашло должного отражения в литературных источниках.

Задача может быть решена на основе прогнозирования структурных особенностей бетона: «...Конечной целью изучения структуры бетона является установление связи между характеристиками структуры и свойствами бетона (прочностью, деформативностью и долговечностью...)» [4].

И если реализовывать идею прогноза долговечности еще на стадии изготовления железобетонных конструкций, необходимо получение на основе состава бетона аналитических зависимостей для расчета диффузионных характеристик с последующим прогнозированием коррозионного состояния стальной арматуры железобетона по выражениям (1) и (2).

Современные представления, развивающиеся в бетоноведении, позволяют это сделать. Но в данном случае нельзя ограничиваться традиционными влияющими факторами (основными из которых обычно являются водоцементное отношение и расход цемента), поскольку они постоянны и не изменяются во времени. Описать свойства бетона, изменяющиеся во времени, можно только с привлечением такого динамического параметра, как степень гидратации цемента. Именно степень гидратации вкупе с традиционными влияющими факторами определяет динамику изменения структуры цементного камня и бетона, а следовательно и коррозионное состояние железобетона.

Сама степень гидратации цемента находится в достаточно сложной, но поддающейся математическому описанию функциональной зависимости от множества факторов – свойств цемента, водосодержания цементного теста, вида и количества введенных химических добавок, условий и времени твердения и др. [5].

Не останавливаясь на теоретических выкладках, анализе проведенных экспериментов, представим конечные выражения для расчета необходимых параметров бетона.

Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа предлагается рассчитывать по формуле

$$D_{CO_2} = \frac{k_{uCO_2} \cdot \Pi_k^2}{\sqrt[3]{V_k^2}}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (3)$$

где k_{uCO_2} – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на диффузионную проницаемость бетона (для портландцемента может быть принят равным $0,025 \text{ см}^2/\text{с}$); Π_k – капиллярная пористость бетона, д. ед.; V_k – объем цементного камня в 1 м^3 бетона, д. ед.

При расчете реакционной емкости бетона выражением $m_0 \cdot \frac{C}{300}$, как в (1), можно пренебречь и использовать формулу:

$$m_0 = k_{u,m_0} \cdot \alpha \cdot C \cdot (1 - \eta), \text{ см}^3, \quad (4)$$

где k_{u,m_0} – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на реакционную емкость бетона (для портландцемента может быть принят равным $0,205 \text{ см}^3/\text{кг}$); α – степень гидратации цемента, д. ед.; η – содержание инертных минеральных добавок в вяжущем, д. ед.

Эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов может быть рассчитан следующим образом:

$$D_{Cl} = \frac{k_{\delta,Cl} \cdot (100 \cdot \omega_m)^{2,5}}{1 + 0,875 \cdot (W - 2)}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (5)$$

где $k_{\delta,Cl}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида бетона на эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов (для тяжелого бетона на щебне может быть принят равным $1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$); ω_m – влажность (по массе) бетона защитного слоя, д. ед.; W – марка бетона по водонепроницаемости.

И наконец, как было установлено, критическое количество хлор-ионов, вызывающее переход стали из пассивного состояния в активное, также зависит от структурных особенностей бетона (а не принимается постоянным и равным $0,4\%$ от массы цемента) и может быть рассчитано для бетона без добавки ингибитора коррозии стали:

$$Cl_u^{kp} = \sqrt[3]{\frac{k_{u,Cl}}{\Pi_k}}, \text{ \%}. \quad (6)$$

В формуле (6) $k_{u,Cl}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на критическое количество хлор-ионов (для портландцемента может быть принят равным 0,0335), а для бетона с добавкой

$$Cl_u^{кр.и} = Cl_u^{кр.и} + k_u \cdot D_u, \% \quad (7)$$

где k_u – безразмерный коэффициент, учитывающий эффективность добавки ингибитора коррозии стали; D_u – содержание добавки ингибитора в приарматурной зоне бетона, %.

Полученные (и иные) выражения использованы для разработки элементов (обобщенная модель прогнозирования пока еще далека от идеала, поэтому речь идет именно об элементах) прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетона на стадии проектирования состава бетона.

Структурная схема расчетов проиллюстрирована на рисунке 1. Она представляет собой симбиоз «технологических» и «эксплуатационных» влияющих факторов.



Рисунок 1. – Схема прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций

В «технологические» факторы, определяющие структурные особенности бетона, включены:

- вид (портландцемент, шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент);
- свойства (активность, нормальная плотность, плотность, минералогический состав и др.);
- расход вяжущего;
- вид, свойства (крупность, содержание пылевидных и глинистых включений и др.);
- расход мелкого и крупного заполнителей;
- вид (ускорители твердения, пластификаторы, ингибиторы коррозии стали) и дозировки химических добавок.

Состав бетона определяется: свойствами компонентов бетонной смеси; маркой бетонной смеси по удобоукладываемости; классом бетона по прочности на сжатие; марками бетона по морозостойкости и водонепроницаемости; условиями твердения изделий (нормальное или тепловлажностная обработка); отпускной прочностью.

Указанные и иные факторы позволяют рассчитать структурные особенности цементного камня и бетона и, в конечном счете, ЭКД углекислого газа и хлор-ионов (а также ионов, ингибирующих коррозию стали), реакционную емкость бетона и критическое количество хлор-ионов (без или с добавкой ингибитора коррозии стали).

В свою очередь, к «эксплуатационным» факторам можно отнести:

- толщину защитного слоя бетона;
- время и температурно-влажностные условия эксплуатации;
- концентрацию углекислого газа в воздухе и хлор-ионов в растворе на поверхности железобетонной конструкции;

- воздействие атмосферных осадков;

- возможные проливы разной интенсивности технологических жидкостей, содержащих хлор-ионы.

Совокупность этих «технологических» и «эксплуатационных» факторов, изменяющихся в процессе эксплуатации железобетона, и определяет длительность пассивного состояния стальной арматуры.

Оценка достоверности расчетов. Для этого сопоставим расчетные значения их с некоторыми фактическими данными, почерпнутыми из отдельных источников.

В РУП «БелДорНИИ» проведены достаточно обширные натурные исследования прочности бетона на сжатие и глубины карбонизации бетона в железобетонных конструкциях автодорожных мостов республики, построенных в период с 1954 по 1989 год.

Однако результаты обследования мостов, не дают полной информации о материалах, использованных при их строительстве, и составах бетона. Поэтому необходимые для прогноза данные были получены косвенным путем. Возраст постройки, предполагаемые условия твердения позволили по прочности на момент обследования рассчитать прочность бетона к началу эксплуатации железобетона. По этому параметру и предполагаемым удобоукладываемости бетонной смеси и марке цемента проведены расчеты состава бетона. Далее, в соответствии с описанной выше последовательностью проведены расчеты глубины карбонизации бетона и наглядно проиллюстрированы на рисунке 2.

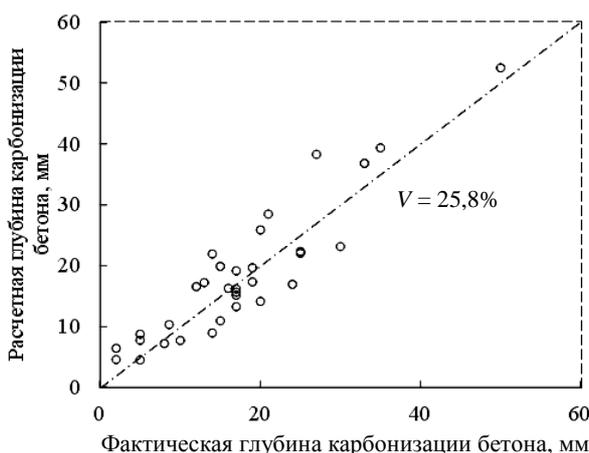


Рисунок 2. – Соотношение фактических и расчетных значений карбонизации бетона мостовых железобетонных конструкций

Как видим, результаты достаточно удовлетворительны, что подтверждается и статистическими выкладками – коэффициент вариации отклонений расчетных данных от фактических составил 25,8%, что, на наш взгляд, вполне приемлемо для практических расчетов. Имеющие место отклонения легко объясняются тем, что значительное количество факторов, не были учтены (например, вид цемента, концентрация углекислого газа, влажностное состояние бетона, атмосферные осадки и др.).

Сопоставим также результаты расчета с результатами обследования моста в Ярославской области, описанными в [6]. На момент обследования, проведенного через 23 года после начала эксплуатации, установлено, что средняя толщина бетона защитного слоя составила 28 мм, а с обеспеченностью 95% – 24 мм. Содержание хлор-ионов в слое толщиной 10 мм составляет 0,6%, глубина карбонизации бетона – 18,5 мм.

Однако в примере отсутствуют технические характеристики бетона конструкций и условия их эксплуатации, но для приближенной оценки можно предположить, что при изготовлении конструкций использован бетон класса В30, а концентрация хлор-ионов во внешней среде составляла около 5%.

В результате теоретических расчетов получено, что на момент обследования содержание хлор-ионов в приарматурной зоне должно составить около 0,14% от массы растворной части бетона. Коррозию арматуры по причине накопления ионов хлора сверх критического количества следует ожидать через 28 лет после начала эксплуатации для толщины бетона защитного слоя 28 мм или через 21 год для толщины 24 мм, а глубина карбонизации бетона к возрасту 23 года должна составить 17,3 мм.

Сравнительный анализ показывает, что значения, прогнозируемые на стадии проектирования состава бетона, и значения фактические, полученные в результате обследования моста, достаточно близки.

Заключение. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что предлагаемые элементы прогнозирования долговечности железобетонных конструкций на стадии их изготовления, на наш взгляд, достаточно достоверны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной производственной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.] ; под общ. ред. В.М. Москвина. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.
3. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев [и др.]. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.
4. Горчаков, Г.И. О комплексной характеристике структуры бетона / Г.И. Горчаков, И.А. Иванов // Бетон и железобетон. – 1980. – № 1. – С. 22.
5. Бабицкий, В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В.В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 76–79.
6. Васильев, А.И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов в условиях коррозии арматуры / А.И. Васильев // Бетон и железобетон. – 2003. – № 2. – С. 17–20.

Поступила 07.06.2016

ELEMENTS OF FORECASTING OF THE CORROSION CONDITION OF THE IRON FITTINGS OF FERRO-CONCRETE

V. BABITSKI, S. KOVSHAR

We consider the prediction method for corrosion of steel reinforcement ferro-concrete designs with aggressive carbon dioxide and liquid media containing chlorine ions. The results of theoretical and experimental studies of the authors on the aforesaid. It is shown that to realize the idea of a steel concrete reinforcement corrosion condition prognosis can only be given the degree of hydration, along with the traditional insulated factors determining the dynamics of the cement stone and concrete structures, and hence the state of corrosion of reinforced concrete.

Keywords: concrete, ferro-concrete designs, steel armature, prediction method of corrosion condition.

УДК 620.172.2+622.016.22

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КРЕПИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

канд. техн. наук, доц. А.А. КОЛОГРИВКО; Д.А. ИГОЛКА
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
Е.М. ЛУКША
(ОАО «Белгорхимпром», Минск)

Представлены результаты исследований тюбинговой и бетонной крепей для скипового и клетового шахтных стволов Петриковского горно-обогатительного комплекса на основе изученного геолого-гидрогеологического строения, данных анализа геофизических исследований горного массива и рекомендованных интервалов глубин крепления шахтных стволов. Установлены расчетные значения пределов прочности чугуна на сжатие и растяжение, принята марка бетона.

Ключевые слова: *тюбинговая и бетонная крепь, шахтные стволы, бетон, чугун, коррозия.*

Изучение гидрогеологического строения и гидрогеологических условий промышленной площадки (далее – промплощадка) Петриковского горно-обогатительного комплекса (далее – Петриковский ГОК) [1–6] позволяет считать, что она характеризуется по материалам бурения пяти гидрогеологических скважин (№ 1а, 1б, 1в, 1г, 1д) и двух контрольно-стволовых скважин (№ 1к, 2к), а также проведенных в 1974, 1980, 2002, 2013 годах геолого-гидрогеологических и геофизических исследований Петриковского месторождения калийных солей. Гидрогеологические скважины оборудованы на водоносные комплексы: четвертичных – неогеновых отложений (скважина № 1а); палеогеновых отложений (скважина № 1б); мергельно-меловых отложений туронского яруса верхнего мела (скважина № 1в); сеноманских – юрских отложений (скважина № 1г) и глинисто-мергелистую толщу надсолевого девона (скважина № 1д). Изучение двух геологических колонок контрольно-стволовых скважин № 1к, 2к до глубины 290 м на участке заложения шахтных стволов, принимая во внимание структурированные данные стратиграфических подразделений скважин на промплощадке до глубины 290 м и учитывая идентичные геологические и гидрогеологические условия, показало, что в стратиграфическом и литологическом отношении промплощадка представлена отложениями девонской, каменноугольной, триасовой, юрской, меловой, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем.

Основная часть. Анализ геологической и гидрогеологической характеристик участка заложения шахтных стволов позволяет сделать вывод о сложных гидрогеологических условиях рассматриваемой территории – наличие водоносных, неустойчивых пород на глубине порядка 275,0 м. В этой связи проведение стволов должно осуществляться способом замораживания горных пород. Ниже границы зоны замораживания пород проходка может осуществляться обычным способом. Глинисто-мергелистая толща является региональным водоупором, изолирующим соляные отложения от пресных подземных вод мезокайнозоя. Основным водоупором является пласт плотной массивной аргиллитоподобной глины в интервале 265,4...287,4 м, что и определяет глубину создания ледопородного ограждения (далее – ЛПО). Глубина бурения замораживающих скважин по шахтным стволам может быть принята порядка 275,0 м с учетом заглубления 10,0 м в водоупорные глины и возможностью уточнения по результатам бурения и выдачи полных окончательных отчетов по скважинам № 1к, 2к.

Исследования физико-механических свойств вмещающего массива горных пород выполнены по скважинам № 1а, 1б, 1д, 1в, частично – по контрольно-стволовым скважинам № 1к и 2к для пород четвертичной системы, палеогеновой, меловой, юрской, триасовой, каменноугольной систем и верхней части старобинского горизонта верхнего девона [3–6]. Основная часть старобинского горизонта верхнего девона, породы любанского яруса верхнего девона и породы осовецкого горизонта, включая галогенную толщу, опробованы непосредственно из контрольно-стволовых скважин № 1к и 2к.

Анализ горно-геологических условий участка строительства шахтных стволов и физико-механических свойств вмещающего массива, принимая во внимание гидрогеологическое строение и гидрогеологические условия промплощадки, позволил представить схематические решения по креплению шахтных стволов. Так, шахтные стволы крепятся до глубины –824,48 м по скиповому стволу и до глубины –720,9 м – по клетовому стволу. В обводненных высоконапорных горизонтах следует использовать крепь из чугунных тюбингов в сочетании с бетонной крепью до –518,0 м по скиповому и до –510,0 м по клетовому стволу. Заморозку горных пород следует осуществлять до глубины –265,0 м по скиповому и до –262,0 м по клетовому стволу.

Интервалы глубин крепления шахтных стволов. Для представления интервалов глубин крепления шахтных стволов с целью исследования материалов крепи следует обратить внимание на практику эксплуатации крепей на рудниках Старобинского месторождения калийных солей и их фактическое состоя-

ние в настоящее время. Результаты обследований указывают на то, что тюбинговая крепь имеет отрывы от бетона в основном в интервалах замораживания пород. В результате отрывов в интервале 1...5 мм формируется водоток внутри крепи, создавая тем самым полную гидростатическую нагрузку на тюбинг или просачивание воды через швы, что ведет к коррозии тюбингов как внутри, так и снаружи его контура. При полном контакте с бетоном коррозия чугунных тюбингов практически отсутствует и просачивание воды через швы не наблюдается. Величина коррозии значительно снижается в зоне пониженного водообмена в связи с тем, что в таких интервалах глубин отрыв бетона от тюбингов не происходит. Некоторое снижение величины коррозии в зонах, близких к нижней части замораживания, может объясняться меньшей водопроницаемостью и более благоприятными условиями размораживания пород. Основной причиной отрыва бетона от тюбингов следует считать негативные последствия размораживания пород: локальные динамические нагрузки, неравномерное оттаивание ЛПО, разные линейные температурные расширения бетона и чугуна.

По нашему мнению, при выборе крепи должны быть выполнены расчеты тюбингов в зоне высокообводненных пород в соответствии с методикой нагружения чугунных тюбингов полным гидростатическим давлением; расчет тюбингов ниже зоны замораживания в обводненных породах следует выполнять в соответствии с методикой нагружения крепи горным и гидростатическим давлениями как многослойной единой конструкции «бетон – чугунный тюбинг».

В практике проведения стволов способом замораживания в условиях Старобинского месторождения применяется проходка с передовой временной бетонной крепью. В то же время при проведении стволов для калийных рудников в Российской Федерации применяется проходка с установкой постоянной крепи из бетона и чугунных тюбингов с установкой их сверху вниз с помощью специальных монтажных устройств. В условиях Петриковского ГОК, принимая во внимание первый опыт работ на месторождении, считаем, что выбор толщины крепи необходимо определять с учетом прочности бетона на момент его замерзания и остановки процесса гидратации с учетом дополнительных исследований по установлению параметров ЛПО. Для начального случая представляется возможным рекомендовать толщину крепи не менее 500 мм.

Обобщение геолого-гидрогеологических условий строительства шахтных стволов и анализа геофизических исследований породного массива позволяет рекомендовать следующие интервалы глубин крепления с целью исследования материалов крепи для последующего установления влияния горного давления и выбора оптимальных параметров крепи шахтных стволов Пертиковского ГОК: 0...–265,0 м (многослойная крепь из чугунных тюбингов); –265,0...–500,0 м (многослойная чугунно-бетонная крепь); –500,0...–824,48 м (бетонная крепь).

Результаты исследований тюбинговой и бетонной крепи. Важная особенность эксплуатации тюбинговой крепи – постоянный контакт с агрессивной средой. При расчете толщины спинки тюбингов необходимо учитывать уменьшение ее толщины за счет развивающихся коррозионных процессов на весь срок службы стволов. Тюбинги в крепи ствола будут работать в большей степени на сжатие и подвергаться временным неравномерным нагрузкам, вызывающим растягивающие усилия (например, гидроизоляционный тампонаж, оттаивание ЛПО), поэтому в данных условиях более целесообразно применять чугун с пластинчатым графитом. Скорость коррозии чугуна для стволов составляет 0,1 мм/год [7]. Коррозийное разрушение чугуна за 50 лет составит 5 мм. Учитывая агрессивность воздействия на тюбинговую крепь как с внешней, так и с внутренней стороны, величина коррозионного износа тюбингов для обоснования толщины спинки принимается равной 10 мм. При этом отметим, что чугун – коррозионно-стойкий материал и, следовательно, не требует дополнительных специальных дорогостоящих коррозионно-стойких покрытий; может применяться в низкотемпературных условиях, так как обладает высокой морозостойкостью и, следовательно, исключает угрозу хладоломкости; позволяет получить заданные толщины тюбингов для разных марок чугуна, производимого современными металлургическими способами, и механически точно обработанные тюбинги.

В настоящее время заводы с современным оборудованием гарантируют полную взаимозаменяемость тюбингов, достигаемую высокой точностью механической обработки. Прочностные характеристики чугуна изменяются при увеличении толщины отливки из-за более длительной скорости ее охлаждения, в результате чего при одинаковом химическом составе могут изменяться различные структуры.

Для обоснования в дальнейшем параметров крепи из чугунных тюбингов необходимо определить расчетный предел прочности чугуна на сжатие [8]. Отметим, что при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках в соответствии с горно-геологическими и горнотехническими условиями толщины спинок тюбингов преимущественно изменяются в пределах 30...120 мм, в редких случаях изменение происходит в более широких пределах.

С учетом сопоставления данных расчетных пределов прочности чугуна на сжатие, временного сопротивления чугунных отливок при растяжении [8–11] с целью обоснованного выбора толщин спинок тюбингов требуется определение расчетных значений для разных толщин спинок тюбингов. По резуль-

татам исследований представлены зависимости изменения временного предела прочности чугуна на растяжение и сжатие от толщины отливок (спинки тьюбингов) и выполнена интерполяция для получения значений при толщине отливок 30...150 мм с шагом 10 мм (рис. 1).

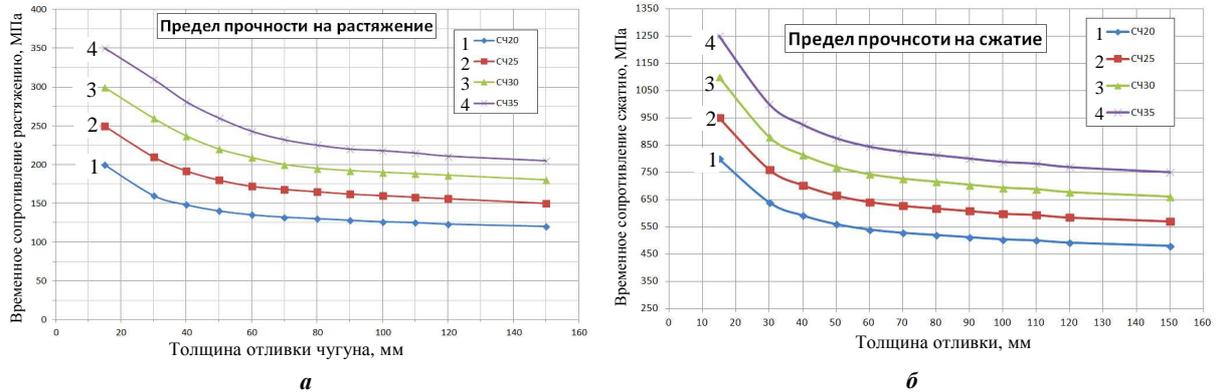


Рисунок 1. – Временный предел прочности чугуна на растяжение (а) и сжатие (б)

Анализ зависимостей позволяет установить относительное снижение прочности чугуна с увеличением толщины спинки (рис. 2). Так, при толщине спинки тьюбинга 120 мм прочность чугуна снижается порядка 38%. Значения временных пределов прочности на сжатие чугуна при различных марках и толщинах спинок нормативными документами не устанавливается. В этой связи принимаем прочность на сжатие чугуна при толщине спинки 15 мм по справочным данным. Используя данные относительного уменьшения прочности чугуна, получаем временный предел прочности чугуна на сжатие при разных толщинах отливок (рис. 2).

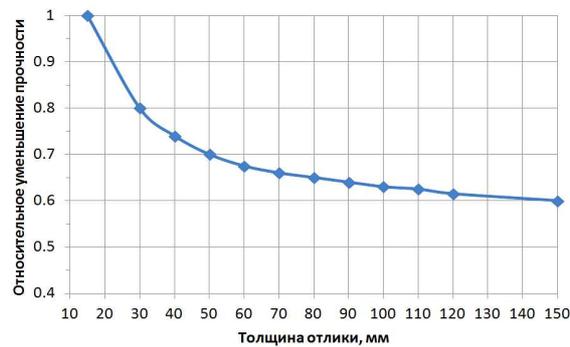


Рисунок 2. – Относительное снижение прочности чугуна с увеличением толщины спинки

Используя значения расчетных пределов прочности на сжатие и растяжение чугуна [8] и полученных результатов исследований в части относительного снижения прочности чугуна в различных отливках, получаем значения расчетных сопротивлений чугуна при сжатии и растяжении (рис. 3; табл. 1, 2).

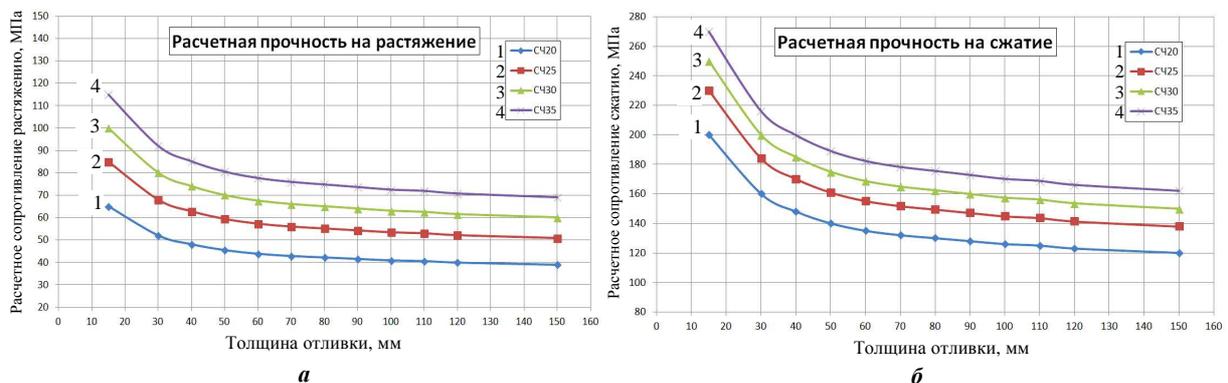


Рисунок 3. – Изменение расчетного предела прочности чугуна на растяжение (а) и сжатие (б)

Таблица 1 – Расчетные значения предела прочности чугуна на растяжение

Марка чугуна	Спинка, мм									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
СЧ20	52	48	46	44	43	42	42	41	41	40
СЧ25	68	63	60	57	56	55	54	54	53	52
СЧ30	80	74	70	68	66	65	64	63	63	62
СЧ35	92	85	81	78	76	75	74	72	72	71

Таблица 2 – Расчетные значения предела прочности чугуна на сжатие

Марка чугуна	Спинка, мм									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
СЧ20	160	148	140	135	132	130	128	126	125	123
СЧ25	184	170	161	155	152	150	147	145	144	141
СЧ30	200	185	175	169	165	163	160	158	156	154
СЧ35	216	200	189	182	178	176	173	170	169	166

При исследовании материалов крепи важно установление эффективного использования марок чугуна при разных толщинах отливок. При этом следует учитывать, что тюбинговое кольцо при постоянных нагрузках действует на сжатие. Также следует принимать во внимание увеличение массы тюбингов при увеличении толщин спинок и повышении стоимости производства тюбингов при более высоких марках чугуна. Для обеспечения необходимой прочности и жесткости чугуна в тюбинговом кольце, а также в целях оптимального выбора между толщинами отливок и маркой чугуна необходимо, чтобы чугун в отливках для производства тюбингов имел расчетный предел прочности на сжатие около 160 МПа в соответствии с прочностью марки СЧ20 и толщиной отливки 30 мм. Так, для обеспечения заданной прочности *рекомендуется применение следующих марок серого чугуна в зависимости от толщин спинок тюбингов:*

- СЧ20 – при толщине спинок тюбингов 30 мм;
- СЧ25 – при 40...60 мм;
- СЧ30 – при 70...100 мм;
- СЧ35 – при 110...120 мм.

Модуль упругости чугуна следует принимать 98000 МПа.

Расчетные характеристики бетона можно принимать в соответствии с [12].

Так, для расчетов следует принимать бетон марки С25/30 с расчетным пределом прочности на сжатие 25 МПа и модулем упругости 28000 МПа. Следует учитывать закономерности изменения прочностных характеристик массива горных пород в отрицательном температурном поле ЛПО и их влияние на нагружение бетонной крепи [13].

Таким образом, исследования нагрузок на крепь стволов от горных пород, характерных для калийных рудников, свойства которых приняты при средней (постоянной) температуре ЛПО, и от пород с дифференцированными свойствами в переменном температурном поле ЛПО показывают, что напряжения в конструкции крепи примерно на 10% меньше, чем при расчете крепи по средней температуре ЛПО.

Использование при расчете крепи шахтных стволов, проводимых способом замораживания, средней температуры ЛПО хорошо согласуется с результатами расчетов, учитывающих изменения деформационных свойств пород ЛПО от изменения температуры.

Закключение. Установленные в результате проведенных исследований расчетные значения пределов прочности чугуна на сжатие и растяжение при толщинах стенок тюбингов 30...120 мм, использование марки бетона С25/30 позволяют определить влияние горного давления как на многослойную крепь из чугунных тюбингов для интервала глубин крепления скипового и клетового шахтных стволов Петриковского ГОК 0...–265,0 м, многослойную чугунно-бетонную крепь для интервала –265,0...–500,0 м, бетонную крепь для интервала –500,0...–824,48 м, что способствует установлению оптимальных параметров крепи шахтных стволов с учетом горно-геологических характеристик пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петриковский горно-обогатительный комплекс. Подготовительный период для проходки стволов. Пояснительная записка. Т. 1.1 / ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2013. – 273 с. (Архитектурный проект).
2. Петриковский горно-обогатительный комплекс. Подготовительный период для проходки стволов. Приложения. Т. 1.2 / ОАО «Белгорхимпром», Минск, 2013. – 53 с. (Архитектурный проект).

3. Петриковский горно-обогатительный комплекс. Разработка исходных данных для проекта проходки шахтных стволов, в том числе исходные данные по скиповому стволу [текст] : отчет о НИР : в 2 кн. и 1 папке. / ОАО «Белгорхимпром» ; рук. В.В. Савченко ; отв. исполн. В.Э. Кутырло. – Минск, 2013. – Кн. 1 : Текст отчета. – 192 с.
4. Петриковский горно-обогатительный комплекс. Разработка исходных данных для проекта проходки шахтных стволов, в том числе исходные данные по клетевому стволу [текст] : отчет о НИР : в 2 кн. и 1 папке. / ОАО «Белгорхимпром» ; рук. В.В. Савченко ; отв. исполн. : В.Э. Кутырло. – Минск, 2013. – Кн. 2 : Текстовые приложения. – 182 с.
5. Петриковский горно-обогатительный комплекс. Разработка исходных данных для проекта проходки шахтных стволов, в том числе исходные данные по клетевому стволу [текст] : отчет о НИР : в 2 кн. и 1 папке. / ОАО «Белгорхимпром» ; рук. В.В. Савченко ; отв. исполн. : В.Э. Кутырло. – Минск, 2013. – Кн. 1 : Текст отчета. – 175 с.
6. Петриковский горно-обогатительный комплекс. Разработка исходных данных для проекта проходки шахтных стволов, в том числе исходные данные по клетевому стволу [текст] : отчет о НИР : в 2 кн. и 1 папке / ОАО «Белгорхимпром» ; рук. В.В. Савченко ; отв. исполн. : В.Э. Кутырло. – Минск, 2013. – Кн. 2 : Текстовые приложения. – 213 с.
7. Общесоюзные нормы технологического проектирования стволов подземных рудников по добыче калийной и каменной соли : ВНТП 5-82. – Введ. 01.07.1982. – М. : Минудобрений, 1982. – 52 с.
8. Стальные конструкции : СП 16.13330.2011. – Актуализированная редакция СНиП II-23-81* ; введ. : 20.05.2011. – М. : Минрегион России, 2011. – 173 с.
9. Подземные горные выработки : СНиП II-94-80 / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1982. – 31 с.
10. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. – М. : Стройиздат, 1983. – 272 с.
11. Чугун с пластинчатым графитом для отливок : ГОСТ 1412-85. – Введ. 01.01.1987. – М. : Гос. Ком. СССР по стандартам, 2004. – 5 с.
12. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Введ. 20.06.2002. – Минск : Минстрой-архитектуры Респ. Беларусь, 2003. – 177 с.
13. Влияние температуры ледопородного ограждения при расчете крепи шахтных стволов / Д.А. Иголка [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 3. – С. 36–41.

Поступила 07.06.2016

RESEARCH OF MATERIALS FIX MINE TRUNKS

A. KOLOGRIVKO, D. IGOLKA, E. LUKSHA

Results of researches tubing and concrete krepь for skipovy and kletye-vy mine trunks of the Petrikovsky mining and processing complex on the basis of the studied geological and hydrogeological structure, the analysis of geophysical surveys of the pedigree massif and the recommended intervals of depths of fastening of mine trunks are presented.

Keywords: *tubing and concrete lining, shafts, concrete, cast iron, corrosion.*

УДК 669.7:624.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО;
канд. техн. наук, доц. О.В. ШУМОВ;
канд. техн. наук А. ХЕЙДАРИ МОНФАРЕД
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлено моделирование дуговой сварки в среде аргона при сварке образцов из аустенитной стали для стыковых соединений тонколистовых образцов с принудительным охлаждением высокотемпературной области твердым диоксидом углерода. Определено влияние расстояния между дугой и областью охлаждения на напряжения и деформации сварного соединения образцов из аустенитной стали. Значения напряжений и деформаций при различных режимах сварки рассчитывались с использованием неосесимметричной трехмерной модели источника тепла. Модель имела распределение плотности теплового потока по закону Гаусса в области двойного эллипсоида. По результатам расчетов определены функциональные зависимости напряжений и деформации конструкции от расстояния между дугой и областью охлаждения. Данные зависимости позволят в дальнейшем определять оптимальные с точки зрения минимизации деформаций режимы сварки конструкций из тонколистовой аустенитной стали.

Ключевые слова: дуговая сварка, стыковое соединение, моделирование сварки, аустенитная сталь, принудительное охлаждение, определение деформаций.

Для производства ответственных сварных оболочковых конструкций в настоящее время широко используются коррозионно-стойкие аустенитные стали малой толщины. Данные стали обладают хорошей свариваемостью, однако низкая теплопроводность и высокий коэффициент температурного расширения обуславливают возникновение при сварке значительных напряжений и деформаций. Вместе с тем значительные по величине напряжения и деформации могут вызвать существенные искажения размеров и формы оболочковых конструкций, ведут к ухудшению внешнего вида сварных конструкций, их эксплуатационных характеристик, в частности к снижению надежности и сокращению срока службы [1; 2].

Расширение области применения оболочковых конструкций из аустенитных сталей на новые высокотехнологичные отрасли, в том числе аэрокосмическую, повышение требований к точности изготовления таких конструкций предопределяют потребность в совершенствовании технологии их сварки.

Методика исследований. Расчеты производились для образцов из аустенитной стали X18H9T размерами 150×170×1 мм, сваренных встык дуговой сваркой в среде аргона. Генерация трехмерной сетки конечных элементов осуществлялась при помощи программы ANSYS [3]. Анализ конечных элементов выполнялся с использованием программы SYSWELD [4].

Основная часть. К основным методам ограничения остаточных деформаций сварных конструкций относятся: уменьшение тепловложения в металл, предварительное механическое воздействие, предварительный нагрев, принудительное охлаждение и т.п.

Одним из эффективных методов снижения сварочных деформаций, область применения которого в последнее время постоянно расширяется, является метод бездеформационной сварки с использованием методов термического растяжения [5]. Использование метода термического растяжения предусматривает при сварке пластин их нагрев, который может производиться как неподвижными нагревателями, расположенными параллельно сварному шву, так и подвижными нагревателями, перемещаемыми вместе со сварочной горелкой. При нагреве свариваемых деталей на определенном расстоянии от дуги в области сварного шва возникают растягивающие напряжения, а в области нагрева – сжимающие. При этом образовавшиеся в области сварки растягивающие напряжения нейтрализуют сжимающие напряжения перед сварочной дугой, что позволяет не допустить возникновения пластических деформаций сжатия в области сварочной ванны. Так как уменьшение ширины и увеличение температуры нагрева вызывают рост сжимающих напряжений в области нагрева, то подбор этих параметров позволит регулировать величину этих напряжений. Однако при сварке тонких (менее 4 мм) пластин метод термического растяжения не позволяет полностью устранить деформацию свариваемых деталей.

Для сварки тонких деталей без искажения их формы рациональным является комбинирование методов снижения деформаций, в частности одновременное использование метода термического растяжения и метода сварки с теплоотводом. Подобное одновременное использование двух методов позволяет уменьшить растягивающие напряжения в области сварного шва и в зоне температурного воздействия, а также наиболее полным образом устранить деформации свариваемых деталей за счет градиента температур [6].

Исследования показали, что эффективными являются методы ограничения напряжения и деформаций принудительным локальным охлаждением твердым диоксидом углерода области высокотемпературного перегрева сварного соединения. При использовании данного метода также решается задача обеспечения технологической прочности сварочной ванны и управления процессами ее кристаллизации, улучшения механических свойств сварных швов и т.д. [7].

Для расчетов напряжений и деформаций при сварке выполнен трехмерный термоупруго-пластический анализ с движущимся источником тепла [8–10]. Использовалась трехмерная модель источника тепла с распределением плотности теплового потока по закону Гаусса в области двойного эллипсоида. При этом плотность мощности внутри переднего квадранта определялась следующим образом:

$$q_{arc}(x, y, z, t) = 6 \cdot f_f \cdot q_0 \cdot \sqrt{3} \cdot (a \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{3})^{-1} \cdot \exp\{-3 \cdot [x^2 \cdot a^{-2} + y^2 \cdot b^{-2} + (z - z_0 - vt)^2 \cdot c_1^{-2}]\},$$

а плотность мощности внутри заднего квадранта находили по формуле:

$$q_{arc}(x, y, z, t) = 6 \cdot f_r \cdot q_0 \cdot \sqrt{3} \cdot (a \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{3})^{-1} \cdot \exp\{-3 \cdot [x^2 \cdot a^{-2} + y^2 \cdot b^{-2} + (z - z_0 - vt)^2 \cdot c_2^{-2}]\},$$

где q_{arc} – плотность мощности, Вт/м³; q_0 – чистый тепловой поток, Вт; a, b, c – параметры, описывающие ширину теплового воздействия источника по осям x, y, z соответственно, мм; v – скорость сварки, м/с; f_f и f_r – доли тепла, выделяемые в переднем или заднем квадрантах ($f_f + f_r = 2$).

При определении величины напряжений и деформаций использовались следующие допущения:

- теплопроводность сварочной ванны при температуре выше температуры плавления считалась в 2 раза большей, чем при комнатной температуре;
- тепловые эффекты при кристаллизации моделировались с учетом скрытой теплоты; принималось, что температуры солидуса и ликвидуса разнятся на 50 °С;
- материалы свариваемых деталей считались однородными и изотропными.

Для расчета сварочных напряжений и деформаций определялось температурное поле в процессе сварки. Для этого было выполнено моделирование теплопередачи и проведен температурный анализ.

В процессе температурного анализа выполнены следующие операции:

- определены теплофизические свойства материалов;
- выполнено моделирование движущегося источника тепла;
- разработана конечно-элементная модель;
- проведена калибровка входного теплового потока.

Уравнение теплопроводности для трехмерного пространства имеет вид:

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = \partial / \partial x (\lambda \cdot \partial T / \partial x) + \partial / \partial y (\lambda \cdot \partial T / \partial y) + \partial / \partial z (\lambda \cdot \partial T / \partial z) + Q,$$

где T – температура, °С; λ – теплопроводность, Вт/м·с; Q – входящий тепловой поток, Вт/м³; ρ – плотность, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·с.

При дуговой сварке нагрев рассматривался как распределение внешнего теплового потока, а потери тепла на поверхности деталей рассматривались как границы, поглощающие тепло.

Размеры реальных деталей и их моделей выбирались из соображений дальнейшего использования экспериментальных результатов на практике без дополнительных исследований.

Исходя из этого и требования, чтобы размеры модели были максимально приближены к размерам реальных образцов, размеры модели выбраны из соотношений: длины к толщине $L/\delta \geq 106$; ширины к толщине $B/\delta \geq 81$.

Шаг по времени рассчитывался в зависимости от длины расплавленной зоны и принимался равным половине времени, необходимого для прохождения длины расплавленной зоны.

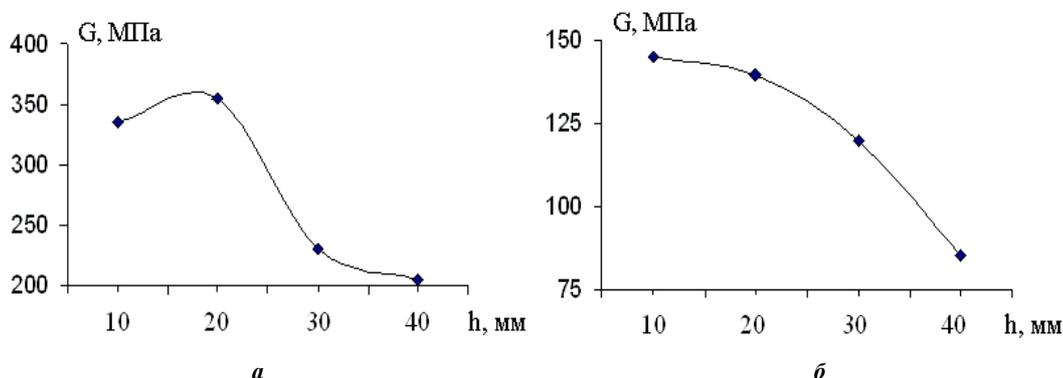
Полученное температурное поле использовалось в качестве входных данных при проведении термоупруго-пластического анализа для расчета напряжений и деформаций. В частности, проведено моделирование остаточных напряжений в поперечном сечении сварного соединения в зависимости от расстояния между дугой и областью охлаждения (рис. 1).

При расчетах ширина области охлаждения выбрана равной 10 мм исходя из того, что при больших значениях области охлаждения эффект от термического натяжения уменьшается.

Из анализа приведенных данных следует, что:

- при увеличении расстояния между дугой и областью охлаждения от 10 до 40 мм растягивающие напряжения уменьшаются от 352 МПа при расстоянии 20 мм до 206 МПа при расстоянии 40 мм;

- сжимающие напряжения, максимальные по модулю значения которых наблюдаются на расстоянии 20 мм от шва, при увеличении расстояния между дугой и областью охлаждения от 10 до 40 мм также уменьшаются от 146 МПа при расстоянии 10 мм до 83 МПа при расстоянии 40 мм.



a – в центре сварного шва; *б* – на расстоянии 20 мм от сварного шва

Рисунок 1. – Распределение продольных остаточных напряжений G в зависимости от расстояния h между дугой и зоной охлаждения

Результаты моделирования продольной пластической деформации в сечении сварного соединения в зависимости от расстояния между дугой и областью охлаждения после окончания сварки и охлаждения до комнатной температуры приведены на рисунке 2 (поскольку размеры пластины в направлении оси Y уменьшаются, то значения деформации на графике имеют отрицательные значения).

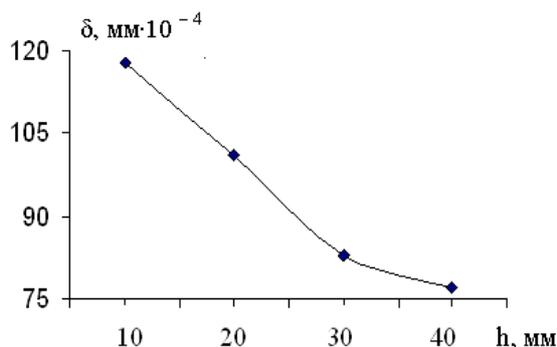


Рисунок 2. – Распределение продольной пластической деформации δ в зависимости от расстояния h между дугой и зоной охлаждения

На основе анализа полученных значений можно сделать следующие *выводы*:

- сварное соединение имеет максимальные значения продольной пластической деформации (0,0118 мм) при расстоянии 10 мм за счет меньшей скорости охлаждения в данной области соединения;
- при увеличении расстояния между дугой и зоной охлаждения продольная пластическая деформация увеличивается за счет усиления влияния эффекта термического растяжения и достигает минимального значения (0,0077 мм) при расстоянии 40 мм.

Заключение. В представленной работе для снижения напряжения и деформаций при сварке конструкций из тонколистовых аустенитных сталей предлагается *комбинированный метод снижения деформаций*, заключающийся в одновременном использовании метода термического растяжения и метода сварки с теплоотводом. Определены величины остаточных напряжений и деформаций в сварном соединении за счет *моделирования процесса стыковой сварки пластин из аустенитной стали*. Моделирование выполнено на основе проведения термоупруго-пластического анализа процесса сварки.

По результатам расчетов получены *зависимости влияния* расстояния между дугой и зоной охлаждения на остаточные продольные напряжения и на продольную пластическую деформацию сварного соединения деталей из аустенитной стали.

Одним из эффективных направлений использования разработанной модели является *прогнозирование перемещений элементов тонколистовых оболочечных конструкций* из аустенитных сталей в строительстве, транспортном, химическом машиностроении и т.п.

Применение модели и разработанного метода ограничения остаточных деформаций на этапе проектирования технологического процесса сварки позволит обеспечить предусмотренную техническими требованиями точность размеров и формы изготавливаемой конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров, В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций / В.А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. Сагалевич, В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевич. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
3. ANSYS 5.7 Advanced Analysis Techniques Guide. ANSYS Inc, 2003.
4. ESI Group, 2000. SYSTUS 2000 Analysis Reference Manuals – Shelby Township. ML : ESI North America.
5. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distorsion / Z. Feng. – Wood Publishing, 2005. – 343 p.
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 // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер., В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
8. Goldak, J.A. Computational Welding Mechanics / J. A. Goldak, M. Akhlaghi. – Springer, 2005. – 321 p.
9. Francis, J.D. Welding Simulation of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis / J.D. Francis. – Blackburg, Virginia Polytechnic Institute and State University, April 2002. – 224 p.
10. Cheng W. In plate Shrinkage Strains and Their Effects on Welding Distortion in Thin-wall Structures / W. Cheng The Ohio State University, 2005. – 268 p.

Поступила 11.04.2016

ESTIMATING DEFORMATIONS IN THE COURSE OF WELDING OF AUSTENITIC STEEL

F. PANTELEENKO, A. SHUMAV, A. HEIDARI MONFARED

In this work arc welding simulation in the course of welding of austenitic steel has been accomplished. The simulation of butt welds of the sheet specimens with the force-cooling of high temperature area by the hard carbon oxide has been carried out. The influence of distance between the arc and cooling area on the stresses and deformations of austenitic steel specimens has been estimated. The stresses and deformations value in the different welding conditions has been calculated with non-symmetric three-dimensional model of the heat source. The model had the heat flow distribution in double ellipsoid area as the Gaussian law. As a result it has been calculated the construction stresses and deformations as the functions of the distance between the arc and cooling area. These functions will permit to calculate the optimal welding conditions to minimize the deformations of welding sheet constructions.

Keywords: arc welding, butt weld, welding simulation, austenitic steel, force-cooling, estimating deformations.

УДК 624.01

К ВОПРОСУ ПОЛУЧЕНИЯ БЕСПОРОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО КАССЕТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Е.А. РАЗУЕВА; канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ;
канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЁНОВА
(Полоцкий государственный университет)**

Рассмотрены основные способы, обеспечивающие повышение качества поверхности железобетонных изделий, изготовленных по кассетной технологии. Решение задачи, в частности, возможно путем выбора смазок, применения литых и самоуплотняющихся бетонов, подбора режимов уплотнения бетонной смеси. Приведены результаты анализа влияния литых и самоуплотняющихся бетонов на качество поверхности железобетонных изделий, подготовки форм на качество поверхности плитных конструкций. Проанализированы данные по определению категории лицевых поверхностей железобетонных изделий, изготовленных с применением самоуплотняющихся бетонов с микронаполнителем на основе доломита и гиперпластификатором Стахемент-2000-М Ж30. Исходя из полученных данных сделан вывод о том, что применение самоуплотняющихся бетонов обеспечивает производство качественных железобетонных изделий с категорией поверхности не ниже А2.

Ключевые слова: кассетная технология, литые бетоны, самоуплотняющиеся бетоны, качество поверхности, смазки, микронаполнитель, пластификатор.

Введение. Крупнопанельное домостроение остается приоритетным направлением в жилищном строительстве Республики Беларусь. В гражданском строительстве широко используются плитные конструкции из сборного железобетона, позволяющие превращать строительную площадку в площадку монтажа сооружений из готовых конструкций, что позволяет облегчить и улучшить условия работы строителей.

Одна из основных задач при производстве плитных железобетонных изделий – получение продукции максимальной заводской готовности, что дает возможность резко сократить трудоёмкость и себестоимость отделочных операций на строительной площадке.

Среди основных направлений повышения качества поверхностей железобетонных изделий такие, как:

- подбор составов бетонных смесей с пластифицирующими добавками;
- использование литых и самоуплотняющихся бетонных смесей;
- выбор специальной смазки;
- использование полимерного покрытия форм;
- подбор режима уплотнения бетонной смеси.

Требования к точности изготовления конструкций, к качеству поверхностей и внешнему виду конструкций прописаны в ГОСТ 13015.0 [1]. Бетонные поверхности конструкций подразделяются на категории А1...А7. На поверхности категории А1 не должно быть раковин, наплывов и впадин. Поверхность должна быть глянцевой, не требующей отделочного покрытия на строительной площадке. Для категории бетонной поверхности А2 допускаются отдельные раковины размером не более 2 мм. Но в этом случае завод-изготовитель должен подготовить поверхность за счет дополнительных операций под улучшенную окраску (без шпатлевания на строительной площадке). Если требуется высококачественная окраска, ГОСТ допускает выполнение одного слоя шпатлевки на строительной площадке. В связи с этим систематизация данных, разработка универсальных методов, позволяющих получать изделия с заданными требованиями к качеству их поверхности, является актуальной задачей и имеет важное практическое значение.

Основная часть. Установление связи между структурой, свойствами химических добавок и их влиянием на свойства цемента является актуальным и при производстве плитных конструкций, формуемых по кассетной технологии [2].

Исследованиями, проведенными Л.В. Гавлиной, установлено, что качество лицевых железобетонных изделий, изготовленных из литых бетонных смесей с осадкой конуса бетона (ОК), равной 18...20 см, соответствует нормативным требованиям класса А2 по ГОСТ 13015.0-83 и не требует дополнительных затрат по отделке поверхностей [3].

Опираясь на эти данные, нами проведены экспериментальные исследования по оценке влияния литых бетонных смесей на качество поверхности железобетонных изделий. В исследованиях использовался заводской состав бетонной смеси. Для регулирования подвижности использовали пластифицирующие добавки Полипласт СП-1 и Стахемент-2000-М Ж30. Исследовались свойства трех составов: без добавки, с расходом добавки Полипласт СП-1 (СП-1) 1% от массы цемента и 1,2% от массы цемента (табл. 1). Далее формировались образцы кубов, которые твердели 7 и 28 суток в нормально-влажностных условиях и в условиях термовлажностной обработки (ТВО) при нормальном давлении. Результаты определения подвижности бетонной смеси и прочности бетона приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Составы бетонных смесей с пластифицирующей добавкой Полипласт СП-1

№ состава	Расход материалов				
	кг на 1 м ³ бетона				% от массы цемента
	цемент	песок	щебень	вода	добавка (СП-1)
1	285	1010	1010	208	–
2	285	1010	1010	208	1
3	285	1010	1010	208	1,2

Таблица 2 – Влияние дозировки добавки на подвижность бетонной смеси и прочность бетона

№ состава	Водоцементное отношение, В/Ц	Подвижность, см	Прочность, МПа	
			ТВО	28 суток
1	0,73	3	14,7	16,4
2	0,73	16	14,5	16,1
3	0,73	20	14,3	16,0

Оценка чистоты поверхностей определялась по количеству открытых пор различного диаметра. Такая оценка качества поверхности железобетонных изделий принята из-за отсутствия методик по измерению величин раковин, а также согласно требованиям, прописанным в нормативных актах. Диаметры пор были разбиты на четыре класса: 1; 1...2; 2...4; 4...6 мм. Такие размеры были приняты исходя из допустимых величин, прописанных в ГОСТ 13015.0-83 [1].

Так, для поверхности А2 диаметр раковин не должен превышать 1 мм, допускаются раковины размером 2 мм, но не более одной на 1 м². Для поверхности А3 диаметр раковин не должен превышать 4 мм, допускаются поры размером 6 мм, но не более одной на 1 м².

Результаты определения количества раковин на поверхности кубиков приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Количество раковин на поверхности образцов с пластифицирующей добавкой Полипласт СП-1

№ состава	Подвижность, см	Количество раковин, шт., диаметром			
		1 мм	1...2 мм	2...4 мм	4...6 мм
1	3	31	9	6	–
2	16	30	6	6	–
3	20	27	6	8	–

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что увеличение процента ввода добавки приводит к незначительному увеличению показателя качества поверхности. Так, количество раковин размером 1 мм составов 2 и 3 уменьшилось соответственно на 3,2 и на 12,9% по сравнению с базовым (состав 1). Количество раковин размером 1...2 мм уменьшилось на 33,3%. Количество раковин 2...4 мм увеличилось у состава 3 на 25% по сравнению с базовым.

Далее исследовались свойства трех составов: без добавки, с добавкой Стахемент-2000-М Ж30 (С-2000) с расходом 0,3, 0,5% от массы цемента и 0,8% от массы цемента. Составы бетонных смесей приведены в таблице 4. Результаты определения подвижности бетонной смеси и прочности бетона приведены в таблице 5.

Таблица 4 – Составы бетонных смесей с пластифицирующей добавкой Стахемент-2000-М Ж30

№ состава	Расход материалов				
	кг на 1 м ³ бетона				% от массы цемента
	цемент	песок	щебень	вода	добавка (С-2000)
1	285	1010	1010	208	–
4	285	1010	1010	208	0,3
5	285	1010	1010	208	0,5
6	285	1010	1010	181	0,8

Таблица 5 – Влияние дозировки добавки на подвижность бетонной смеси и прочность бетона

№ состава	В/Ц	Подвижность, см	Прочность, МПа	
			ТВО	28 суток
1	0,73	3	14,7	16,4
4	0,73	20	14,8	16,0
6	0,73	22	14,0	15,5
6	0,64	10	14,9	16,8

Результаты определения количества раковин на поверхности кубиков приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Количество раковин на поверхности образцов с пластифицирующей добавкой Стахемент-2000-М Ж30

№ состава	Подвижность, см	Количество раковин, шт., диаметром			
		1 мм	1...2 мм	2...4 мм	4...6 мм
1	3	31	9	6	–
4	20	20	9	4	–
5	22	16	9	4	–
6	10	19	7	3	–

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что увеличение процента ввода добавки приводит к значительному увеличению показателя качества поверхности. Так, количество раковин размером 1 мм составов 4 и 5 уменьшилось на 35,5% и на 48,4% соответственно по сравнению с базовым (состав 1). Количество раковин размером 1...2 мм не уменьшилось. Количество раковин 2...4 мм уменьшилось на 33,3% по сравнению с базовым. При снижении количества воды количество раковин размером 1 мм состава 6 уменьшилось на 38,7% по сравнению с базовым; количество раковин размером 1...2 мм – на 22,2%, размером 2...4 мм – на 50%.

Самоуплотняющийся бетон (СУБ) представляет собой материал, который способен уплотняться под действием собственного веса, полностью заполняя форму даже в густоармированных конструкциях. Он находит все более широкое применение. Перспективным является его использование для производства сборного железобетона.

В зависимости от способа обеспечения стойкости к расслаиванию и водоотделению выделяют два основных типа самоуплотняющихся бетонных смесей (СУБС): мелкодисперсный тип (значительное увеличение содержания мелкодисперсной фракции по сравнению с обычным бетоном); стабилизаторный тип (использование стабилизирующих добавок). *Мелкодисперсные заполнители* – известняковые порошки, молотый доменный шлак, зола-унос или кремнистые уносы – увеличивают стойкость самоуплотняющегося бетона к расслаиванию и снижают блокирование движения бетонной смеси при ее протекании в густоармированных конструкциях. *Стабилизирующие добавки*, или модификаторы вязкости бетонной смеси, позволяют достичь оптимальной вязкости, обеспечивая правильный баланс между подвижностью и стойкостью к расслаиванию – противоположными свойствами, проявляющимися при добавлении воды.

При добавлении стабилизирующей добавки на поверхность цементных частиц образуется устойчивый микрогель, обеспечивающий создание «несущего скелета» в цементном тесте, предотвращающая тем самым расслаивание бетонной смеси. При этом образующийся «несущий скелет» позволяет заполнителю (песок и щебень) свободно перемещаться, сохраняя удобоукладываемость бетонной смеси [4].

Применение микрозаполнителя и пластификатора для вертикального формования повышает качество выпускаемой продукции, о чем свидетельствуют данные исследований [5].

Согласно А.И. Харченко, применение микрозаполнителя предполагает формирование компактной и плотной структуры цементного камня [6].

Исследованиями влияния микрозаполнителя на качество лицевых поверхностей железобетонных изделий установлено [7], что высокое качество лицевой поверхности достигается за счет возможности СУБ заполнять форму любой сложности.

Исходя из опыта использования СУБ различных исследователей, нами выполнен расчет состава СУБ по методике, приведенной в ТКП 45-5.03-266 [8]. Расчет составов СУБ проводился в два этапа.

На первом этапе рассчитан приблизительный состав бетона с процентным содержанием доломита в вяжущей композиции 20%, гиперпластификатора Стахемент-2000-М Ж30 – 0,6% от массы вяжущей композиции.

На втором этапе по приблизительным значениям содержания компонентов СУБ определены структурные характеристики бетона, расчетный состав представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Расчетный состав самоуплотняющегося бетона

№ состава	Расход компонентов, кг/м ³					
	цемент	дисперсный наполнитель (доломит)	стакемент-2000-М Ж30	вода	песок	щебень
8	345	86	2,07	260	774	786
	Расчетное значение диаметра растекания конуса, RK_p , см			Расчетная прочность на сжатие в возрасте 28 суток, $f_{ccube 28}$, МПа		
	60			8,3		

Согласно ТКП 45-5.03-266-2012 полученные расчетные значения компонентов и структурных характеристик СУБ должны удовлетворять условиям:

$$1. G_{ц} = G_{ц, min} \geq \text{по СТБ 1544.}$$

$$\text{Условие выполняется: } G_{ц} = 345 > 280 \text{ кг/м}^3.$$

$$2. X_{\tau} \leq 0,98 X_{\tau \max},$$

где X_{τ} – характеристика относительного водосодержания теста; $X_{\tau \max}$ – максимальное значение характеристики относительного водосодержания теста в пределе связности СУБС.

$$\text{Условие выполняется: } X_{\tau} = 1,55 \leq 1,55.$$

$$3. m_{т1} \geq 0,025,$$

где $m_{т1}$ – объемная концентрация теста, обеспечивающая раздвижку зерен заполнителей.

$$\text{Условие выполняется: } m_{т1} = 0,2 \geq 0,025.$$

Для реализации опытного исследования был приготовлен замес бетонной смеси состава 8.

Измерение величины растекания конуса (РК) показало: марка СУБС по удобоукладываемости Р-2; видимого расслоения бетонной смеси на финальной стадии осадки конуса не наблюдалось.

После измерения удобоукладываемости бетонных смесей, изготавливались образцы – кубы с ребром $10 \times 10 \times 10$ см для определения прочности бетона на сжатие и для определения качества поверхности.

Физико-механические свойства бетона и бетонной смеси представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Физико-механические свойства бетонной смеси и бетона

№ состава	В/Ц	Подвижность, см	Показатель растекания конуса, РК, см	Прочность, МПа	
				ТВО	28 суток
1	0,73	3	–	14,7	16,4
4	0,73	20	–	14,8	16,0
8	0,75	–	64	13	14,8

Результаты определения количества раковин на поверхности кубиков приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Количество раковин на поверхности образцов с дисперсным наполнителем

№ состава	Количество раковин, шт., диаметром			
	1 мм	1...2 мм	2...4 мм	4...6 мм
1	31	9	6	–
4	20	9	4	–
8	9	1	–	–

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что применение микронаполнителя и гиперпластификатора приводит к значительному увеличению показателя качества поверхности. Так, количество раковин размером 1 мм состава 8 уменьшилось на 71% по сравнению с базовым (состав 1); количество раковин размером 1...2 мм уменьшилось на 89%. Раковины размером 2...4 мм не обнаружены.

Наиболее значимым и трудоемким технологическим процессом при изготовлении железобетонных конструкций выступают опалубочные работы.

Смазывание форм является обязательной технологической операцией при производстве сборных железобетонных изделий. В зависимости от вида опалубки и условий ее применения используются различные составы смазок. Расход смазок зависит от способа нанесения их на поверхность опалубочной формы, консистенции смазки, температуры наружного воздуха, разницы во времени от установки опалубки на место до начала укладки бетонной смеси.

Известно также, что для облегчения распалубливания железобетонных конструкций применяют облицовки из полимерного материала, монтируемого на собранных опалубочных панелях. Применяются также облицовки из рулонного или плиточного полимерного материала, монтируемого на поверхности палубы точечным креплением [9].

Для оценки влияния подготовки поверхности форм на качество поверхности бетона использовались три состава бетонной смеси – состав 1, состав 4 и состав 8. Составы бетонных смесей приведены в таблице 1, 4 и 7. Исследовано влияние смазок АТ-5Б, СЗАЖ-II-M и полимерных покрытий на качество бетонных поверхностей. Результаты оценки качества поверхности образцов-кубиков приведены в таблицах 10, 11, 12 соответственно.

Таблица 10 – Результаты влияния смазки АТ-5Б на качество поверхности

№ состава	Количество раковин, шт., диаметром			
	1 мм	1...2 мм	2...4 мм	4...6 мм
1	31	9	6	–
4	20	9	4	–
8	8	–	–	–

Таблица 11 – Результаты влияния смазки СЗАЖ-II-M на качество поверхности

№ состава	Количество раковин, шт., диаметром			
	1 мм	1...2 мм	2...4 мм	4...6 мм
1	23	7	5	–
4	17	3	2	–
8	4	–	–	–

Таблица 12 – Результаты влияния полимерного покрытия на качество поверхности

№ состава	Количество раковин, шт., диаметром			
	1 мм	1...2 мм	2...4 мм	4...6 мм
1	15	8	2	–
4	10	4	–	–
8	2	–	–	–

Анализ полученных данных позволил сделать *выводы*:

- применение смазки СЗАЖ-II-M приводит к уменьшению пор размером 1 мм на 30%, пор размером 1...2 мм на 45%, пор размером 2...4 мм на 33% по сравнению со смазкой АТ-5Б;
- применение полимерного покрытия приводит к уменьшению пор размером 1 мм на 50%, пор размером 1...2 мм на 34%, пор размером 2...4 мм на 83% по сравнению со смазкой АТ-5Б.

Заключение. На основании полученных данных можно констатировать следующее:

- применение литых бетонных смесей с осадкой конуса 18...20 см позволяет получить качество лицевых поверхностей железобетонных изделий класса А3 по ГОСТ 13015.0-83, а применение полимерного покрытия – качество лицевых поверхностей железобетонных изделий класса А2 по ГОСТ 13015.0-83;
- исследовано влияние смазок АТ-5Б, СЗАЖ-II-M и полимерных покрытий на качество бетонных поверхностей. Смазка СЗАЖ-II-M приводит к значительному уменьшению пор. Полимерное покрытие позволяет получить качественные железобетонные изделия с категориями поверхности не ниже А2;
- к значительному увеличению показателя качества поверхности готовых изделий приводит использование микронаполнителя на основе доломита и гиперпластификатора. Подобранные составы самоуплотняющегося бетона обеспечивают производство качественных железобетонных изделий с категорией поверхности не ниже А2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Общие технические требования : ГОСТ 13015.0-83 ; введ. 01.01.84. – М. : Центральный науч.-исслед. и проектно-экспериментальный ин-т промышленных зданий и сооружений (ЦНИИпромзданий) Госстроя СССР, 1984. – 6 с.

2. Мурадов, Э.Г. Материалы для приготовления бетонной смеси и строительного раствора : учеб. пособие для СПТУ / Э.Г. Мурадов. – М. : Высш. школа, 1987. – 111 с.
3. Гавлина, Л.В. Литой бетон с комплексными добавками на основе суперпластификаторов : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Л.В. Гавлина ; Моск. Ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный ин-т им. Куйбышева. – М., 1984. – С. 9–23.
4. Технический каталог по добавкам в бетон концерна BASF. – М., 2009.
5. Атабаев, А.Б. Об опыте освоения технологии производства панелей ВС на кассетно-конвейерной линии СКТБ «Стройиндустрия» / А.Б. Атабаев, В.А. Ли // Тез. докл. Всесоюзного семинара-совещания. – Тверь, 1990. – С. 53–54.
6. Харченко, А.И. Самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны для монолитного домостроения на основе композиционных вяжущих / А.И. Харченко, А.К. Дятлов, И.Я. Харченко // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова», Россия, Чеченская Республика, Грозный, 24–26 марта 2015 г. – Грозный. – С. 25–33.
7. Атабаев, А.Б. Совершенствование технологии изготовления железобетонных изделий в вертикальных формах на основе безвибрационного формования с применением литых бетонных смесей : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / А.Б. Атабаев ; Центральный межведомств. ин-т повышения квалификации работников и специалистов строительства ЦМИПКС при МГСУ. – М., 1995.
8. Бетонные и железобетонные изделия и конструкции из самоуплотняющегося бетона. Правила изготовления : ТКП 45-5.03-266-2012. – Введ. 01.03.13. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2013. – 5 с.
9. Совалов, И.Г. Бетонные и железобетонные работы / И.Г. Совалов, Я.И. Могилевский, В.И. Остромогольский. – М. : Стройиздат, 1988. – Гл. 1.

Поступила 01.06.2016

TO THE QUESTION OBTAINED WITHOUT PORE OF THE SURFACE OF PLATE CONCRETE PRODUCTS MOLDED BY TYPE TECHNOLOGY

E. RAZUEVA, V. BOZYLEV, L. PARFENOVA

The article discusses the main ways ensuring improving the quality of the surface of concrete products. In particular, it is done by selecting lubricants, the use of cast and self-compacting concrete, the selection of a concrete mixture compaction modes. Effect of cast and self-compacting concrete on the surface quality of the concrete products is investigated. Study of the effect of preparation forms on the surface quality of the concrete products is carried out. Data from certain categories of concrete products surfaces made with the use of self-compacting concrete are analyzed. The microfiller on the basis of dolomite and hyperplasticizer Stahement-2000-M ZH30 are used for self-compacting concrete. These results allow one to conclude that the use of self-compacting concrete enables the production of high-quality concrete products from the surface of categories not lower than the A2.

Keywords: *type technology, cast concrete, self-compacting concrete, the quality of the surface, lubricants, microfiller, plasticizer.*

УДК 691.332

**ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНОВ
ПРИ ИХ МОДИФИКАЦИИ ОТХОДАМИ КАМНЕОБРАБОТКИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ**

*Д.В. БУРБА; канд. техн. наук, доц. Д.И. САФОНЧИК
(Гродненский государственный университет имени Янки Купалы)*

Исследуются физико-механические свойства бетонов, изготовленных по разработанному авторами рецепту. На основании полученных результатов предложено заменять часть природного песка гранитовыми отходами, а также производить фиброармирование бетона при помощи полиэфирных волокон. Выполнены исследования характеристик гранитных отходов. Установлено, что использование отходов камнеобработки позволяет экономить природный кварцевый песок при изготовлении бетонных образцов, но может приводить к появлению усадочных трещин на поверхности бетона. Показана возможность исключить образование поверхностных трещин при комплексном использовании пластифицирующей добавки и полиэфирных волокон.

Ключевые слова: *тяжелый бетон, отходы камнеобработки, гранитные отсеvy, кварцевый песок, полиэфирные и полиамидные волокна, пластифицирующие добавки, усадочные трещины, износостойкость, прочность на сжатие.*

Бетон – один из самых распространенных в настоящее время конструкционных материалов, обладающий целым рядом положительных свойств. С течением времени менялись требования к строительным конструкциям, что вызывало необходимость изменения состава тяжелого бетона. Современный бетон уже не является простым искусственным камнем, полученным в результате затвердевания смеси, состоящей из песка, щебня, цемента и воды. Для улучшения физико-механических характеристик в бетонные смеси вводят различные модификаторы, выполняется активация отдельных компонентов. Увеличение количества составляющих бетона приводит не только к изменению его свойств, но также увеличивает стоимость бетонных и железобетонных конструкций. Поэтому при проектировании составов бетонных смесей целесообразно использовать в их составе местные материалы и материалы, являющиеся отходами различных производств.

В Республике Беларусь имеются предприятия, на которых при производстве основной продукции образуются различные отходы. Затраты на утилизацию этих отходов значительно увеличивают конечную стоимость продукции, поэтому для любой производственной организации проблема утилизации отходов является весьма актуальной. К примеру, в Беларуси успешно функционирует предприятие РУПП «Гранит», на котором производят щебень различных фракций. В результате производства образуются гранитные отсеvy крупностью 0...10 мм.

Проблеме использования отходов камнеобработки посвящено много работ как отечественных, так и зарубежных исследователей. Результатом научно-исследовательских работ явились рекомендации по применению каменных отсеvов при производстве следующих строительных материалов: пеностекло; сухие строительные смеси; цементы и бетоны.

В бетонах различного назначения гранитные отсеvy, большую часть которых можно отнести к крупным и очень крупным пескам (с модулем крупности $M_{кр}$ от 2,5 до 3,6), применяются как укрупняющая добавка к природным мелким кварцевым пескам. Такая добавка позволяет заменить часть песка гранитными отсеvами дробления и снизить расход вяжущего на 15...20% [1].

Основным препятствием для использования гранитных отсеvов дробления является большое количество пылеватых частиц крупностью менее 0,14 мм, которое может достигать 15...20% от общего объема отсеvов. Кроме того, в добываемой гранитной породе может присутствовать большое количество глинистых частиц (до 12%). Всё это приводит к увеличению водопотребности и к перерасходу цемента до 20%, а также к образованию неоднородной структуры бетона и шероховатой поверхности [1].

Анализ специальной литературы показал, что исследователи не пришли к единой точке зрения относительно влияния гранитных отсеvов (в частности фракции менее 0,14 мм) на физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов. Значительная часть исследователей сходится во мнении о негативном влиянии этих частиц на свойства бетонных смесей (повышение водопотребности, уменьшение удобоукладываемости) [1; 2]. Другие считают, что частицы гранитных отсеvов крупностью менее 0,14 мм обладают активностью и могут вступать в химическое взаимодействие с продуктами гидратации и влиять на свойства цементных систем.

Горностаевой Т.А. были проведены исследования по применению отсеvов дробления в мелкозернистом бетоне, в результате которых установлено влияние отсеvов дробления на структурообразование

мелкозернистых бетонов, получены основные зависимости свойств бетонных смесей и бетонов от их состава, обосновано их использование в бетонах классов по прочности на сжатие до В40 [3].

Исследования Л.Д. Чумакова, Нгуен Вьет Кыонга (МГСУ, Россия) позволяют сделать вывод о том, что пылеватые фракции гранитного щебня могут быть использованы в качестве активного наполнителя для тяжелых цементных бетонов (использование пылевидной фракции менее 0,14 мм, близкой по размерам к крупным зернам цемента, с удельной поверхностью 1800 см²/г, в качестве активного наполнителя способствует повышению прочности бетона на сжатие и при изгибе, а также сокращению расхода цементного вяжущего до 10% [4]).

В научной работе Е.Ф. Кузнецовой, Г.М. Соболева, К.Г. Соболева (БГТУ им. В.Г. Шухова, Россия) исследовалась возможность получения эффективных литых бетонов путем введения минерального микронаполнителя из отходов добычи и обработки известняка и гранитного щебня и суперпластификатора в состав бетонных смесей. Это способствует улучшению структуры цементного камня, повышению прочности бетона при сжатии при сокращении расхода цементного вяжущего до 10% [5].

В исследованиях П.Л. Федоровича, А.В. Смолякова, А.А. Дрозда, Э.И. Батыновского (БрГТУ, Беларусь) обоснована возможность использования гранитных отсевов в качестве минеральной добавки к цементу, а также возможность создания бетонов на мелком заполнителе, обогащенном крупными фракциями отсева. Экспериментально доказана эффективность обогащения мелкозернистых песков до $M_k = 3,5$ крупными фракциями гранитного отсева (приводит к улучшению морозо-, соле-, водостойкости; снижается водопоглощение мелкого заполнителя и увеличивается прочность бетона) [6].

Учеными центрального дорожного исследовательского института из Нью-Дели (Индия) проводилось исследование, в результате которого было определено влияние гранитных отсевов крупностью 0,315...5 мм на прочностные характеристики бетонов. Бетонные образцы размерами 100×100×100 мм испытывались на сжатие на 1, 7, 14, 28, 56, 90-е сутки. В результате испытаний был сделан вывод о том, что наилучшими показателями прочности на сжатие обладают бетонные образцы из составов, полученных путем замены 15% мелкого заполнителя гранитными отсевами крупностью 0,315...5 мм (максимальное увеличение прочности – 6% на 90-е сутки) [7].

Таким образом, можно сделать вывод, что проблема использования отходов камнеобработки является актуальной. Однако по-прежнему не сформированы основные и эффективные области применения этих отходов в строительстве.

Еще одним примером крупного предприятия, на котором образуются отходы, является ПТК «Химволокно» ОАО «Гродно Азот» – крупный производитель полиамидных и полиэфирных нитей, а также композиционных материалов на их основе. При производстве указанных материалов образуются отходы в виде обрывков нитей и волокон. Известно, что короткие химические волокна можно применять для получения фибробетонов, которые отличаются повышенными трещиностойкостью и изностойкостью. В настоящее время в практике проектирования фибробетонов наибольшее распространение нашли фибры из стальной проволоки и базальтового волокна.

Исследовательская часть. В Гродненском государственном университете имени Янки Купалы выполняется научно-исследовательская работа по изучению свойств бетонов, модифицированных отходами камнеобработки и отходами синтетических волокон. Гранитные отсевы, использованные в работе, предоставлены предприятием КУП «Гроднооблдорстрой».

Отсевы гранитного щебня для их изучения предварительно разделялись на группы разной крупности, и для каждой группы определялся удельный вес частиц группы в общей массе навески (табл. 1).

Таблица 1 – Удельный вес частиц разной крупности в массе навески

Наименование показателя	Крупность частиц отсева, мм			
	> 10	5...10	0,14...5	< 0,14
Содержание в навеске частиц, %	0,92	3,00	82,92	13,14

По данным таблицы 1 можно сделать вывод о том, что в гранитных отсевах преобладают частицы крупностью 0,14...5 мм (их содержание составляет около 83% от общей массы исследуемой пробы).

При помощи цифрового микроскопа МИКРОН-500 были изучены формы поверхности частиц гранитных отсевов (рис. 1). На основе анализа снимка цифрового микроскопа, представленного на рисунке 1, сделан вывод о том, что поверхность гранитных частиц имеет развитую структуру. Это можно объяснить тем, что в результате механической обработки поверхностные слои гранита разрушаются, вследствие чего них создается множество дополнительных дефектов (дробление способствует актива-

ции поверхности за счет увеличения количества дефектов в частицах, а также приводит к увеличению площади поверхности отдельной частицы).

Таким образом, влияние частиц крупностью менее 0,14...5 мм отсевов дробления гранитного щебня на процесс гидратации и формирование структуры бетонов определяется характеристиками поверхности этих частиц.

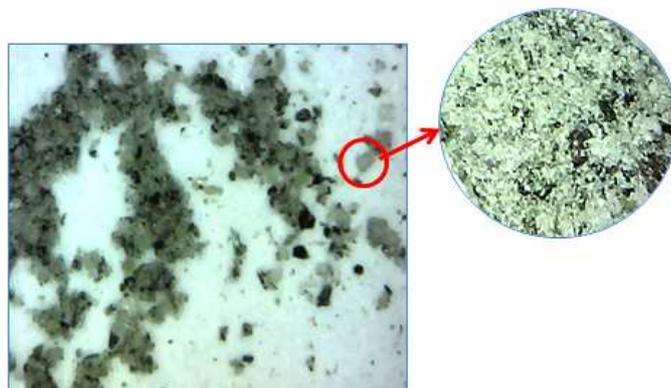


Рисунок 1. – Частицы отсевов дробления гранитного щебня

Химический состав гранитных отсевов изучался в сравнении с химическим составом кварцевого песка при помощи спектрометра СЕР-01 (рис. 2).

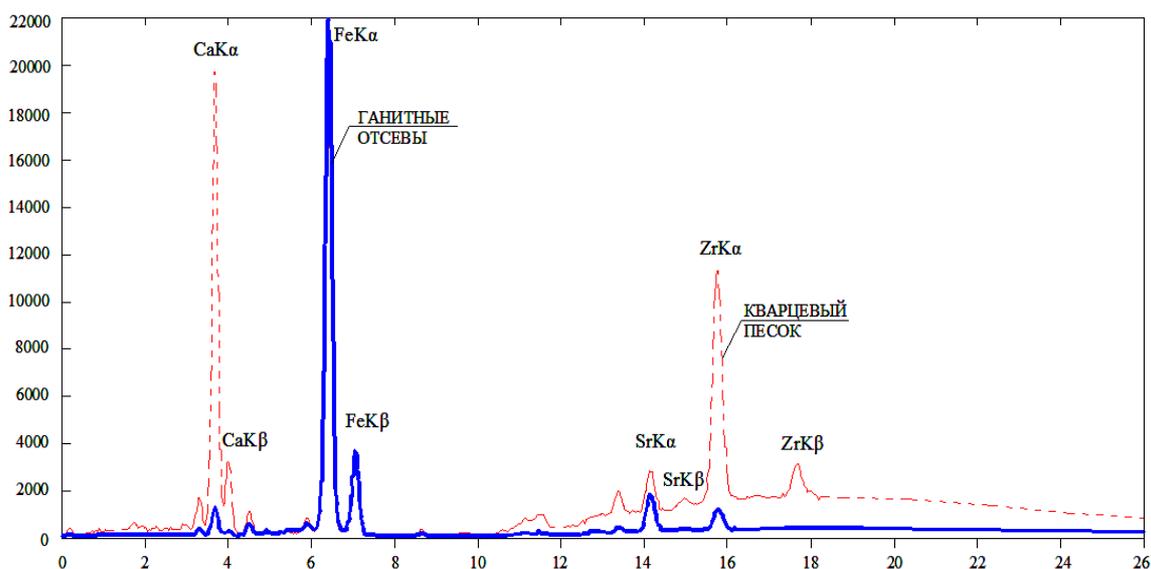


Рисунок 2. – Спектрограмма гранитных отсевов и кварцевого песка

По представленной на рисунке 2 спектрограмме можно сделать вывод, что гранитный отсев при сравнении его с кварцевым песком характеризуется содержанием в своем составе большего количества железа (Fe), кроме этого в его составе, в отличие от песка, присутствуют элементы иттрия (Y) и молибден (Mo).

Выполнив предварительное исследование гранитных отсевов, принято решение использовать их в качестве частичной замены кварцевого песка при изготовлении бетонов (применялись только частицы, сопоставимые по своей крупности с частицами природного песка).

Экспериментальные исследования показали, что при введении отсевов вместо части природного песка (до 10%) прочность образцов на сжатие не уменьшается, а даже наблюдается незначительное ее увеличение (до 6%). На поверхности образцов, изготовленных с применением отсевов, наблюдались поверхностные усадочные трещины. С целью уменьшения количества и размеров усадочных трещин в состав образцов предложено вводить синтетические волокна.

В качестве синтетического волокна нами использованы материалы, полученные с ПТК «Химволокно» ОАО «Гродно Азот». Основные свойства волокон приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства фиброволокна

Волокно	Плотность, кг/м ³	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Температура деструкции, °С
Полиэфирное	1380	800...1000	2000...2500	240...260

Заключение. Использование полиэфирных волокон привело к ожидаемому результату и позволило повлиять на износостойкость образцов.

В результате выполнения научно-исследовательской работы предложен состав бетонной смеси. В смесь вводились гранитные отсева (10% природного песка заменялась отсевами крупностью 0,14...5 мм), добавка С-3 и полиэфирные волокна.

Установлено, что бетонные образцы разработанного состава обладают повышенной прочностью на сжатие (до 14%).

Для бетонных образцов, изготовленных с применением отсевов и синтетической фибры, величина водопоглощения изменяется незначительно (на 7-е сутки уменьшается на 2%, на 28-е – на 3%). Кроме того, несколько снижается показатель общей пористости бетона (на 2,63%), а также показатели объема открытых капиллярных (на 3,02%) и некапиллярных (0,63%) пор.

Износостойкость бетонных образцов разработанного состава может быть улучшена на 18%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Использование отсевов дробления изверженных горных пород при производстве щебня / М.Л. Писневич [и др.] // Строительные материалы. – 1982. – № 6. – С. 6–7.
2. Левин, Л.И. Применение отсевов дробления в бетонах с эффективными пластификаторами / Л.И. Левин, В.Н. Тарасова, Е.И. Левина // Малоотходная технология при производстве нерудных строительных материалов и облицовочных материалов из природного камня : материалы семинара. – М. : МДНТП. – 1987. – С. 128–134.
3. Горностаева, Т.А. Мелкозернистые бетоны с использованием отсевов дробления щебня изверженных горных пород : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Т.А. Горностаева. – М., 2005. – 236 л.
4. Чумаков, Л.Д. Влияние содержания пылевидных частиц в отсевах дробления горных пород на свойства растворной составляющей бетона / Л.Д. Чумаков. – М. : МГСУ, 2008.
5. Кузнецова, Е.Ф. Получение эффективных литых бетонных смесей и бетонов на основе наноматериалов и отходов камнеобработки / Е.Ф. Кузнецова, Г.М. Соболев, К.Г. Соболев // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – С. 7–10.
6. Федорович, П.Л. Эффективность использования технологических гранитных отсевов РУПП «Гранит» в цементных бетонах / П.Л. Федорович, А.В. Смоляков. – Брест : БрГТУ, 2014. – Ч. 2.
7. Ankit Nileshchandra Patel. Stone waste for concrete with value creation opportunities / Ankit Nileshchandra Patel // International journal of latest trends in engineering and technology (IJLTET). – 2013. – Vol. 2. – P. 113–120.

Поступила 07.06.2016

CHANGING THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE MODIFICATIONS IN THEIR STONE PROCESSING WASTE AND TECHNICAL FIBERS

D. BURBA, D. SAFONCHYK

The results of the study of physical and mechanical properties of concrete made by the authors developed the recipe. It is proposed to replace part of the natural sand from the granite-strokes, as well as produce concrete using polyester fibers. The studies of granite waste characteristics. It was found that the use of stone processing waste saves natural quartz sand in the manufacture of concrete samples, but can give rise to shrinkage cracks in the concrete surface. To exclude the possibility of formation of surface cracks is possible with the integrated use of plasticizing additives and polyester fibers.

Keywords: heavy concrete, stone processing waste, granite screenings, quartz sand, polyester and polyamide fibers, plasticizers, shrinkage cracks, wear-resistance, compressive strength.

УДК 666.944.21:666.972

**РЕЖИМЫ И СПОСОБЫ АКТИВАЦИИ
ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

*канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА; канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ;
канд. техн. наук, доц. А.П. ШВЕДОВ; М.Н. ВЫСОЦКАЯ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматриваются вопросы, связанные с утилизацией золошлаковых отходов теплоэлектростанций, работающих на дровах и торфе. Отмечено, что в состав золошлаковых материалов входят химические элементы, предопределяющие возможность их использования в производстве вяжущих веществ. Показаны современные подходы к оценке химического состава золошлаковых отходов и определению области их применения. Представлен краткий обзор режимов и способов активации золошлаковых отходов. Проанализированы исследования в области вяжущих щелочной активации. В научных разработках в качестве щелочных компонентов вяжущих на основе кислых зол находят применение отходы промышленного производства. Эффективным и малоэнергоёмким способом активации золошлаковых отходов ТЭС является механохимическая активация. Отмечена актуальность разработок эффективных мало- и бесклинкерных вяжущих на основе золошлаковых отходов ТЭС, работающих на местных видах топлива.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, щелочная активация, термоактивация, механохимическая активация, активаторы твердения, бесклинкерные вяжущие.

Планы развития энергетики связаны с увеличением к 2020 году доли собственных энергоресурсов (в том числе: торфа, дров, биомассы) в балансе котельно-печного топлива до 32...34%.

Без применения современных технологий переработки увеличение потоков зольных отходов приводит к росту площадей гидрозолошлакоотвалов, что нанесет непоправимый ущерб окружающей среде. В этой связи анализ режимов и способов активации золошлаковых отходов ТЭС с целью распространения опыта утилизации золошлаковых отходов при производстве мало- и бесклинкерных вяжущих веществ представляет особый практический интерес.

Основная часть. В странах Евросоюза, а также США и других промышленно развитых странах мира утилизация золы – неотъемлемая составляющая технологического процесса угольных теплоэлектростанций. Теплоэлектростанции осуществляют предпродажную подготовку продукта, доводя характеристики золы до требований официальных строительных нормативных документов.

Определение области утилизации золошлаковых материалов основано на детальном исследовании состава и свойств отдельных фракций золы и шлака. Главными составляющими золошлаковых материалов являются оксиды: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO . Небольшая доля приходится на сульфаты: CaSO_4 , MgSO_4 , FeSO_4 ; в еще меньших количествах присутствуют фосфаты, оксиды щелочных металлов K_2O и Na_2O . В золошлаковых материалах могут содержаться биогенные (фтор, марганец, кобальт, свинец, медь и др.) и токсические микроэлементы (бор, ванадий, мышьяк, стронций, бериллий и др.) [1].

Подход к оценке химического состава золошлаковых материалов в разных странах различен. Согласно европейским нормам EN 197-1 золу считают кислой, если в ней содержание активного CaO менее 10% по массе, и основной, если активного CaO более 10%. Химически активным оксидом кальция (CaO) является та фракция оксида кальция, которая при нормальных условиях затвердевания цемента может формировать гидраты силиката кальция или гидраты алюмината кальция. Для оценки этой фракции общее содержание оксида кальция сокращается благодаря фракции, соответствующей карбонату кальция (CaCO_3), на базе измеренного содержания диоксида углерода (CO_2) и фракции, соответствующей сульфату кальция (CaSO_4), на базе измеренного содержания сульфата кальция (SO_3) после вычитания SO_3 , поглощенного щелочами.

В американском стандарте ASTM C 618 золы относят к кислым, если в них сумма кислотных оксидов ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) более 70%, и к основным, если эта сумма меньше 70%, но больше 50%. В России и Беларуси по ГОСТ 25818-91 золы-уноса относят к кислым, если содержание оксида кальция не превышает 10%, и к основным, если оксид кальция содержится в количестве более 10% по массе, в том числе содержание свободного оксида кальция $\text{CaO}_{\text{св}}$ – не более 5%. Классификация, основанная на наличии свободного оксида кальция, признается наиболее оптимальной, поскольку в ней содержится характеристический признак – наличие $\text{CaO}_{\text{св}}$, принципиально отличающий один тип зол от другого.

Расчеты основных характеристик химического состава золошлаковых отходов от сжигания торфа некоторых энергопредприятий республики, выполненные в работах [2; 3], показали, что золошлаковые отходы относятся в основном к кислым и сверхкислым скрыто активным золам. По химическому составу

кислые золы отличаются от других видов побочных продуктов наличием частиц несгоревшего топлива, повышенным содержанием оксидов SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (до 80%), что определяет их кислый и сверхкислый характер. Фазовый состав этих отходов характеризуется значительным содержанием стекла (до 75%). Высокое содержание в золе углерода и оксидов железа снижает ее качество [1]. Переработка и дальнейшее использование таких зол в строительстве требует дополнительных технологических решений.

Ведущими направлениями использования золы-уноса в мире являются: технология бетона и цемента (США); технология бетона и цемента, а также дорожное строительство (ЕС); технология цемента (Япония). Ведущими направлениями использования шлака, кроме бетонной технологии, являются наполнители для общестроительных и дорожных работ. Качество золы-уноса, используемой в бетоне, регламентируется стандартами ASTM C618 (США), EN 450 (ЕС) и национальными стандартами [4].

В России рациональными областями использования золы и шлака ТЭС определены следующие: добавка к цементу, не снижающая активности материала; компонент строительных бетонов и растворов; приготовление специальных бетонов (пензолобетон, газозолобетон и др.); изготовление легких заполнителей для бетонов (пористый материал типа керамзита, аглопорита и т.п.); получение самостоятельного вяжущего материала; для дорожного строительства (наполнитель углеводородных вяжущих веществ, подготовка под покрытия и т.п.); в качестве сырья для химической промышленности (получение из зол Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , U_3O_8 , V и Ge); добавка к глине при изготовлении кирпича, черепицы и т.д. [1; 2].

В Беларуси применение смесей золошлаковых тепловых электростанций для бетонов регламентировано ГОСТ 25592-91 [10], золы-уноса тепловых электростанций для бетонов – ГОСТ 25818-91, при изготовлении шлакобетона (бетона на золошлаковых смесях тепловых электростанций или на топливном пористом шлаке) или бетона на зольном гравии – СТБ 1187-99, в строительных растворах при использовании песка золошлакового и песка из шлаков тепловых электростанций – СТБ 1307-2002.

По мнению довольно большого числа исследователей, на основе зол-уноса и золошлаковых смесей тепловых электростанций могут быть получены эффективные вяжущие вещества, которые в перспективе могут стать альтернативой портландцементу. Аналитический обзор ресурсо- и энергосберегающих технологий строительных материалов на основе минерально-щелочных и геополлимерных вяжущих, представленный в работе Н.А. Ерошкиной, М.О. Коровкина [5], показал перспективность применения низкокальциевой золы в качестве алюмосиликатного компонента бесклинкерных вяжущих. Низкое содержание активного оксида кальция, способствующего твердению и набору прочности материала, компенсируется дополнительным введением оксида кальция путем щелочной активации. Отмечаются преимущества вяжущих щелочной активации, которые заключаются в возможности использования широкого спектра промышленных отходов и отсутствии энергоемкой операции обжига.

Научной основой развития щелочных вяжущих служит концепция геополлимеров. Термин «геополлимер» предложен и впервые использован J. Davidovits в 1976 году. Применение термина «геополлимер» основано на том, что технология геополлимерных вяжущих предусматривает синтез полимерной структуры таких материалов из мономерных силикатных и алюминатных групп. Эти группы способны образовываться при разрушении в щелочных растворах первичной структуры горных пород или промышленных отходов алюмосиликатного состава [5].

Свойства геополлимеров, структура и области их применения зависят от соотношения Si/Al [5]:

- Si/Al = 1 – материалы для изготовления кирпича, керамики и других огнестойких изделий;
- Si/Al = 2 – материалы для изготовления вяжущих, бетона с низким выделением углекислого газа при производстве, а также материалы для капсулирования ядовитых и токсичных отходов;
- Si/Al = 3 – материалы для изготовления оборудования для литейного производства, стекловолокна;
- Si/Al > 3 материалы для изготовления герметизирующих покрытий.

Как установлено В.Д. Глуховским [6], в качестве активаторов твердения шлаков возможно использование шести групп химических соединений: гидроксиды щелочного металла (МОН); слабые соли кислот (M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF); силикаты ($\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_3$); алюминаты ($\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$); алюмосиликаты ($\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2-6)\text{SiO}_2$); сильные соли кислот (M_2SO_4).

Исследования показали, что использование жидкого стекла в качестве щелочного компонента приводит к сокращению сроков схватывания золощелочных вяжущих. Для обеспечения требуемых сроков схватывания в состав золощелочного вяжущего вводят добавки замедлители – молочную сыворотку [7], черный сульфатный щелок [8].

Поскольку использование в качестве щелочного компонента промышленного жидкого стекла из силиката-глыбы затратно, применяют углеродсодержащее жидкое стекло, изготовленное из отхода производства кристаллического кремния, содержащее высокодисперсные углеродистые примеси графита и карборунда [9]. Из других отходов промышленности в научных разработках в качестве щелочных компонентов вяжущих на основе кислых зол нашли применение шламы, образующиеся при производстве алюминия [10].

В последние годы большое количество разработок связано с оптимизацией режимов щелочной, сульфатно-щелочной активации, термоактивации, механического измельчения, сепарации с целью получения высокотехнологичного и высокоактивного вяжущего.

В работе [11] определены режимы, обеспечивающие увеличение гидравлической активности золошлаковых материалов за счет термической активации. Зола или шлак нагревали до температуры 1200...1350 °С за 3...5 мин, выдерживали при указанных температурах в течение 5...10 мин, а затем охлаждали до 800...1000 °С за 1...2 мин и измельчали. Увеличение гидравлической активности зол, содержащих оксиды кальция, кремнезем и глинозем, объяснено [11] фазовыми изменениями в структуре золы. Сделано предположение, что при нагреве золы возможно образование дополнительных гидравлических фаз в виде силикатов и алюмоферритов кальция за счет алюмосиликатного стекла золы, взаимодействующего со свободной известью, входящей в ее состав. Установлено, что количество $\text{CaO}_{\text{св}}$ в исходной золе выше, чем в термоактивированном продукте, полученном на ее основе, что косвенно подтвердило возможность появления в продуктах термоактивации новых гидравлически активных фаз. Об этом свидетельствовало и существенное увеличение прочности термоактивированных продуктов в сравнении с исходным сырьем.

В качестве серьезной альтернативы термическому синтезу, позволяющей существенно снизить энергетические затраты на получение материалов, рассматривается механохимический синтез. Отмечается [12], что методы механической активации твердых материалов и их смесей в измельчительных аппаратах обеспечивают не только активацию, но и реакции синтеза. Механизм действия данных методов объясняется [12] тем, что гидравлически активные минералы золы: CaO , $\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2$, MgO , $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ – находятся внутри капель стекла или покрыты тонким слоем стекла, затрудняющим контакт минералов с водой. Помол золы обеспечивает разрушение пленок из стекла и вскрывает активную часть золы, что позволяет использовать ее в качестве вяжущего материала.

Предложенное авторами работы [13] сочетание механической и сульфатно-щелочной активации, выполненное путем обработки механически активированной кислой золы водными растворами кальцийсодержащих растворов, обеспечило связывание извести кислыми золами. После выдержки в кальцийсодержащих растворах кислотный модуль золы $M_3 = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$ уменьшился от 4,49 до 1,50, а коэффициент качества золы $K = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$ увеличился от 0,62 до 1,21. Добавление к смеси на последующей стадии химической активации сульфата кальция приводит к образованию гидросульфалюминатов кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$, способствующих образованию цементного камня. Таким образом, механически активированные указанным способом золы могут быть использованы как вяжущие материалы, частично заменяющие цемент [14].

Механохимическая обработка позволила получить из кислой золы вяжущее вещество, обеспечивающее при нормальном твердении прочность зольного камня 10,5 МПа, а при твердении в условиях термообработки (179 °С, давления автоклава 10 атм) – 36,5 МПа [15]. Авторы работы [14] к кислой золе гидроудаления влажностью не более 15% (крупностью не более 1 мм) добавляли необходимое количество свежеприготовленной гидратной извести (крупностью не менее 500 мкм) и двуводного гипса. В качестве кислой золы использовался золошлак гидроудаления. Отмечается, что использование свежеприготовленной гидратной извести позволило исключить негативное влияние карбонатов в составе вяжущего, образующихся в результате карбонизации гидроксида кальция. Далее полученную смесь перемешивали и активировали в центробежно-эллиптической мельнице непрерывного действия.

Заключение. Приведенный краткий обзор показывает, что современные тенденции развития исследований и разработок вяжущих направлены на производство и применение преимущественно композиционных их разновидностей с наполнителями из местного природного и техногенного минерального сырья. Решение проблем ресурсо- и энергосбережения в строительстве на основе разработок в области эффективных мало- и бесклинкерных вяжущих, в том числе и с использованием золошлаковых отходов ТЭС, работающих на местных видах топлива, является актуальным направлением исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворкин, Л.И. Эффективные цементно-зольные бетоны / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, Ю.А. Корнейчук. – Ровно, 1998. – 190 с.
2. Ляхевич, Г.Д. Технология и эффективность использования торфяных зол в цементном бетоне / Г.Д. Ляхевич, А.Г. Ляхевич, Д.В. Ортнер // Наука и техника. – № 2. – 2015. – С. 16–23.
3. Критерии качества, классификация и направления утилизации золы от сжигания твердого топлива / И.И. Лиштван [и др.] // Природопользование. – 2014. – Вып. 25. – С. 182–192.
4. Нисневич, М.Л. Утилизация попутных продуктов горения угля в промышленности строительных материалов / М.Л. Нисневич, Г.А. Сиротин // Управление производством и использование продуктов горения угля : обзор 15-го Междунар. симпоз. / М.Л. Нисневич, Г.А. Сиротин // Строительные материалы. – № 9. – 2003. – С. 39–41.

5. Ерошкина, Н.А. Ресурсо- и энергосберегающие технологии строительных материалов на основе минерально-щелочных и геополлимерных вяжущих : учеб. пособие / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 156 с.
6. Глуховский, В.Д. Шлакощелочные цементы и бетоны [Текст] / В.Д. Глуховский, В.А. Пахомов. – Киев : Будівельник, 1978. – 184 с.
7. Вяжущее : пат. 2237631 РФ, МПК7С04В12/04, С04В7/28 / В.В. Русина, Е.Н. Подвольская, А.А. Шихалева, И.В. Журавлева ; заявитель Братский гос. ун-т. – № 2002135498/03 ; заявл. 26.12.02 ; опубл. 10.10.04 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2004.
8. Вяжущее : пат. 2458876 РФ, МПКС04В12/04, С04В 7/28 / В.В. Русина, О.Д. Исакова, А.Э. Красногорова ; заявитель Братский гос. ун-т. – № 2010146205/03 ; заявл. 12.11.10 ; опубл. 20.08.12 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2012.
9. Вяжущее : пат. 2138455 РФ, МПК С04В12/04, С04В7/28 / Ю.П. Карнаухов, В.В. Шарова, Е.Н. Подвольская ; заявитель Братский индустриальный ин-т. – № 2010136285/03 ; заявл. 04.02.98 ; опубл. 27.09.99 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1999.
10. Золоцементное вяжущее (зольтит) на основе кислых зол тепловых электростанций : пат. 2452703 РФ, МПК С 04 В 7/28 / В.С. Прокопец, В.М. Хлестунов ; заявитель В.С. Прокопец, В.М. Хлестунов. – № 2010138241/03 ; заявл. 15.09.10 ; опубл. 10.06.12 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2012.
11. Уфимцев, В.М. Термоактивация вяжущих свойств минеральных расплавов / В.М. Уфимцев, Ф.Л. Капустин // Технологии бетонов. – 2014. – № 1 (90). – С. 19–21.
12. Аввакумов, Е.Г. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья / Е.Г. Аввакумов, А.А. Гусев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т хим. твердого тела и механохимии. – Новосибирск : Академ. изд-во «Гео», 2009. – 155 с.
13. Kaminsky, Yu.D. Mechanochemical initiation of new formations in acidic ash / Yu.D. Kaminsky, T.E. Shoeva, E.N. Timoshenko // Book of Abstracts. III Inter. Conf. «Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies». – Novosibirsk, May 27–30, 2009. – Novosibirsk, 2009. – P. 221.
14. Способ получения вяжущего : пат. № 2519251 РФ, МПК С04В7/28 (2006.01) / Т.Е. Шоева, Ю.Д. Каминский, В.С. Баев ; заявитель и патентообладатель СИБСТРИН (RU). – № 2011140900/03 ; заявл. 07.10.2011 ; опубл. 10.06.2014 // Бюл. – 2014. – № 16. – 4 с.

Поступила 09.06.2016

MODES AND METHODS FOR ACTIVATION ASH WASTE THERMAL POWER PLANTS

L. PARFENOVA, V. BOZYLEV, A. SHVEDOV, M. VYSOTSKAYA

The article highlighted the need for addressing issues related to the disposal of ash and slag waste thermal power plants, working with wood and peat. It is noted that the ash consists of the chemical elements predetermining the possibility of their use in producing binders. Modern approaches to the evaluation of the chemical composition of the ash wastes and determination of their applications are presented. Made a brief overview of the modes and methods of activation of ash waste. Analyzed studies in the field of binding alkaline activation. It is shown that in scientific research as alkaline components binders based on acidic ash are used industrial waste. An effective and low power method of activation of ash and slag waste thermal power plants is method of mechanochemical activation. In is noted the importance of development of efficient small and withoutlinker binders based on ash and slag waste thermal power plants running on local fuels.

Keywords: ash waste, alkaline activation, thermal activation, mechanochemical activation, the activator of hardening, withoutlinker binding.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 681.326

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛОГООТОГНУТОЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ В ЗОНЕ СРЕЗА ИЗГИБАЕМЫХ АРМОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*А.И. ГИЛЬ; канд. техн. наук Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается важный для строительных конструкций вопрос внедрения стеклопластиковой арматуры. Представлены особенности совместной её работы и сцепления с бетоном. Затронуты проблемы использования композитной арматуры в изгибаемых элементах, включая комбинированное армирование, сделаны основные выводы по исследованиям в этой области разных авторов. Аргументированы предпосылки и перспективы применения стеклопластиковой арматуры с пологим отгибом в зоне среза изгибаемых армобетонных элементов. Разработана программа экспериментальных исследований предложенного армирования.

Ключевые слова: армирование, полого отогнутая стеклопластиковая арматура, сцепление с бетоном, предпосылки и перспективы применения.

Введение. В настоящее время в строительной практике и науке активно развивается направление, связанное с применением в бетонных элементах в качестве рабочей арматуры полимерных композитов (англ. *FRPC – fiber reinforced polymer composite*). Этот факт подчёркивается многочисленными работами в области исследования стеклопластиковой арматуры и её применения в армобетонных элементах [1; 2].

Впервые идею использования стеклянного волокна для армирования бетонных элементов сформулировал советский учёный А.К. Буров в 1941 году, что привлекло внимание многих учёных и исследователей в СССР и за рубежом [3]. Наибольший интерес к изучению композитной арматуры появился в середине XX века. Это было связано с расширением области применения железобетонных изделий в сооружениях, которые эксплуатируются в сильно агрессивных средах, где достаточно сложно обеспечить надёжную коррозионную защиту металлической арматуры. Вместе с этим появилась необходимость обеспечения диэлектрических и антимагнитных свойств некоторых конструкций и сооружений. Также немаловажно было учесть ограниченность запасов железных руд, необходимых для производства стали, потребность в которой возрастала.

Благоприятным фактором для внедрения композитных материалов в строительные конструкции стало ускоренное развитие химической промышленности. Соответствующие научные исследования были начаты в технически развитых странах (Германия, Нидерланды, СССР, Япония, США и др.) [4]. Однако в силу высокой стоимости композитной арматуры она не получила коммерческого распространения вплоть до конца 1970-х годов [5].

Возможность применения стеклопластиковой арматуры (СПА) в бетонных элементах обусловлена рядом достоинств по сравнению с металлической арматурой: СПА устойчива к некоторым химическим воздействиям, не подвержена коррозии; является диэлектриком; гораздо легче стальной арматуры; имеет широкий диапазон рабочих температур (от -70 до $+100$ °С); высокая прочность на растяжение, высокая выносливость. Однако массовое внедрение композитной арматуры затруднено из-за ряда факторов: низкий модуль упругости СПА может привести к хрупкой форме разрушения конструкции, что недопустимо по требованиям ТКП EN 1990 Basis of Structural Design; низкая огнестойкость; невозможность изготовления гнутых арматурных изделий в состоянии поставки; невозможность использования сжатой арматуры; высокая стоимость СПА [5; 2].

Следует отметить, что композитную арматуру нельзя рассматривать просто как конкурента металлу, так как сегодня возможно использование комбинированного армирования, что подтверждается обширными исследованиями в этой области [6; 1].

Основные современные направления в исследованиях работы СПА в армобетонных элементах – сцепление СПА различных производителей с бетоном; работа композитных стержней в изгибаемых элементах, включая комбинированное армирование. Особый интерес вызывает возможность применения стеклопластиковой арматуры с пологим отгибом в зоне среза армобетонных элементов, что в перспективе должно обеспечить повышенную прочность и трещиностойкость наклонных сечений.

Применение стеклопластиковой арматуры в изгибаемых элементах. На сегодняшний день выполнять проектирование композитобетонных конструкций возможно только с использованием зарубежных норм проектирования и исключительно под арматуру конкретного производителя [2]. Ввиду отсутствия нормативных документов и стандартов, регламентирующих требования к качеству композитной арматуры, ее механическим свойствам и методам контроля, имеются существенные различия как в технологии изготовления арматуры, так и в геометрических параметрах образующегося при производстве периодического профиля [4]. Например, производится арматура с песчаной посыпкой поверхности или без неё. Очевидным будет тот факт, что при различных параметрах периодического профиля стеклопластиковая арматура различных производителей будет иметь и различные характеристики сцепления с бетоном. Следует отметить, что зацепление выступов периодического профиля или иных микронеровностей на поверхности арматуры с бетоном является решающим фактором, влияющим на совместную работу бетона и арматуры в железобетонном элементе. Стеклопластиковая арматура производится с нерегламентируемыми видами профилей, следовательно, арматурные стержни различных производителей имеют различное сцепление с бетоном, что подтверждается большим количеством исследований в этой области. Проанализировав некоторые работы по изучению особенностей совместной работы и сцеплению стеклопластиковой арматуры с бетоном, можно сделать следующие *общие выводы*:

- наилучшее сцепление с бетоном обеспечивает периодический профиль СПА, образованный навивкой спиральной оплётки стеклотканью;
- на прочность сцепления влияет класс бетона: наилучшее сцепление со стеклопластиковой арматурой у высокопрочных бетонов;
- на прочность сцепления влияет шаг навивки оплёточной нити, а также её угол наклона к оси стержня;
- у стеклопластиковой арматуры разных производителей будет разная прочность сцепления с бетоном, что необходимо учитывать при проектировании конструкций.

В настоящее время всё больше учёных занимаются вопросами работы композитной арматуры в изгибаемых элементах. Такие исследования можно разделить на две группы: бетонные элементы, армированные исключительно СПА [4], и элементы с комбинированным армированием [6; 1].

Анализ указанных научных работ позволил сделать следующие *общие выводы*:

- на начальных этапах исследований стеклопластиковую арматуру целесообразно использовать только с предварительным напряжением;
 - обосновано использование существующих методов расчёта железобетонных изгибаемых конструкций со стальной арматурой применительно к стеклопластиковой арматуре с уточнениями и дополнениями исходя из свойств применяемой стеклопластиковой арматуры. Экспериментальная прочность бетонных элементов с полностью стеклопластиковым армированием, значительно превышающая теоретическую, приводит к необходимости корректировки существующего расчётного аппарата по прочности по нормальным и наклонным сечениям;
 - показано целесообразное использование стеклопластиковой арматуры без предварительного напряжения – получена пластическая форма разрушения опытных образцов с комбинированным армированием, в отличие от хрупкого разрушения балок, армированных только стеклопластиковой арматурой;
 - низкий модуль упругости стеклопластиковой арматуры в самой значительной степени предопределяет её недостаточное использование и невозможность полной замены стальной арматуры.
- Стоит отметить некоторые вопросы в исследованиях, которым не уделяется должного внимания:
- отсутствуют исследования по поведению стеклопластиковой арматуры с отгибами и возможность увеличения прочности наклонных сечений путём установки предварительно напряженной стеклопластиковой арматуры с пологим отгибом в зоне среза;
 - существуют определённые пробелы в исследовании прочности наклонных сечений бетонных элементов со стеклопластиковой арматурой.

Предпосылки применения полого отогнутой стеклопластиковой арматуры в зоне среза армобетонных элементов. Как отмечалось выше, в настоящее время отсутствуют исследования по изучению работы полого отогнутой стеклопластиковой арматуры в зоне среза. Поэтому для определения возможности использования такого вида армирования в изгибаемых армобетонных конструкциях необходимо рассмотрение особенностей применения металлической арматуры с пологим отгибом в зоне среза; кроме того, необходимы расчёты прочности наклонных сечений с таким армированием.

Как известно из практики [7; 8], для повышения трещиностойкости железобетонных элементов используется предварительное напряжение продольной арматуры, расположенной в растянутой зоне конструкции. Данный метод существенно повышает трещиностойкость нормальных сечений, но практически не оказывает влияния на трещиностойкость и прочность наклонных сечений. Наиболее

целесообразным для повышения трещиностойкости таких сечений является обжатие бетона в вертикальном направлении.

К значительному повышению трещиностойкости сечений в зоне среза при существенном снижении количества поперечного армирования приопорных зон, а в ряде случаев проектирование конструкций без поперечного армирования влечет за собой перевод (отгиб) части продольной арматуры из нижней зоны в пролёте в верхнюю на опорах. Это, в свою очередь, создаёт благоприятные условия для экономии бетона и сокращения веса конструкций за счёт придания им целесообразных форм, возникает возможность применения конструкций с ломаным нижним поясом и без уголщения ширины сечения у опор. Несмотря на рациональность и целесообразность применения железобетонных элементов с полого отогнутой предварительно напряжённой стержневой арматурой в зоне среза, сопротивление таких элементов действию изгибающего момента с поперечным армированием изучено недостаточно [7; 8].

Исследованиями работы полого отогнутой металлической арматуры в зоне среза в своё время занимались учёные В.А. Бушков [9], К.В. Сахновский [10], обширные исследования проводились под руководством В.В. Михайлова [11], О.А. Рочняк [12], В.Н. Малиновского [13] и других. Из анализа проведенных исследований можно сделать следующие *общие выводы*:

- на примере балки [9], у которой на участке с наибольшими поперечными силами среза отогнутая арматура была часто и равномерно расположена и достаточно надёжно заанкерена в бетоне, можно убедиться, что такое армирование хорошо обеспечивает работу балки на срез и позволяет повышать нагрузку вплоть до размеров, когда балка разрушается от действия изгибающего момента, а не от поперечных сил среза. Отогнутые стержни повышают сопротивляемость балки поперечному срезу. Опыты показали, что балки, армированные полого отогнутыми стержнями, имеют в 2,6 раза большую сопротивляемость поперечному срезу, чем балки с арматурой из одних только прямых стержней. В случае если стержни арматуры на концах снабжены крюками, последние оказывают значительное сопротивление выдёргиванию стержней арматуры из бетона, препятствуя тем самым развитию наклонных трещин в балке. Прежде всего, это указывает на необходимость обеспечивать надёжное сцепление арматуры с бетоном либо предусматривать конструкцию анкеров для недопущения внезапной потери несущей способности при проскальзывании арматуры в бетоне;

- нормальный наклон отогнутых стержней к оси балки считается равным 45° , так как при этом угле направление отгиба совпадает с направлением главных растягивающих напряжений;

- отгиб стержней должен быть плавным, радиус закругления не менее $10\varnothing$ арматуры отгиба;

- расчёт наклонных сечений с отгибами, по данным экспериментальных данных [12], не может быть выполнен как для элементов без поперечной арматуры, так как существующий расчёт более чем в 2 раза занижает несущую способность наклонных сечений. Значима разработка предложений по оценке сопротивления балок с пологой отогнутой арматурой, проходящей по всему пролёту среза, действию изгиба и поперечной силой. Исследовались балки с пологим отгибом стержневой арматуры. На основании полученных данных об образовании и распределении магистральных трещин разработаны методы расчёта приопорных зон балок с пологой отогнутой арматурой и незначительным количеством поперечных стержней, по условию $q_{sw} < q_{sw, min}$. Особенность сопротивления балок с пологими отгибами стержневой арматуры под углом 12° , идущими по всему пролёту среза, как показали исследования, в том, что пологие отгибы, не предотвращая образование наклонных трещин в средней половине пролёта, замедляют их развитие;

- наиболее важная стадия напряженно-деформированного состояния для расчётов конструкций с пологоотогнутой арматурой – интенсивное включение в работу отгибов после образования наклонных трещин;

- пологий отгиб в стержнях исключает возможность разрушения изгибаемого элемента одновременно с образованием наклонной магистральной трещины;

- наличие пологих отгибов у конструкции позволяет отнести её к классу элементов, имеющих поперечное армирование, и выполнять оценку несущей способности наклонных сечений по поперечной силе по общей зависимости.

В настоящее время в большинстве международных норм по проектированию железобетонных элементов отгибы продольной растянутой арматуры отнесены к одному из видов поперечного армирования и в расчётах учитываются лишь как составляющие проекционных сил, сопротивляющихся срезу, а расчёт элементов конструкций, требующих по расчёту поперечную арматуру, основывается на методе ферменной модели. Так, в немецких нормах DIN-1045-1.12.1998 в случае армирования элементов отгибами, наклоненными под углом α , расчёт производят из условия:

$$V_{sd} \leq V_{Rd, sy} = (1,2 + \cot \alpha) \sin \alpha \frac{A_{sw,2}}{S_{w,2}} f_{yw,2} \cdot z + V_{crd}, \quad (1)$$

где $V_{Rd,sv}$ – расчётная поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой; $A_{sv,2}$ – площадь поперечного армирования; $f_{yw,2}$ – расчётное значение предела текучести для поперечной арматуры; z – плечо внутренней пары сил для элемента с постоянной высотой, соответствующее изгибающему моменту в рассматриваемом элементе.

В случае если установлены отгибы под углом, предельная поперечная сила, воспринимаемая сжатыми бетонными подкосами, определяется по следующей формуле:

$$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot v' \cdot f_{cd} \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}, \quad (2)$$

где b_w – наименьшая ширина сечения между растянутым и сжатым поясами; v' – коэффициент уменьшения предела прочности на сжатие для бетона с трещинами среза; f_{cd} – расчетное значение предела прочности бетона при осевом сжатии; θ – угол наклона бетона подкосов при достижении в них сжимающих напряжений $\sigma_{cd} = v' \cdot f_{cd}$, определяемый по формуле:

$$\cot \theta = \frac{1,2}{1 - \frac{0,072 b_w \cdot z \cdot v' \cdot f_{cd}}{V_{Sd}}}. \quad (3)$$

В действующих нормах Республики Беларусь ТКП EN 1992-1-1-2009 для элементов с наклонной поперечной арматурой сопротивление срезу является наименьшим значением из вычисленных по формулам (4) и (5), которые практически идентичны формулам (1) и (2) из немецких норм DIN-1045-1.12.1998:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sv}}{S} \cdot z \cdot f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha, \quad (4)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}, \quad (5)$$

где α_{cw} – коэффициент, учитывающий уровень напряжения в сжатом поясе.

Также стоит отметить, что по ТКП EN 1992-1-1-2009 для элементов с наклонными (отогнутыми) напрягающими элементами в растянутом поясе необходимо устанавливать продольную арматуру, воспринимающую продольное растягивающее усилие от действия поперечной силы.

Ряд положительных моментов, полученных из вышеизложенных исследований, даёт возможность предположить, что использование композитной арматуры с пологим отгибом в зоне среза является возможным. Однако для обоснования целесообразности применения такой арматуры необходимо проведение обширных научных исследований в этой области.

Предполагаемая программа экспериментально-теоретических исследований. Для определения несущей способности наклонных сечений изгибаемых армобетонных элементов с предварительно напряженной полого отогнутой стеклопластиковой арматурой в зоне среза планируется решить следующие задачи:

- получить новые экспериментальные данные по прочности и трещиностойкости наклонных сечений изгибаемых элементов с пологим отгибом СПА в зоне среза;
- разработать методику расчёта прочности наклонных сечений изгибаемых элементов, основанную на диаграммах деформирования бетона и СПА, учитывающую напряженно-деформированное состояние элемента;
- изучить влияние различных факторов на напряженно-деформированное состояние элементов, армированных стеклопластиковой арматурой с пологим отгибом в зоне среза.

Для проведения экспериментальных исследований предполагается изготовить опытные образцы балок с предварительно напряженной СПА в зоне среза, а также эталонные образцы с обычным армированием для сопоставления результатов.

Экспериментальные балки будут испытаны по однопролетной балочной схеме с шарнирным опиранием. Конструкцию планируется нагружать при помощи гидравлического пресса и системы траверс, распределяющей нагрузку от пресса на 2 составляющие. В экспериментальных исследованиях балок на каждом этапе нагружения будут проводиться измерения: относительных деформаций основной и полого отогнутой арматуры; ширины раскрытия наклонных трещин; прогиба в середине пролета; относительных деформаций бетона на боковых гранях зоны среза элементов по направлениям главных сжимающих и растягивающих напряжений.

Заключение. По результатам выполненных исследований можно сделать вывод о том, что применение предварительно напряженной стеклопластиковой арматуры с пологим отгибом в зоне среза изгибаемых армобетонных элементов является перспективным направлением, однако требует качественных экспериментальных и теоретических исследований. Для обработки будущих результатов выбран метод сопоставления прочности и трещиностойкости наклонных сечений эталонных образцов с экспериментальными данными опытных образцов.

Конечная цель проводимых исследований – определение целесообразности использования предполагаемого армирования. В случае получения возможных (ожидаемых) положительных результатов

в дальнейшем планируется разработка программы с большим объемом испытаний для элементов, армированных полого отогнутой стеклопластиковой арматуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тур, В.В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В.В. Тур, В.В. Малыха // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
2. Лешкевич, О.Н. Перспективы применения композитной арматуры [Электронный ресурс] / О.Н. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона : третий междунар. симп., Белгород, 9–11 нояб. 2011 г. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/664098>. – Дата доступа: 26.03.2015.
3. Буров, А.К. Синтетические волокнистые анизотропные структуры / А.К. Буров, Г.Д. Андриевская. – М., 1952.
4. Фролов, Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н.П. Фролов. – М. : Стройиздат, 1980. – 104 с.
5. Василенко, А.И. Применения неметаллической арматуры в Республике Беларусь / А.И. Василенко // Наука – 2012 : сб. науч. ст. : в 2 ч. Ч. 2 / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : Г.М. Третьяков (отв. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2012. – С. 125–127.
6. Польской, П.П. Композитные материалы – как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений / П.П. Польской, Д.Р. Маилян // Инженерный вестн. Дона : электрон. журнал. – Ростов н/Д, 2012. – № 4.
7. Малиновский, В.Н. Сопротивление предварительно напряжённых железобетонных балок из высокопрочного бетона с отогнутой стержневой арматурой при изгибе с поперечной силой : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.Н. Малиновский. – Л., 1988.
8. Шалобыта, Н.Н. Сопротивление срезу железобетонных балок с пологим отгибом части продольной предварительно напряженной арматуры [Электронный ресурс] / Н.Н. Шалобыта, В.Н. Малиновский, Т.П. Шалобыта. – Брест : БрГТУ, 2010. – Режим доступа: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/6560/1/57.pdf>. – Дата доступа: 07.04.2015.
9. Бушков, В.А. Железобетонные конструкции / В.А. Бушков : в 2-х ч. – М. : Гос. изд. строительной лит., 1941. – Ч. 2 : Расчёт и конструирование элементов железобетонных сооружений.
10. Сахновский, К.В. Железобетонные конструкции / К.В. Сахновский. – 8-е изд. перераб.; М. : Госстройиздат, 1959.
11. Михайлов, В.В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции с проволоочной и прядевой арматурой. Технология изготовления / В.В. Михайлов, А.А. Фоломеев. – М. : Стройиздат, 1971.
12. Рочняк, О.А. Сопротивление поперечному изгибу железобетонных элементов с продольной и отогнутой арматурой (при наличии и отсутствии сцепления с бетоном) : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / О.А. Рочняк. – М. : НИИЖБ, 1994.
13. Малиновский, В.Н. Напряженно-деформируемое состояние железобетонных балок с отогнутой предварительно напряжённой арматурой / В.Н. Малиновский, О.А. Рочняк // Иссл. по стр. механике и стр. констр. : техн. сб. тр. – Челябинск : Политехн. ин-т, 1983. – С. 81–84.

Поступила 15.12.2015

PERSPECTIVE OF APPLICATION FIBER REINFORCED POLYMER WITH AN ACCLIVOUS BEND IN ZONE CUT BENDING CONCRETE ELEMENTS

A. HIL, Y. LAZOUSKI

In this paper, we consider the important issue of introducing a fiberglass reinforcement for building structures. The features of teamwork and cohesion with concrete are presented. The issues of the use of composite reinforcement in flexural members, including the combined reinforcement are considered; the main findings of studies conducted by different authors are shown. We present conditions and prospects of a fiberglass reinforcement with an acclivous bend in zone cut bending concrete elements. The program of experimental studies of the proposed reinforcement is developed.

Keywords: *reinforcement, bent hollow fiberglass reinforcement, adhesion on concrete, prerequisites and application prospects.*

УДК 624.046.5/624.014

**НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ
СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

канд. техн. наук В.В. НАДОЛЬСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлена разработка единой методики для определения и описания неопределенностей моделей сопротивления при анализе надежности стальных конструкции. Все модели создаются с осознанными упрощениями, принятыми для удобства использования, и упущениями из-за недостатка информации, знаний, что вносит систематические отклонения. При этом вероятностная природа величин, оказывающих влияние на экспериментальное значение, вносит случайные отклонения. Анализируются неопределенности модели. Показаны факторы, влияющие на неопределенность модели сопротивления. Делается вывод о необходимости учета неопределенности модели и улучшения модели сопротивления.

Ключевые слова: *сопротивление, расчетные модели сопротивления, погрешность, неопределенность, изменчивость, случайные отклонения, неточность, систематические отклонения, вероятностная модель.*

Введение. Научные и инженерные сообщества заинтересованы в наиболее точном прогнозировании поведения проектируемых и оценке существующих зданий, поэтому большое внимание уделяется развитию и совершенствованию расчетных моделей. Эти модели являются эвристическими инструментами, которые позволяют с определенной точностью создавать и изучать конструкции. В строительной отрасли используемые модели выполняют важную роль, так как допущенные при их применении ошибки могут привести к неприятным последствиям экономического, экологического и социального характера. Широко известно, что неопределенности (изменчивость (случайные отклонения) и неточность (систематические отклонения)) моделей сопротивления и эффектов воздействий играют важную роль при анализе надежности конструкции. Имеющиеся знания о неопределенностях моделей и об их статистических характеристиках в своем большинстве основаны на интуитивных суждениях, а попытки их установления на основе экспериментальных данных сопровождаются несогласованностью используемых методик. Поэтому единая методология протоколирования и оценки неопределенностей моделей является особенно актуальной.

Исследования эффектов воздействий и их комбинаций, как правило, направлены не только на разработку адекватных детерминированных и вероятностных моделей, но и на развитие системы частных коэффициентов посредством анализа надежности. В свою очередь, большинство исследований сопротивления конструкций сосредоточены только на улучшении модели сопротивления. При этом не уделяется должного внимания анализу статистических различий между экспериментальными (измеренными) и теоретическими (прогнозируемыми) значениями сопротивления, игнорируются развитие вероятностных моделей для оценки сопротивления и анализ надежности конструкции.

В представляемой работе описана общая методика вычисления неопределенностей моделей при помощи сравнения экспериментальных и теоретических значений и ее описания для применения в расчетах надежности. Акцент сделан на описании неопределенностей моделей сопротивления для предельных состояний несущей способности. Состояния эксплуатационной пригодности, которые являются одинаково важными, как и состояния несущей способности, требуют отдельного изучения. В рамках данной работы рассматриваются только расчетные модели теоретического сопротивления конструктивного элемента или узла, представленные функцией сопротивления $f()$, устанавливающей физическую или эмпирическую зависимость между теоретическим значением сопротивления (выходной величиной R) и соответствующими значениями независимых переменных (входными величинами X_i), информация о которых доступна:

$$R = f(X_1, X_2, \dots, X_N). \quad (1)$$

Общие сведения о неопределенности модели. Все модели создаются с идеализациями (осознанные упрощения модели, принятые для удобства использования, или из-за недостатка информации, знаний) и абстрактным представлением исследуемой особенности (свойства) реального объекта, при этом ряд других особенностей игнорируется, что приводит к систематическим отклонениям в теоретических значениях. При этом нахождение абсолютно точной модели некоторого явления – задача неразрешимая по причине вероятностной природы как самого явления, так и величин, оказывающих влияние на это явление, что, в свою очередь, вносит случайные отклонения в теоретические значения. Точность может варьироваться от низкой степени (в гуманитарных науках) до очень высокой (в технических науках). Повышение точности моделей, используемых в строительстве, как правило, приводит к их усложнению, что может сопровождаться грубыми ошибками при применении таких моделей.

Государственный стандарт СТБ ISO 2394 [1] определяет неопределенность модели (model uncertainty) как базисную переменную, связанную с точностью физической или статистической моделей¹.

Согласно JCSS [2] неопределенность модели учитывает случайные эффекты, которыми пренебрегают в моделях, и упрощения математических зависимостей².

Факторы, влияющие на неопределенность модели сопротивления. При оценке неопределенности расчетной модели следует учитывать факторы (табл. 1), оказывающие влияние на экспериментальное значение сопротивления (результат испытаний) и теоретическое (результат модели) [3–6]. Значимость факторов, влияющих на экспериментальное и теоретическое значения сопротивления, зависит непосредственно от анализируемого конструктивного элемента и вида отказа.

Таблица 1 – Факторы, влияющие на экспериментальное и теоретическое значения сопротивления

Значения	Факторы	Примеры
Экспериментальное	Критерий отказа	В ряде случаев затруднительно сформулировать и проконтролировать качественную и количественную характеристику отказа (предельные нагрузки, деформации, прогибы)
	Измерения экспериментального значения сопротивления (выходной величиной R)	Погрешность измерительных приборов, неучтенные факторы, влияющие на точность измерений
	Схема испытаний	Наличие сил трения, идеализация условий раскрепления и условия закрепления
	Создание нагрузки	Способы передачи, скорость приложения сил
	Испытываемый образец	Изменчивость, связанная с изготовлением определенного образца, изменчивость свойств образца в сечении и по длине элемента, наличие локальных дефектов
Теоретическое	Осознанные упрощения модели	Идеализированная диаграмма деформирования стали; упрочнение стали; сварочные напряжения; геометрические несовершенства, такие как отсутствие вертикальности, прямолинейности
	Измерения базисных переменных (входных величин X_i) в процессе эксперимента	Погрешность измерительных приборов
	Неопределенность входной величины X_i	Прочность стали, модуль упругости и другие параметры оцениваются по образцу
	Упущения в модели	В силу ограниченности знаний об образце и некоторых его свойствах
	Вычислительные упрощения при использовании численных методов решения, таких как метод конечных элементов	Дискретность, тип конечных элементов, граничные условия

Учет неопределенности экспериментального значения. Неопределенность экспериментального значения сопротивления зависит от типа испытания и навыков персонала. При использовании хорошо продуманных, проработанных или апробированных методов испытаний неопределенность экспериментального значения обычно незначительная. Поэтому важно использовать стандартные процедуры испытания и измерения для минимизации неопределенности и получения достоверных и сопоставимых результатов. Хорошо откалиброванные методы испытания обеспечивают достаточно точные результаты, при этом, как правило, среднее значение неопределенности экспериментального значения сопротивления (ϵ) примерно равно 1 (то есть $\mu_\epsilon \approx 1$). Следовательно, $\mu_0 \approx \mu_{\text{observed}}$, где μ_0 – реальное значение математического ожидания неопределенности модели, μ_{observed} – математическое ожидание неопределенности модели по результатам обработки экспериментальных значений. Влияние неопределенности экспериментального значения может быть выражено через коэффициенты вариации:

$$V_0 \approx \frac{V_{\text{observed}}}{V_\epsilon} - 1 \quad (2)$$

где V_0 – коэффициент вариации неопределенности модели; V_{observed} – коэффициент вариации, полученный из сравнения экспериментального и теоретического значения сопротивления; V_ϵ – коэффициент вариации неопределенности экспериментального значения.

¹ A basic variable related to the accuracy of physical or statistical models.

² The model uncertainties account for: random effects that are neglected in the models; simplifications in the mathematical relations.

Для большинства методик испытаний V_e составляет до 0,05, тогда при V_{observed} больше 0,1 неопределенность экспериментального значения оказывается малозначимой, ею можно пренебречь. Поэтому неопределенность экспериментального значения далее не рассматривается.

Во многих случаях более важно установить взаимосвязь между реальной работой конструкции и испытываемым образцом (идеализация реальной конструкции), чем определить неопределенность экспериментального значения, вносимую процедурой испытания. Неопределенность испытываемого образца может зависеть от разных факторов: граничных условий (опоры, неразрезные элементы); условий нагружения (способ передачи, длительность нагрузки и история приложения); изготовления и монтажа; масштабного эффекта; температурно-влажностных условий и т.д. Некоторые из особенностей условий эксплуатации конструкции могут быть учтены посредством частных коэффициентов. При этом нужно помнить о том, чтобы эти условия были учтены только единожды.

Анализ неопределенности модели. Статистические свойства неопределенности модели, насколько возможно, должны быть получены на основании экспериментального значения сопротивления.

В общем случае статистические параметры неопределенности модели определяют эмпирическим путем, сопоставляя экспериментальные и теоретические значения.

В соответствии с СТБ ISO 2394 [1] неопределенность модели может быть выражена через одну или несколько случайных переменных u_i . В общем случае экспериментальное значение Y' можно записать как

$$R_e = f(X_1 \dots X_n, \theta_1 \dots \theta_m). \quad (3)$$

Чаще всего необходимая информация для такой записи недоступна, поэтому наибольшее распространение получили записи в виде [1]:

$$R_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \theta(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \cdot R_t(\mathbf{X}); \quad (4)$$

$$R_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \theta(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) + R_t(\mathbf{X}), \quad (5)$$

где R_e – экспериментальное значение сопротивления; \mathbf{X} – вектор переменных X_i , входящих в модель; \mathbf{Y} – вектор неучтенных переменных в модели, влияющих на сопротивление конструкции; θ – случайная переменная с некоторым законом распределения вероятностей, характеризующая неопределенность моделирования; R_t – теоретическое значение сопротивления.

Самый распространенный способ представления неопределенности модели – это мультипликативная зависимость, формула (4), так как модели сопротивления обычно имеют мультипликативный характер, и для базисных переменных используется логнормальное распределение. Кроме того, мультипликативную запись корректнее применять в случае, когда разница между экспериментальным и теоретическим значениями пропорциональна значению исследуемой величины, что встречается в исследованиях сопротивления конструкции.

Аддитивная зависимость неопределенности модели может рассматриваться как альтернатива мультипликативной зависимости, формула (5). При аддитивной зависимости доминирующее влияние на неопределенность модели оказывают большие значения сопротивления, поэтому информация, полученная при испытании образцов с меньшим сопротивлением, может быть утеряна. Аддитивный формат обычно применяется для определения неопределенности геометрических характеристик.

Модель может быть уточнена, соответственно, уменьшена неопределенность модели с помощью многопараметрической регрессии. Однако в этом случае модели утрачивают сугубо физический смысл и приобретают оттенок эмпирической зависимости, что затрудняет понимание сущности процесса. При возникновении такой ситуации предпочтительным является уточнение физической модели.

При исследовании неопределенности теоретической модели на основании базы экспериментальных данных следует выполнить следующие шаги:

- определение области применения модели сопротивления и результатов испытаний;
- составление базы экспериментальных данных;
- качественный анализ базы экспериментальных данных;
- вычисление неопределенности модели;
- статистическая оценка неопределенности модели, анализ вероятностной модели;
- анализ надежности и изучение необходимости дальнейших исследований модели.

Составление базы экспериментальных данных. Основой для оценки неопределенности расчетных моделей является база экспериментальных данных, в которую должны входить все величины, необходимые для повторения испытания и для определения теоретических значений сопротивления.

К основным параметрам базы экспериментальных данных относятся:

- количество испытаний;
- значения переменных X и Y ;

- методика испытания;
- оборудование для испытания и его тарировка;
- обеспечение граничных условий;
- достоверность результатов испытаний;
- наличие информации, указывающей на отклонения результатов испытаний.

Количество результатов испытаний обычно ограничено с точки зрения статистической обработки и не является в полной мере репрезентативным. Но даже ограниченное количество результатов испытания предпочтительнее интуитивной оценки неопределенности модели.

При формировании базы экспериментальных данных необходимо отразить как можно подробнее информацию об условиях проведения испытаний и значениях $\{X; Y\}$. При этом необходимо четко определить переменные X . Например, когда на сопротивление стального элемента влияет предел прочности, это значение должно быть включено непосредственно в модель сопротивления, а не предел текучести, увеличенный посредством некоторого коэффициента. В общем случае следует делать разграничение между «прямыми» и «относительными» переменными X . Примером первого является прочность материала, второго – условная гибкость элемента и т.д. Примерами переменных Y являются сварочные напряжения, начальные несовершенства и т.д. Кроме переменных X и Y полезно определить условия проведения испытаний, которые могут влиять на экспериментальное значение сопротивления. Например, абсолютная влажность воздуха почти не влияет на прочность стали, но может влиять на точность измерительных приборов.

По возможности, необходимо отразить степень достоверности информации, что особенно важно, когда база экспериментальных данных скомпилирована из различных источников, следовательно, дальнейшая проверка достоверности этой информации обычно проблематична.

Следует учитывать, что экспериментальные значения сопротивления обычно получены на основании исследований конкретной модели сопротивления. Поэтому определенная степень осторожности должна быть предпринята при анализе взаимодействия нескольких видов отказа или при отсутствии явно доминирующего механизма разрушения.

В процессе пополнения базы экспериментальных данных рекомендуется производить обработку и анализ результатов после каждого внесения данных из одного источника с целью оценки степени достоверности результатов и своевременного анализа выбросов, искажающих результаты измерений.

При объединении результатов испытаний рекомендуется соблюдать следующие правила:

- проверка результатов испытаний должна быть выполнена из разных источников;
- должен быть отражен критерий отказа (необходимо соблюдать осторожность, когда критериями отказа являются деформации, прогибы или ширина раскрытия трещин);
- следует обеспечить соответствие между результатами испытаний и видом отказа, предсказанным теоретической моделью (например, по графику зависимости деформаций от напряжения можно определить, является вид отказа хрупким или пластическим);
- должна быть установлена дифференциация между различными видами отказа (например, для изгибаемого элемента могут быть характерны различные формы потери устойчивости и взаимосвязь общей и местной потерь устойчивости).

Следует придерживаться следующих принципов при вычислении неопределенности модели:

- неопределенность теоретического значения должна быть снижена посредством применения измеренных значений входных величин X (например, следует использовать фактическую (измеренную) прочность материала, а не ее характеристическое значение);
- при отсутствии возможности установления значений X и Y непосредственно из эксперимента: значения некоторых переменных допускается принимать на основе предыдущего опыта (модуль упругости стали) или на основании известных зависимостей через измеренные переменные (прочность стали через ее твердость). Однако в последнем случае появляется дополнительная неопределенность;
- отдельные переменные, не учтенные в модели (переменные Y), должны быть включены в процедуру оценки, так как они могут влиять на неопределенность модели.

Статистическая оценка результатов вычисления неопределенности модели. В дополнение к рассмотренной выше качественной оценке результатов исследования неопределенности модели должен быть выполнен анализ с помощью следующих инструментов математической статистики:

- *репрезентативность выборки.* Репрезентативная выборка – это такая выборка, в которой все основные признаки генеральной совокупности, из которой извлечена данная выборка, представлены приблизительно в той же пропорции или с той же частотой, с которой данный признак выступает в этой генеральной совокупности. Критерий репрезентативности выборки может быть получен с помощью рассмотрения диапазона распределения базисных переменных из базы данных экспериментов в виде гистограммы. Обеспечение репрезентативности осложняется тем, что экспериментальные исследования сопротивления конструкции обычно акцентированы на исследовании влияния отдельных переменных. При

определении генеральной совокупности необходимо учитывать ограничения, наложенные на диапазон базисных переменных (например, ограничения размеров профилей);

- *корреляция между неопределенностью модели и переменными*. В общем случае неопределенность модели зависит от базисных переменных X . Влияние отдельных переменных может быть определено с помощью регрессионного анализа. Диаграмма рассеивания результатов неопределенности модели от базисной переменной позволяет определить тренд зависимости и разброс относительно тренда. Корреляция между неопределенностью модели θ и переменными X или Y количественно оценивается с помощью коэффициентов корреляции $r\{\theta, X\}$ или $r\{\theta, Y\}$. Представление неопределенности модели как случайной переменной целесообразно и корректно в случае, когда корреляция между θ и $\{X, Y\}$ является статистически незначительной, т.е. неопределенность модели не связана с систематическим изменением переменных X и Y ;

- *выбросы*. Выбросы могут возникнуть из-за ошибок при проведении испытания, оформлении отчетов и вычислений, из-за нестандартных условий испытания, вида отказа за пределами области рассматриваемой модели, значительного отличия образца (например, результаты испытания балки с большим поперечным сечением не должны находиться в одной выборке с балками обычных размеров, так как размер балки может оказывать существенное влияние на неопределенность модели) и т.д. Наличие выбросов может сильно влиять на значения статистических показателей, поэтому нужно уделять особое внимание определению выбросов. Для определения выбросов можно использовать различные статистические методики. Выбросами не следует полностью пренебрегать – они могут представлять истинные крайние значения результатов;

- *выборочные статистические моменты*. Окончательная база данных должна быть использована для статистической оценки параметров распределения. Оценки методом моментов не требуют установления закона распределения, в то время как оценки с помощью метода максимального правдоподобия, полученные для гипотетического распределения, считаются статистически более эффективными. Наибольшее внимание уделяется определению коэффициента вариации (V_θ), который определяет точность модели и оказывает непосредственное влияние на показатели надежности, и среднего значения (μ_θ), которое отражает систематическое различие между экспериментальным и теоретическим значениями. На практике модель должна включать ограниченную степень консервативной систематической ошибки ($\mu_\theta > 1$);

- *статистическая неопределенность*. Статистическую неопределенность параметров распределения необходимо рассматривать в случае малой выборки, т.е. когда число испытаний меньше 10...30 (в зависимости от дисперсии неопределенности модели). В таких случаях полезным является Байесовский подход, особенно когда так называемая предварительная информация может быть получена на основе анализа неопределенности похожей модели или на основе экспертного заключения;

- *вероятностное описание неопределенности модели*. Особое место занимает вопрос установления закона распределения. Обычно закон распределения устанавливается на основе доступных экспериментальных данных. Часто наличие экспериментальных данных ограничено, что не позволяет получить статистически достоверные результаты. Поэтому при назначении закона распределения используют теоретические предположения. Обычно вероятностные модели для неопределенности модели предварительно выбирают из принятой практики моделирования надежности. В нормативных документах СТБ ISO 2394 [1] и JCSS [2] и ТКП EN 1990 [7] приведены рекомендации по выбору закона распределения базисных переменных. Для описания неопределенности модели рекомендовано логарифмически нормальное распределение или распределение Вейбулла. При первом приближении можно использовать нормальное распределение в качестве консервативного подхода к определению нижнего квантиля неопределенности модели для функции сопротивления. Двухпараметрическое логнормальное распределение более объективно, но несколько неконсервативно. Если доступны соответствующие данные, с помощью которых можно было бы сделать удовлетворительную оценку отклонения неопределенности модели (коэффициента асимметрии, сдвига), более объективные варианты представляют произвольное или трехпараметрическое логнормальное распределение.

Необходимость учета неопределенности модели и улучшения модели сопротивления. Довольно часто возникает вопрос о степени точности модели. Возможно, наиболее достоверно можно установить необходимость дальнейшего совершенствования модели на основе анализа надежности конструкции с последующими анализами коэффициентов чувствительности. Предлагается следующая классификация влияния неопределенности модели, основанная на коэффициенте чувствительности в соответствии с методом надежности 1-го порядка.

1. *Несущественное влияние* – коэффициент чувствительности в соответствии с методом теории надежности 1-го порядка меньше 0,3. В этом случае неопределенность модели сопротивления не влияет на оценку надежности конструкции, поэтому ей можно пренебречь или включить ее влияние в другую базисную переменную. Моделирование физического процесса можно считать достаточно точным, и даль-

нейшее совершенствование модели неэффективно. Примером этого случая является модель сопротивления изгибу стального сечения, не чувствительного к потере местной устойчивости.

2. *Значительное влияние* – коэффициент чувствительности находится в пределах от 0,3 до 0,7. Влияние неопределенности модели на оценку надежности конструкции довольно значительное, и следует вводить отдельный частный коэффициент. Учитывая важность неопределенности модели, она должна быть учтена как отдельная базисная переменная. В качестве примера можно привести сопротивление изгибу стального элемента при проверках устойчивости.

3. *Доминирующее влияние* – коэффициент чувствительности превышает значения 0,7. Неопределенность модели сопротивления оказывает доминирующее влияние на оценку надежности конструкции, поэтому следует уделить особое внимание анализу вероятностной модели неопределенности моделирования сопротивления. При этом полезными бывают рассмотрение модели для конкретных случаев проектирования, ограничение области применения и т.д. Моделирование физического процесса является приближительным, поэтому необходимо дальнейшее совершенствование моделей сопротивления.

Неопределенность модели сопротивления можно уменьшить одним из следующих способов [7]:

- корректировкой расчетной модели путем учета дополнительных параметров, которые не принимались в расчет;
- путем разделения генеральной совокупности результатов испытаний на соответствующие подгруппы, для которых влияние таких дополнительных параметров можно считать постоянным.

Учет неопределенности модели при определении частных коэффициентов для моделей сопротивления стальных конструкций. Расчетное значение сопротивления, выраженное непосредственно через его характеристическое значение R_k , можно определить с использованием интегрального частного коэффициента γ_M :

$$R_d = R_k / \gamma_M. \quad (6)$$

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

$$1 / \gamma_M = b_R \cdot \exp(-\alpha_R \beta \cdot V_R), \quad (7)$$

где

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

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

Далее, в формуле (7) α_R – значения коэффициентов чувствительности согласно методу надежности 1-го порядка [7]; β – целое значение индекса надежности [7]; V_R – коэффициент вариации значения сопротивления (в случае независимых величин его можно принять равным $(V_z^2 + \dots + \dots)^{0,5}$, где V_z, V_{f_y}, V_{θ} – соответственно коэффициенты вариации геометрических характеристик сечения, свойств материала, неопределенности расчетной модели).

Заключение. Создание абсолютно точной модели некоторого процесса является задачей неразрешимой по ряду причин:

- вероятностной природы как самого процесса, так и величин, оказывающих влияния на этот процесс;
- осознанных упрощений модели для простоты использования;
- неполноты математической модели;
- недостатка информации;
- субъективных личностных аспектов.

Неопределенности расчетных моделей при проверках предельных состояний в рамках метода частных коэффициентов учитываются посредством системы частных коэффициентов. Поэтому определение неопределенностей расчетных моделей и разработка их вероятностных моделей является актуальной и важной задачей процесса нормирования значений частных коэффициентов. При моделировании новых конструктивных решений или при других обстоятельствах, когда возможность неопределенностей

увеличивается, следует повышать значения частных коэффициентов. Изменять значения данных коэффициентов в неблагоприятную сторону допускается только в тех случаях, когда на это есть убедительные обоснования. При этом важно сохранять баланс между консервативным и новаторским подходами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надежность строительных конструкций. Общие принципы : СТБ ISO 2394-2007. – Введ. 01.07.08. – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2007. – 69 с
2. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. – 2001. – Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>. – Date of access: 15.01.2012.
3. Nadolski, V. Uncertainty in resistance models for steel members / V. Nadolski, M. Sykora // Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava. – 2014. – No. 2, Vol. 14, Civil Engineering Series. – 2014. – P. 119–130.
4. MacLeod, I. Modern Structural Analysis: Modelling Process and Guidance / I. MacLeod // Thomas Telford, Reston, VA, 2005. – 206 p.
5. Søkora, M. Assessment of Uncertainties in Mechanical Models / M. Søkora, M. Holicky // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 378. – P. 13–18.
6. Weisberg, M. Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World / M. Weisberg // Oxford University Press, Oxford, UK, 2013. – 224 p.
7. Еврокод. Основы проектирования конструкций : ТКП EN 1990-2011. – Введ. 01.07.12. – Минск : Госстандарт Респ. Беларусь, 2012. – 70 с.

Поступила 22.05.2016

UNCERTAINTY OF THE DESIGN RESISTANCE MODELS OF STEEL STRUCTURES

V. NADOLSKI

The development of a uniform methodology for the identification and description of uncertainties resistance models for reliability analysis of steel structures is presented. All models are created with the deliberate simplifications adopted for ease of use, and omissions due to lack of information, knowledge that makes systematic deviations. At the same time probabilistic nature of the variables that influence the experimental value introduces random deviations. The model uncertainty is analysed. Factors affecting the uncertainty of the resistance model are shown. The conclusion about the need to consider model uncertainty and improve the resistance of the model are made.

Keywords: *resistance, the calculated model resistance, error, uncertainty, variability, random deviation, inaccuracy, of bias, probabilistic model.*

УДК 624.012+519.673

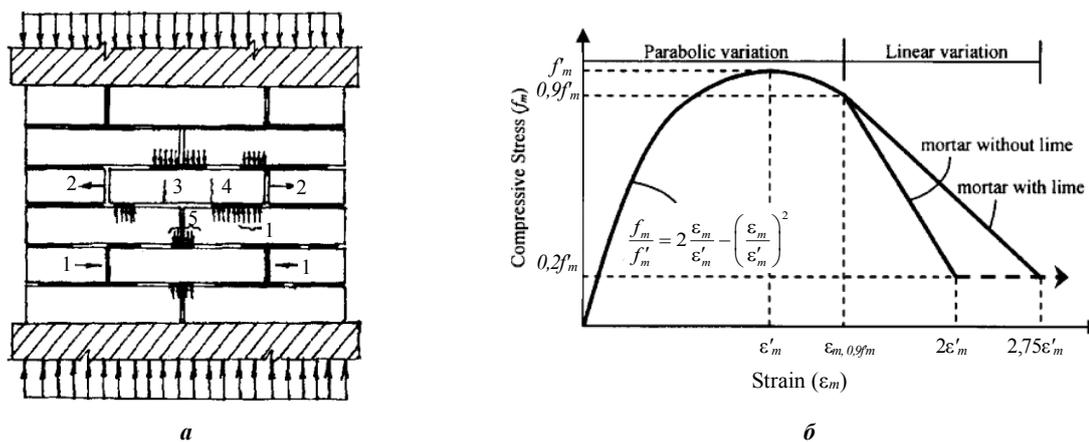
МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ СЖАТЫХ КАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО СЕЧЕНИЯМ, НОРМАЛЬНЫМ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ

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

Представлен деформационный метод расчета прочности элементов по нормальным к продольной оси сечениям. Общие положения расчета каменных элементов, в том числе с армированием, согласно СТБ EN 1996-1-1-2008 (Еврокод б) соответствуют условиям применения такого метода расчета прочности по нормальным сечениям. Данная методика позволяет достаточно точно отразить работу нормальных сечений и описать их напряженно-деформированное состояние на любом этапе приложения нагрузки. Вместе с тем деформационный метод расчета нормальных сечений каменных элементов пока не нашел применения в практике проектирования. Сравнение результатов экспериментальных данных с вычисленными деформационным методом значениями разрушающих нагрузок каменных элементов без армирования, с продольным и сетчатым армированием показало, что средневзвешенное значение вычисленной разницы составляет 7%.

Ключевые слова: деформационный метод, прочность каменных элементов, алгоритм расчета, сжатые и внецентренно сжатые каменные элементы, диаграмма деформирования.

Введение. Каменная кладка является композиционным анизотропным строительным материалом. Она состоит из двух компонентов – собственно кладочных элементов, расположенных в определенном порядке, и кладочного раствора, которые даже при центральном сжатии подвержены одновременно различным напряженным состояниям, а именно: сжатию, растяжению, смятию, срезу. Работа под нагрузкой и напряженное состояние данной гетерогенной среды будет зависеть от прочностных и деформационных свойств составляющих кладку компонентов. В масштабе реальных конструкций кладку можно рассматривать с определенными допущениями как однородный материал, пренебрегая резко отличающимися свойствами камня и раствора. Поведение такой идеализированной гомогенной среды можно описать диаграммами деформирования (усредненными напряжениями и деформациями), характер которых будет зависеть от направления нагрузок, вида напряженного состояния и т.п. Типичная диаграмма для кладки, предложенная в [1; 2], показана на рисунке 1.



а – сложное напряженное состояние камня и раствора:
1 – сжатие, 2 – растяжение, 3 – изгиб, 4 – срез, 5 – местное сжатие;
б – типичная диаграмма деформирования для кладки

Рисунок 1. – Сложное напряженное состояние камня в кладке, типичная диаграмма деформирования

Первые научные работы, посвященные прочности кладок, появились с возникновением мощного прессового оборудования в начале XX века и связаны с именами А.К. Говве, И.И. Ильина, В.А. Гастева, Н.А. Попова, В.П. Некрасова, Л.И. Онищика, В.А. Камейко, Л.Д. Проскуракова, Г.П. Передерия, И.П. Прокофьева и других. Во второй половине XX века в Советском Союзе была создана научная школа, специалистами разработаны нормы СНиП II-22-81 и Пособие к нему по проектированию

каменных

и армокаменных конструкций, содержащие указания по методам расчета и конструирования.

Сегодня изменились технология производства камня, представления о напряженном состоянии кладки, появились другие виды армирования, требуется уточнение существующих методик проектирования и расчета, возможность их реализации в прикладных вычислительных комплексах [3].

Деформационная модель расчета. В строительную практику Республики Беларусь внедряются европейские стандарты. Общими положениями расчета по несущей способности неармированной каменной кладки при действии вертикальной нагрузки, а также армированных элементов при изгибе, изгибе

с внецентренным и центральным сжатием в СТБ EN 1996-1-1-2008 (Еврокод 6) [4] являются:

- сохранение плоскостности поперечных сечений (гипотеза Бернулли);
- прочность при растяжении каменной кладки равна нулю;
- арматура деформируется как прилегающая каменная кладка;
- максимальные относительные деформации каменной кладки при сжимающей нагрузке и стали при растяжении принимаются соответственно строительному материалу;
- диаграмму деформирования каменной кладки принимают параболической, параболически-линейной или прямоугольной;
- предельное значение относительной деформации каменной кладки для крайней наиболее сжатой грани сечения при внецентренном сжатии составляет максимально $\varepsilon_{mi} = -0,0035$ для камней группы 1 и $\varepsilon_{mi} = -0,002$ для камней групп 2, 3 и 4.

Отмеченные выше основные расчетные положения соответствуют условиям применения деформационной модели. Данная модель расчета по нормальным сечениям железобетонных элементов, подвергающихся воздействию продольных сил и изгибающих моментов, доказала свою состоятельность и нашла отражение в нормативных документах [5; 6]. Сущность методики расчета заключается в учете помимо уравнений равновесия внутренних и внешних сил, решением которых ограничивался метод предельных усилий, условий деформирования расчетного сечения в виде гипотезы плоских сечений (уравнений совместности деформаций и физических зависимостей, связывающих напряжения и деформации бетона и арматуры в виде диаграмм деформирования). Исходные уравнения преобразуются и решаются шагово-итерационными методами, условно разбивая исходное сечение на отдельные участки малой площади (метод численного интегрирования), что легко воплощается в жизнь с помощью ЭВМ. В Полоцком государственном университете профессором Д.Н. Лазовским и доцентом Д.О. Глуховым разработана программа «Beta» для расчета прочности и трещиностойкости нормальных сечений железобетонных элементов, реализующая деформационную модель. Имеется возможность находить параметры напряженно-деформированного состояния, ширину раскрытия трещин в нормальном сечении любой сложной формы с произвольным армированием на любом этапе нагружения. В то же время при проектировании каменных (армокаменных) элементов деформационная модель пока не используется. В [7] изложен алгоритм нахождения прочности сечений в виде блок-схемы.

Деформационная модель напряженно-деформированного состояния нормального сечения железобетонного элемента представляет собой систему 3-х нелинейных уравнений интегрального вида (система уравнений (1)).

$$\begin{cases} M_y = -\iint_C \sigma(x, y)(y - y_o) dx dy + N(y_{oe} - y_o); \\ M_x = -\iint_C \sigma(x, y)(x - x_o) dx dy + N(x_{oe} - x_o); \\ N = \iint_C \sigma(x, y) dx dy; \\ \varepsilon(x, y) = \varepsilon_z - \frac{1}{r_x}(x - x_o) - \frac{1}{r_y}(y - y_o) + q, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma(x, y)$ – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры; $\varepsilon(x, y)$ – продольные деформации элементарной площадки бетона или арматуры; x_o и y_o – расстояние от центра изгиба сечения, нейтральной точки, до оси x и y соответственно; x_{oe} и y_{oe} – расстояние от места приложения продольного усилия до оси x и y соответственно; N – продольная сила от действия внешней нагрузки;

$1/r_x$ и $1/r_y$ – кривизна продольной оси элемента относительно оси x и y соответственно; q – остаточные деформации от различных предшествующих процессов деформирования (предварительное напряжение, эксплуатация и др.).

Сама модель лишена предположений относительно способа расчета напряженно-деформированного состояния. Из деформационной модели следует формулировка задачи расчета, как задачи поиска такого расположения плоскости распределения деформаций в 3-х мерном пространстве $\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z\}$, которое бы соответствовало действию на элементы вектора нагрузки, заданного в трехмерном пространстве нагрузок $F = \{M_x, M_y, N\}$. Таким образом, решение задачи ищем в 3-х мерном пространстве.

Нелинейность модели вытекает, в первую очередь, из-за ее дискретности. Дискретные элементы модели – узлы квадратурных правил претерпевают скачкообразные изменения в момент попадания их в зону распространения трещины. Это обусловлено тем, что диаграммы деформирования, применяемые при нелинейных расчетах железобетонных конструкций, имеют предельную деформацию на растяжение, по достижении которой диаграмма резко обрывается в ноль. Данный эффект сказывается не только в зоне образования трещины в скачкообразных перепадах поверхности решения, но и на краях области допустимых решений.

Нелинейность поверхности решения расчетной системы уравнений проявляется наиболее ярко в зоне образования трещины. В природе таких эффектов нет, поскольку образование трещины сопровождается резким скачком кривизны и продолжающимся ростом моментов. Иными словами, момент не может уменьшаться. Математическая модель же допускает расчет моментов для значений кривизны, попадающих в интервал скачка. Данный факт заключается в том, что в связи с резким скачкообразным смещением нейтральной оси в сторону сжатой зоны элемента, вызванным «обрывом» в ноль узлов квадратур элементарных площадок растянутого бетона, момент падает.

Для сжатых элементов, для которых центрально приложенная сжимающая сила с эксцентриситетом, равным расстоянию от начального центра тяжести до текущего положения нейтральной оси, создает противоположно направленный изгибающий момент. В этом случае заданному моменту будет соответствовать меньшая кривизна, эффект падения расчетного момента может полностью исчезать.

Когда разрушение элемента происходит сразу с образованием трещины – одна из сложных ситуаций для численного расчета. При этом труднопроходимый участок трещинообразования непосредственно граничит с областью, в которой локализовано решение задачи. Возможны также ситуации, когда после образования трещины модель не дает расчетные значения усилий, даже равные значениям усилий до трещинообразования. Такая ситуация свойственна недостаточно армированным элементам. К этой группе моделей относится и модель каменного элемента.

С целью учета численных особенностей модели нами были применены модификации базового алгоритма поиска решения методом простой итерации (формула (2)):

$$\begin{cases} N = \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} \left(\varepsilon_z - \frac{1}{r_x} x - \frac{1}{r_y} y \right); \\ M_x = -\sum \frac{\sigma}{\varepsilon} \left(\varepsilon_z - \frac{1}{r_x} x - \frac{1}{r_y} y \right) x; \\ M_y = -\sum \frac{\sigma}{\varepsilon} \left(\varepsilon_z - \frac{1}{r_x} x - \frac{1}{r_y} y \right) y. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_z = \frac{N + \frac{1}{r_x} \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} x + \frac{1}{r_y} \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} y}{\sum \frac{\sigma}{\varepsilon}}; \\ \frac{1}{r_x} = \frac{M_x + \varepsilon_z \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} x - \frac{1}{r_y} \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} xy}{\sum \frac{\sigma}{\varepsilon} x^2}; \\ \frac{1}{r_y} = \frac{M_y + \varepsilon_z \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} y - \frac{1}{r_x} \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} xy}{\sum \frac{\sigma}{\varepsilon} y^2}. \end{cases} \quad (2)$$

1. Применено правило ложного положения.
2. Применена координатная релаксация по формуле (3):

$$\frac{1}{r_x} = \frac{1}{r_{xold}} + \alpha \left[\frac{M_x + \varepsilon_z \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} x - \frac{1}{r_y} \sum \frac{\sigma}{\varepsilon} xy}{\sum \frac{\sigma}{\varepsilon} x^2} - \frac{1}{r_{xold}} \right]. \quad (3)$$

3. Применен малый ограничитель шага итерации.

4. За критерий остановки итерационного процесса принята малость невязок в уравнениях расчетной модели (менее 1%).

5. Установлено предельное число итераций, равное 150.

Количественная оценка применимости деформационного метода расчета по нормальным к продольной оси сечениям каменных элементов, в том числе с армированием, выполнялась путем сопоставления рассчитанной прочности с прочностью по данным испытаний А.Г. Фигаровым столбов сечением $0,4 \times 0,4$ м высотой $\approx 1,25$ м из камней азербайджанских месторождений [8]. Испытания А.Г. Фигарова выбраны для сравнения в связи с достаточно обширной программой, включающей в себя:

- центральное сжатие неармированной кладки на растворах разной прочности;
- внецентренное сжатие неармированной кладки на растворах разной прочности;
- центральное сжатие кладки с сетчатым армированием с процентами от 0,27 до 1,09 и размерами ячеек от 30 до 120 мм;
- внецентренное сжатие кладки с одиночным продольным армированием из 2 стержней $\varnothing 11$ мм с пределом текучести 320 МПа и 7 стержней $\varnothing 12$ мм с пределом текучести 283 МПа.

Характеристика испытанных каменных элементов и отдельные результаты представлены в таблице 1. Плоскостность сечений в целом сохранялась, что подтверждено замером деформаций (рис. 2) в плоскости действия момента на разных этапах нагружения [8].

Таблица 1 – Характеристика серий испытанных элементов

Серия испытанных образцов	Дозировка раствора (цемент : известь : песок)	Предел прочности раствора, R_2^* , кг/см ²	Процент армирования продольной арматурой, μ , %	Процент армирования сетчатой арматурой, μ , %	Средний предел прочности кладки (пиковая точка), $f(R_u)$, МПа	Начальный модуль упругости кладки, E_0 , МПа
C1	1:0,3:4	55,6...75,9	–	–	4,15	4002
C2	1:0,7:6,5	19,5...35,3	–	–	4,24	2609
C3	1:12:16	7,5...12,5	–	–	3,85	2161
C4	1:0,3:4	36,6...55,8	0,119 ($2\varnothing 11$ мм)	–	4,15	4002
C5	1:0,3:4	38,5...59,7	0,495 ($7\varnothing 12$ мм)	–	4,15	4002
C6	1:0,3:4	81	–	0,27	4,56	5199
C7	1:0,3:4	72	–	0,656	4,58	3855
C8	1:0,3:4	42	–	1,09	4,81	3071

* – предел прочности камня во всех сериях принят постоянным $R_1 = 48$ кг/см².

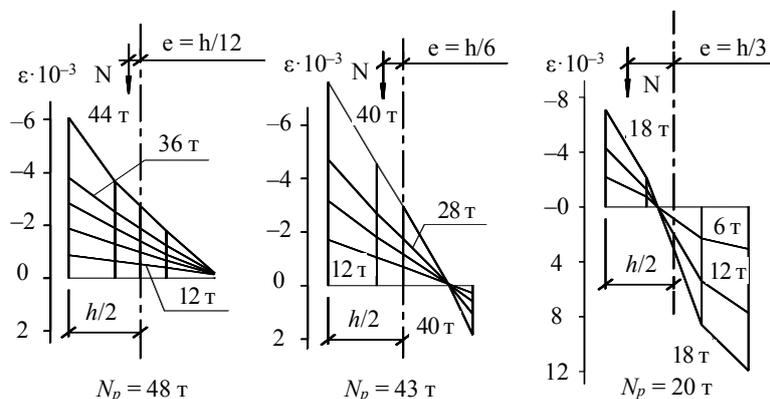


Рисунок 2. – Деформации поперечного сечения образцов кладки $0,4 \times 0,4 \times 1,25$ м при внецентренном сжатии

Закон деформирования каменной кладки задавался в программе «ВЕТА 4.0» в режиме «Произвольные диаграммы» (рис. 3).

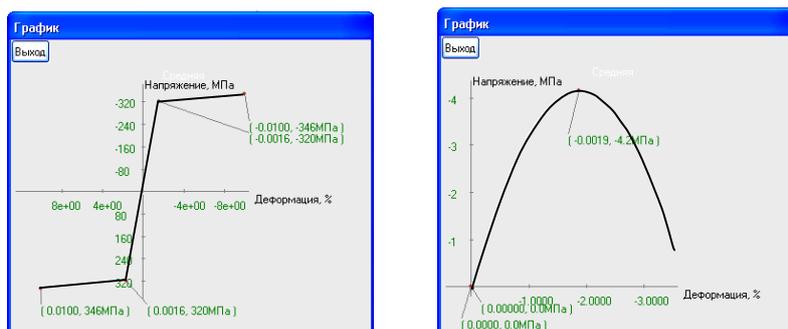


Рисунок 3. – Деформирование арматуры с пределом текучести 320 МПа и каменной кладки на растворе с объемной дозировкой (цемент : известь : песок) 1 : 0,3 : 4

Относительные деформации на уровне нагрузки $N/N_u = 0,9$ определялись по зависимости, рекомендованной автором в [8] $\epsilon_{0,9} = (3 - \sqrt[16]{R_2}) \cdot 10^{-3}$ (R_2 в кг/см²), деформации в пиковой точке $\epsilon_{0,9} \cdot 1,1$.

Предельные деформации кладки при сжатии приняты по [4] $\epsilon_{mi} = -0,0035$, арматуры при растяжении $\epsilon_s = -0,01$.

В результате проведенного расчета получены:

- прочность неармированных сечений $N_{sd,calc}$ (табл. 2);
- прочность армированных сечений $N_{sd,calc}$ (табл. 2);
- характер распределения напряжений по сечению. Пример распределения напряжений в армированном элементе (рис. 4).

Таблица 2 – Сравнение экспериментальной и расчетной разрушающих нагрузок

Серия	Эксцентриситет	N_{exp}^* , кН	$N_{sd,calc}^{**}$, кН	$\frac{N_{sd,calc}}{N_{exp}}$	Среднее $\frac{N_{sd,calc}}{N_{exp}}$
C1	0	667	667	1,00	0,93
	h/12	592	519	0,88	
	h/6	512	412	0,80	
C2	h/3	276	207	0,75	
	0	685	679	0,99	
	h/12	577	494	0,86	
C3	h/6	446	401	0,90	
	h/3	217	202	0,93	
	0	602	617	1,02	
C4	h/12	512	445	0,87	
	h/6	425	361	0,85	
	h/3	191	182	0,95	
C5	h/6	523	485	0,93	
	h/2	238	278	1,17	
	h	124	131	1,06	
C6	h/6	488	445	0,91	
	h/2	336	276	0,82	
	h	206	175	0,85	
C7	0	694	628	0,91	
C8	0	697	699	1,00	
C9	0	731	724	0,99	

* – средняя разрушающая нагрузка по трем образцам;
 ** – расчетная разрушающая нагрузка по Beta.

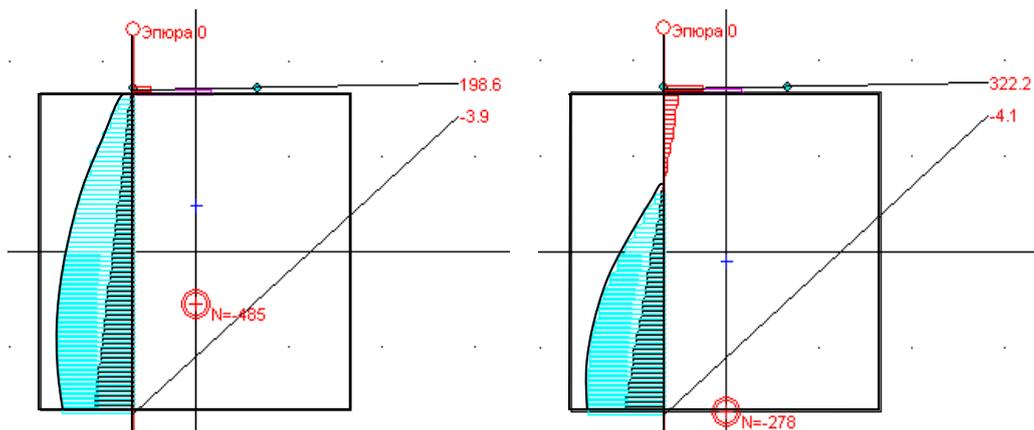


Рисунок 4. – Распределение напряжений в сечении каменного элемента с продольным армированием

Заключение. Общие положения расчета по прочности неармированной каменной кладки при действии вертикальной нагрузки, а также армированных элементов при изгибе, изгибе с внецентренным и центральным сжатием в Еврокод 6 [4] полностью соответствуют условиям применения деформационного метода расчета прочности элементов по нормальным к продольной оси сечениям. Данная методика отвечает фактической работе кладки под нагрузкой, описываемой диаграммами деформирования.

Получена хорошая сходимость результатов расчета по предложенной методике, апробированной в программном комплексе Beta 4.0. Средневзвешенное значение отклонения опытных и рассчитанных разрушающих усилий составляет по всем сериям испытаний до 7%. Благодаря возможности использования в расчетах полных диаграмм деформирования можно достаточно точно описать напряженно-деформированное состояние сечений элементов в процессе работы на любых этапах нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stress-Strain behavior of concrete block masonry prism under compression / Mohamad Gihad [et al.] // 15th International Brick and Block Masonry Conference, Florianópolis – Brazil [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/2012/4C5.pdf>.
2. Kaushik, Hemant B. Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression / Hemant B. Kaushik, Durgesh C. Rai, Sudhir K. Jain // Journal of materials in civil engineering, ASCE [Электронный ресурс]. – 2007. – Vol. 19, September. – Режим доступа: http://www.iitk.ac.in/nicee/RP/2007_Masonry_Properties_ASCE.pdf.
3. Соколов, Б.С. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций : науч. изд. / Б.С. Соколов, А.Б. Антаков. – М. : Изд-во АСВ, 2010. – 104 с.
4. Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций : СТБ EN 1996-1-1-2008. – Введ. 31.09.2008. – Минск : Госстандарт, 2009. – Ч. 1-1 : Общие правила для армированных и неармированных каменных конструкций. – 86 с.
5. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Введ. 20.06.02. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2003. – 130 с.
6. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций : ТКП EN 1992-1-1-2010. – Введ. 10.12.2009. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2010. – Ч. 1-1 : Общие правила и правила для зданий. – 191 с.
7. Хаткевич, А.М. Метод расчета прочности нормальных к продольной оси сечений конструкций из каменной кладки с учетом диаграмм деформирования / А.М. Хаткевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 8. – С. 45–53.
8. Каменная кладка из пильных известняков / С.В. Поляков [и др.]. – Кишинев: Изд-во «Картя Молдовеняскэ», 1973. – 345 с.

Поступила 06.06.2016

APPLICATION OF THE DEFORMATION METHOD OF CALCULATION OF DURABILITY OF NORMAL SECTIONS TO THE LONGITUDINAL AXIS OF SECTIONS OF COMPRESSED STONE ELEMENTS

D. HLUKHAU, A. KHATKEVICH

The deformation method of calculating the strength of elements in the normal to the longitudinal axis of the cross sections is presented. According to (STB) EN 1996-1-1-2008 (Eurocode 6), the general regulations of calculation of stone elements, including reinforcement stone elements, correspond to the conditions of application of the deformation method of calculation of durability of normal sections. This method allows to reflect more faithfully the work of normal sections and to describe their tensely deformed condition (TDC) at any stage of the application of load. At the same time the deformation method of calculation of normal sections of stone elements has not yet found application in design. Comparison of the results of experimental data with the calculated (with the help of the deformation method) values of breaking loads of stone elements without reinforcing, with longitudinal and mesh reinforcing has been executed. The average value of the calculated difference is 7%.

Keywords: *deformation method, the strength of the stone elements, the calculation algorithm, compressed and eccentrically compressed stone elements, deformation diagram.*

УДК 691.328.43

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАТИВНОСТИ
СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ
ПРОИЗВОДСТВА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ****САДИН ЭБРАИМ ЯГУБ; канд. техн. наук, доц. А.А. ХОТЬКО
(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

Проанализированы преимущества и недостатки композитной арматуры при армировании железобетонных конструкций. Отражены результаты собственных экспериментальных исследований деформативности сцепления с бетоном стеклопластиковой арматуры, производителей Республики Беларусь. Выполнен анализ влияния диаметра и длины контакта с бетоном стеклопластиковых арматурных стержней различных производителей на деформативность сцепления с бетоном. В результате эксперимента выявлено, что арматура производства ООО «Бизнес-Континент» и ООО «Стройкомпозит» обладает большей деформативностью сцепления с бетоном, чем арматура производства ЧП «Минпласт». Деформативность арматуры снижалась также при увеличении заделки арматуры в бетоне. Определены моменты начала сдвига арматурных стержней относительно бетона двумя разными методами. Представлены предложения по расчетной оценке анкеровки в бетоне стеклопластиковой арматуры.

Ключевые слова: *стеклопластиковая арматура, композитобетонные конструкции, сцепление, анкеровка, деформации.*

Существующие на сегодняшний день потребности в экономии материальных ресурсов ставят задачу поиска и применения в строительстве новых конструктивных решений. Одним из таких решений, позволяющих экономить стальную арматуру, является использование в качестве армирования композитной арматуры в предварительно напряжённых изгибаемых несущих композитобетонных конструкциях. Композитная арматура является диэлектриком, немагнитна, имеет низкую теплопроводность, обладает радиопрозрачностью, поэтому применять её целесообразно, прежде всего, в тех областях и конструкциях, в которых композитная арматура имеет экономическое и конструктивное преимущество перед стальной арматурой. Композитная арматура производится в виде стержней со спиральной рельефностью, реже с песчаной посыпкой, практически любой длины на основе стеклянных (АСК – стеклопластиковая арматура), базальтовых (АБК – базальтопластиковая арматура) волокон или на основе других компонентов (карбон, арамид), пропитанных химически стойким полимером [1–4].

К недостаткам, или особенностям композитной арматуры, которые не позволяют повсеместно выполнить прямую замену металлической арматуры на композитную, относятся следующие свойства: низкий модуль упругости; более низкая огнестойкость изделий, армированных композитной арматурой; низкая прочность при поперечных нагрузках; сложность изготовления гнутых арматурных изделий; сложность при изготовлении предварительно напряжённых конструкций; отсутствие необходимых экспериментальных данных [1–5].

Производимая в Беларуси и импортируемая в республику композитная арматура имеет большой разброс в физико-механических характеристиках, исходных материалах (сырье) и геометрических характеристиках. Ввиду отсутствия нормативных документов, регламентирующих требования к композитной арматуре, имеются различия как в технологии изготовления арматуры, так и в геометрических параметрах образующегося при производстве периодического профиля. Производится арматура с песчаной посыпкой поверхности и без нее. Периодический профиль композитной арматуры производится при ее изготовлении путем спиральной обвивки сырой заготовки стержня крученой нитью из стеклянного волокна, пропитанной связующим. При обмотке нить натянута с определенным усилием, благодаря чему она вдавливаются в тело стержня. За счет этого арматура получает дополнительное уплотнение и периодический профиль. При этом является очевидным тот факт, что, обладая различными параметрами периодического профиля, композитная арматура различных производителей будет иметь и различные характеристики сцепления с бетоном. Связь обвивки из крученой нити и тела стержня различна у разных производителей и также оказывает влияние на совместную работу бетона и арматуры. Известны случаи, когда при испытании на сцепление обвивка из крученой нити сползала с тела арматурного стержня, что становилось причиной преждевременного нарушения сцепления арматуры с бетоном [2; 3].

С целью разработки предложений по расчету анкеровки в бетоне композитной стержневой арматуры производителей Республики Беларусь выполнены исследования влияния диаметра и длины заделки арматурных стержней на деформативность сцепления с бетоном композитной арматуры различных производителей в изгибаемых элементах.

Исследования выполняли для композитной арматуры трех различных производителей Республики Беларусь: ЧП «Минпласт», Минск; ОАО «Стройкомполит, Гомель; ООО «Научно-производственная компания «Бизнес-Континент», Брест), предусматривали сравнительные испытания балок на свободных опорах, армированных стержнями стеклопластиковой арматуры диаметром от 4 до 10 мм указанных производителей с различными длинами контакта арматуры с бетоном ($10d$, $20d$ и $30d$). Поперечное сечение опытных образцов принято прямоугольным с размерами сторон $b \times h = 150 \times 300$ мм. Длина образцов $L = 1500$ мм.

Опытная балка в середине разделена на две части. Эффективная высота бетона (высота сжатой зоны бетона) зафиксирована путем установки стальных уголков в пределах высоты $x_{eff} = 80$ мм с шарниром между ними (рис. 1). В нижней части в пределах зоны чистого изгиба (в пределах 600 мм) бетон отсутствует. При этом в одной части заделки ($l_{зад}$) композитная арматура находилась в контакте с бетоном, а в другой части (150 мм и $300 - l_{зад}$) сцепление искусственно исключалось (стержень помещался в изолирующую трубку). Поперечная и сжатая арматура отсутствует. Величина относительного пролета среза принята постоянной и равной 450 мм.

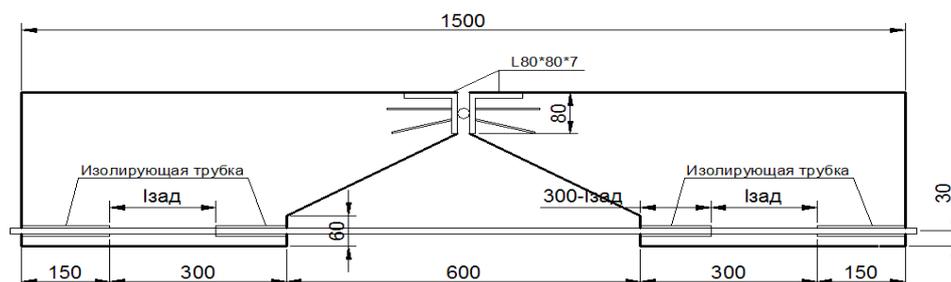


Рисунок 1. – Геометрические характеристики опытных балок

Опытные образцы-балки изготавливали в разборной деревянной опалубке с формованием в горизонтальном положении (для арматуры). Проектируемый класс бетона С30/37. Испытания проводились на гидравлическом прессе с расстоянием между двумя точками приложения нагрузки на балку 500 мм, расположенными симметрично относительно центра пролета. Расстояние от опоры до места приложения нагрузки принято 450 мм.

Для изучения влияния диаметра и длины контакта с бетоном стеклопластиковых арматурных стержней на деформативность сцепления с бетоном композитной арматуры различных производителей контролировали характер разрушения опытных образцов и максимальную нагрузку, при которой сцепление стеклопластиковой арматуры с бетоном не нарушено (P_{max}), а также перемещения незагруженного (свободного) (y_1) и загруженного (y_0) концов арматурного стержня относительно наружных граней бетона на обоих концах образца (рис. 2).



Рисунок 2. – Внешний вид опытного образца в процессе испытания

Величину перемещения незагруженного конца $s(n)$ арматурного стержня определяли как измеренные величины деформаций незагруженного конца арматуры с помощью индикаторов часового типа ИЧ-1 (ИЧ-3). Величину перемещения загруженного конца арматуры $s(0)$ определяли как разницу между деформациями, установленными по показаниям индикаторов часового типа, закрепленных на

струбцине, на загруженном конце арматуры в непосредственной близости от торца образца, и вычисленными деформациями участка арматуры от точки закрепления струбцины до начала заделки стержня в бетон, соответствующими данному этапу нагружения.

В результате эксперимента выявлено, что арматура производства ООО «Бизнес-Континент» и ООО «Стройкомпозит» обладает большей деформативностью сцепления с бетоном, чем арматура производства ЧП «Минпласт». При этом для всех образцов перемещения незагруженного конца арматуры относительно бетона с увеличением нагрузки увеличивались примерно по линейной зависимости до уровня, соответствующего $\approx 0,7$ от предельной нагрузки, соответствующей нарушению сцепления стержней с бетоном. После достижения этой нагрузки наблюдалось увеличение приращений перемещений при увеличении нагрузки. Предельная величина перемещений незагруженного конца стержней относительно бетона в момент разрушения балок для образцов с арматурой производства ЧП «Минпласт» варьировалась в зависимости от диаметра стержней и от длины контакта с бетоном от 0,02 до 0,22 мм. Данная величина для образцов с арматурой производства ООО «Стройкомпозит» варьировалась в зависимости от диаметра стержней и от длины контакта с бетоном от 0,07 до 4,0 мм, а для образцов производства ООО «Бизнес-Континент» – от 0,01 до 2,75 мм. Причем образцам с большей величиной контакта арматуры с бетоном соответствовали меньшие значения перемещений незагруженного конца стержня относительно бетона. Для арматуры производства ООО «Бизнес-Континент» и ООО «Стройкомпозит» это уменьшение происходило более интенсивно. Влияние диаметра арматуры на деформативность ее сцепления с бетоном сказывалось незначительно, хотя установлено, что наибольшие перемещения незагруженного конца арматуры для стержней соответствовали образцам с большим диаметром арматуры.

Перемещения загруженного конца арматуры относительно бетона для всех образцов увеличивались более равномерно, чем незагруженного конца, что вероятно связано с тем, что на данную величину большое влияние оказывали собственные деформации растяжения стеклопластиковых стержней. Предельная величина перемещений загруженного конца стержней относительно бетона в момент разрушения балок для образцов с арматурой производства ЧП «Минпласт» варьировалась от 0,33 до 2,42 мм. Данная величина для образцов с арматурой производства ООО «Стройкомпозит» варьировалась от 0,84 до 5,7 мм, а для образцов производства ООО «Бизнес-Континент» – от 0,94 до 3,21 мм.

Сравнительные сводные графики зависимости предельных перемещений загруженного и незагруженного концов арматуры от длины контакта стержней с бетоном для арматуры разных производителей и разных диаметров показаны на рисунках 3 и 4.

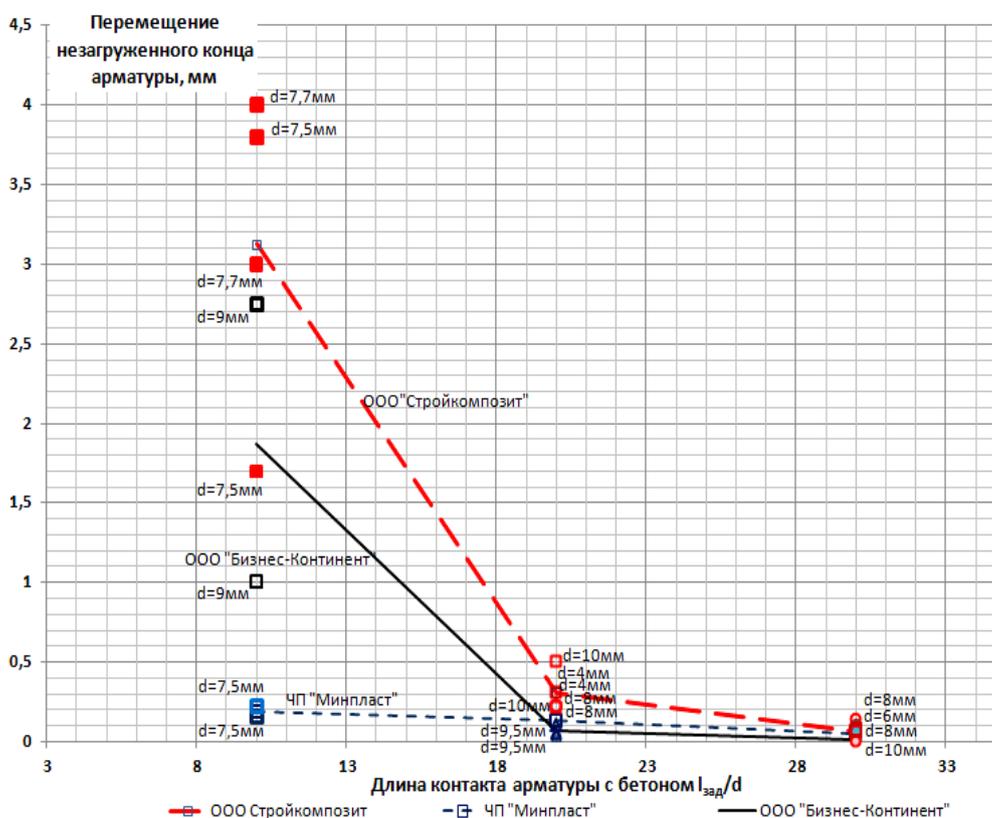


Рисунок 3. – Зависимость предельных перемещений незагруженного конца арматуры от длины контакта стержней с бетоном

ЧП «Минпласт». Следует отметить, что момент начала сдвига арматуры относительно бетона, установленный исходя из критерия перемещения незагруженного конца арматуры на величину 0,2 мм, оказался определяющим, так как момент, соответствующий резкому непропорциональному увеличению приращению перемещений незагруженного конца стержня наступал несколько позже для всех образцов.

Длину анкеровки стеклопластиковой арматуры в бетоне предлагается определять по методике СНБ 5.03.01-02 [8], предварительно определив требуемые значения коэффициента η_3 для стеклопластиковой арматуры в формуле для расчета среднего значения предельного напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном. Для этого, используя полученные опытные значения максимальных напряжений на загруженном конце арматуры, для всех образцов можно определить требуемые значения коэффициента η_3 :

$$\eta_3 = \frac{\sigma_{s, max}}{4 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \cdot l_{зад} / d}$$

где $\sigma_{s, max}$ – максимальное напряжение в арматуре; f_{ctd} – сопротивление бетона растяжению; η_1 – коэффициент, учитывающий влияние условий сцепления и положение стержней при бетонировании; η_2 – коэффициент, учитывающий влияние диаметра арматуры: при $d \leq 32$ мм $\eta_2 = 1,0$; $l_{зад}$ – длина заделки стержня в бетон; d – диаметр арматурного стержня.

В целях обеспечения заделки арматурных стержней в бетоне с надлежащей безопасностью предлагается принимать наибольшее значение относительной длины анкеровки из полученных по предлагаемым рекомендациям. Поэтому следует определять длину анкеровки арматурных стержней с использованием в расчетах коэффициента η_3 , вычисляемого по напряжениям в арматуре, соответствующим перемещениям незагруженного конца арматуры на 0,2 мм (рис. 5).

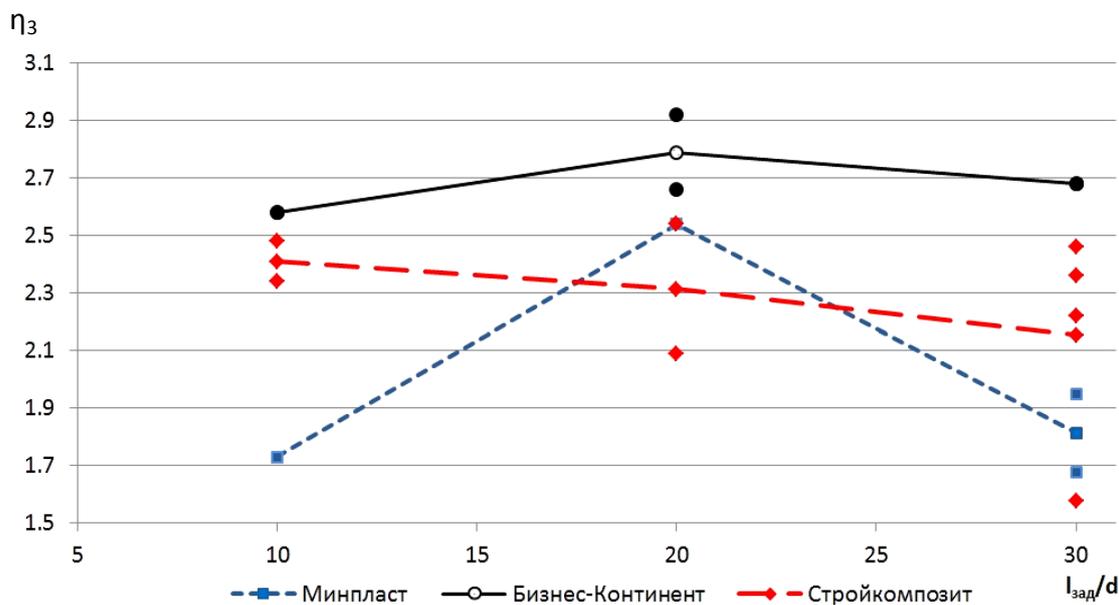


Рисунок 5. – Опытные значения коэффициента η_3 для образцов со стеклопластиковой арматурой, соответствующие перемещениям незагруженного конца арматуры на 0,2 мм

Средние значения коэффициента η_3 , определенные по опытным данным, соответствующим перемещениям незагруженного конца арматуры на 0,2 мм, составили: 2,23 – для арматуры производства ООО «Стройкомпозит»; 2,71 – для арматуры производства ООО «Бизнес-Континент»; 1,98 – для арматуры производства ЧП «Минпласт».

Рекомендуемые значения коэффициента η_3 для определения расчетного значения длины анкеровки следует принимать с учетом статистического анализа с доверительной вероятностью 0,95:

- $\eta_3 = 1,99$ – для арматуры производства ООО «Стройкомпозит»;
- $\eta_3 = 2,56$ – для арматуры производства ООО «Бизнес-Континент»;
- $\eta_3 = 1,59$ – для арматуры производства ЧП «Минпласт».

Заключение. В результате экспериментальных исследований установлены требуемые значения коэффициента η_3 , используемого в формуле для определения среднего значения предельного напряжения сцепления по контакту арматуры с бетоном, позволяющего оценить расчетную длину анкеровки в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов, Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н.П. Фролов. – М. : Стройиздат, 1980. – 104 с.
2. Лешкевич, О.Н. Перспективы применения композитной арматуры / О.Н. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы Третьего междунар. симп. – Минск, 2011. – С. 9–12.
3. Хотько, А.А. Опыт и проблемы эффективного применения стеклопластиковой арматуры при армировании стеклопластбетонных конструкций / А.А. Хотько // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч.-техн. ст. – Минск, 2012. – С. 140–147.
4. Николаев, Е. Применение композитных материалов в строительстве в мире. Потенциал роста в России [Электронный ресурс] / Е. Николаев // ООО «Гален». – 2011.
5. Степанова, В.Ф. Опыт применения неметаллической арматуры в конструкциях мостов на автомобильных дорогах [Электронный ресурс] / В.Ф. Степанова // Ассоциация «Неметаллическая композитная арматура». – 2013.
6. Мулин, Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций / Н.М. Мулин. – М. : Стройиздат, 1974. – 232 с.
7. Терин, В.Д. Сцепление с бетоном ненапрягаемой арматуры различных видов профилей / В.Д. Терин, А.А. Хотько // Совершенствование железобетонных конструкций оценка их состояния и усиление : сб. науч. тр. – Минск, 2001. – С. 188–195.
8. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.

Поступила 30.05.2016

EXPERIMENTAL RESEARCH DEFORMABILITY BOND WITH CONCRETE FIBERGLASS PLASTIC ARMATURE OF THE REPUBLIC OF BELARUS

SADIN EBRAHIM YAGHOUB, A.A. KHATSKO

This article analyzes the advantages and disadvantages of composite reinforcement for reinforcing concrete structures. Reflects the results of our experimental studies clutch deformability with concrete fiberglass plastic armature, Belarus producers. The analysis of the influence of the diameter and length of contact with the concrete fiberglass rebar of various manufacturers on the clutch deformability with concrete. The experiment revealed that the valves produced by "Business-Continent" and LLC "Stroykompozit" is more deformable coupling with concrete, rebar production than PE "Minplast". Deformation reinforcement also decreased with increasing incorporation of reinforcement in the concrete. Determined moments of the beginning shift rebar concrete regarding two different methods. Ideas for an accounting estimate anchoring in concrete fiberglass plastic armature production.

Keywords: *fiberglass rebar, kompozitobetonnye constructions, bond, anchoring, deformations.*

УДК 624.014.2

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТИН ПРИ СДВИГЕ

А.А. ИВАНОВ; В.И. АТРАХИМОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Демонстрируется испытательная установка, основанная на принципе перекоса пластины в шарнирном четырехзвеннике. Установка позволяет проводить испытания пластин различных форм, размеров и толщин на устойчивость и сопротивление сдвигу. Показаны общий вид установки, принципиальная схема работы, возможная форма ее реализации. В рамках подготовки эксперимента выполнены предварительные расчеты и симуляция работы установки в условиях, максимально приближенных к реальным. Приведены результаты распределения напряжений в рабочей зоне пластины при использовании образцов прямоугольной и крестообразных форм. Описаны некоторые особенности работы отдельных элементов установки.

Ключевые слова: испытательная установка, сдвиг, шарнирный четырехзвенник, метод конечных элементов, устойчивость, испытания пластин, касательные напряжения, эксперимент.

Потеря устойчивости элементами тонкостенных стержней оказывает большое влияние на общее состояние конструкции в целом. Связано это с тем, что потеря местной устойчивости приводит к искажению формы, смещению центра изгиба, что, в свою очередь, может вызвать кручение стержня и привести к преждевременному выходу его из строя.

Эта проблема впервые была затронута при строительстве мостов Британия и Конуэй исследователем В. Фэйребёрном. Эксперименты на моделях размером в одну шестую от линейных размеров проектируемых мостов показали, что балки теряли несущую способность из-за выпучивания тонких стенок, передававших касательные и изгибные напряжения. При последующем изучении вопроса [1] С.П. Тимошенко заметил, что у изгибаемых балок устойчивость всех отсеков стенки можно считать обеспеченной, если обеспечена устойчивость крайних ее отсеков, в которых преобладают сдвигающие усилия и крайне малы изгибные, а также средних, в которых преобладают изгибные напряжения. Таким образом, при рассмотрении вопроса устойчивости стенок изгибаемых балок на первое место встают вопросы устойчивости пластин при действии чистого изгиба и чистого сдвига.

Эксперименты, связанные с проверкой теоретических решений и методик на их основе, можно разделить на три типа: натурные, полунатурные и лабораторные. К первому относятся эксперименты, проводимые на реальных конструкциях при реальных условиях эксплуатации. Ко второму – испытание отдельных частей или узлов конструкций с имитацией связей и нагрузок, максимально приближенных к реальным условиям. Лабораторные же испытания проводятся со специальными моделями на специально сконструированных установках при связях и нагрузках, предполагаемых в теоретических расчетах.

В частности, исследования такого явления, как потеря устойчивости пластин, возможны только в лабораторных исследованиях, так как в реальных конструкциях данное явление в чистом виде не наблюдается.

При проектировании установки для исследования устойчивости пластин при сдвиге необходимо соблюдать следующие условия: 1) жесткость установки и ее отдельных элементов должна быть во много раз выше испытываемого образца, чтобы деформации деталей установки не повлияли на поведение пластин; 2) при действии нагрузок недопустимо появление эффектов закручивания или изгиба пластины до потери ее устойчивости; 3) нормальные напряжения в образце должны быть незначительными; 3) касательные напряжения по всей плоскости пластины – равномерными; 4) установка должна быть проста в изготовлении и универсальна, позволяя тем самым изменять размеры испытываемых элементов.

В качестве принципиальной схемы установки принят «шарнирный четырехзвенник» (рис. 1), основным преимуществом которой является ее простота, а именно возможность изготовить элементы установки без применения специального оборудования и возможность варьировать размеры испытываемых элементов как по толщине и форме, так и по размерам. В представленной установке в качестве звеньев использовались ввиду их жесткости прокатные уголки из плоскости пластины. Для закрепления исследуемой пластины между уголками применялись болты с гайками. Принятое количество болтов и усилие затяжки позволило избежать проскальзывания пластины и корректно передавать на нее усилия. В качестве шарниров в углах использовались стальные шпильки. При сборе всей конструкции шпильки не затягиваются, что позволяет граням четырехзвенника свободно вращаться относительно их оси. Для свободного деформирования системы, как показано на рисунке 1, уголки смежных звеньев не должны соприкасаться. Общий вид установки представлен на рисунке 2.

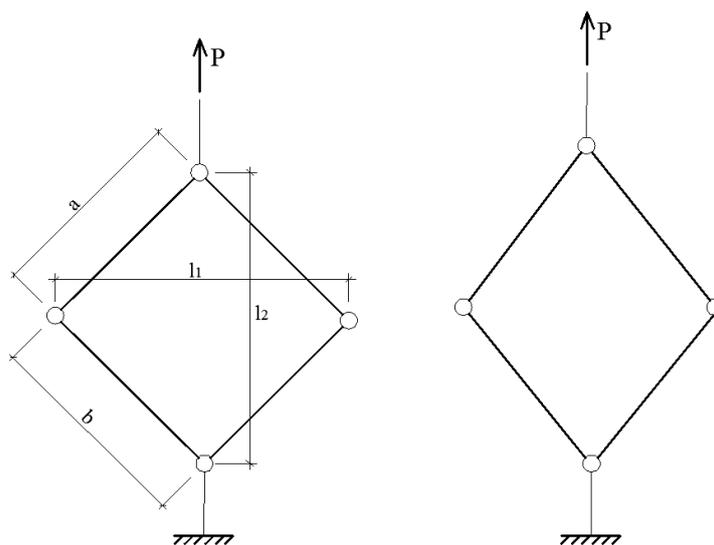
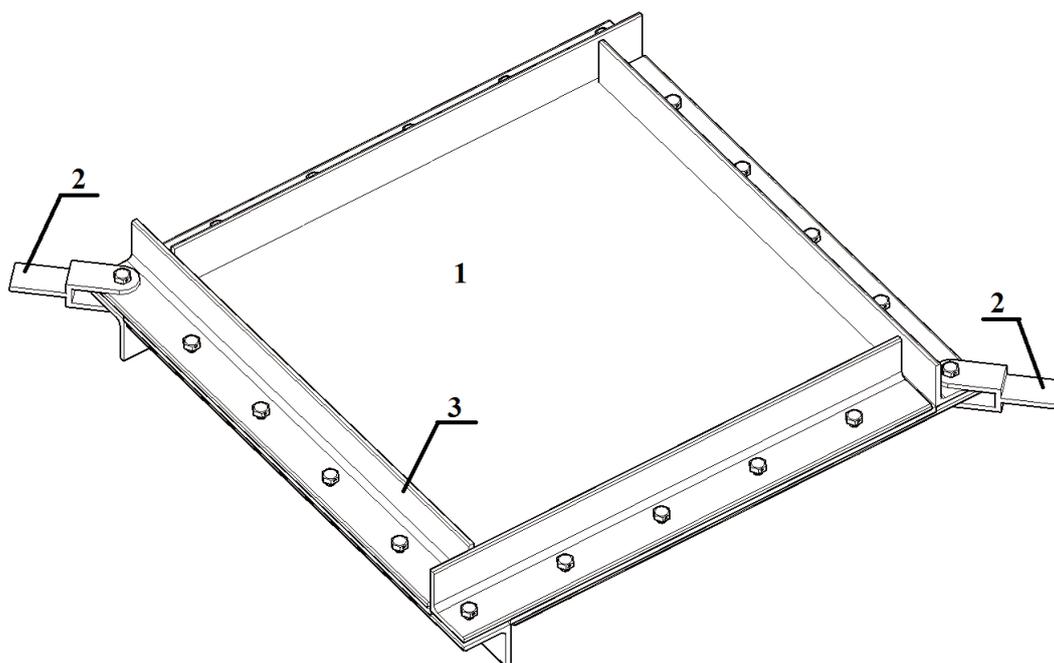


Рисунок 1. – Принципиальная схема установки



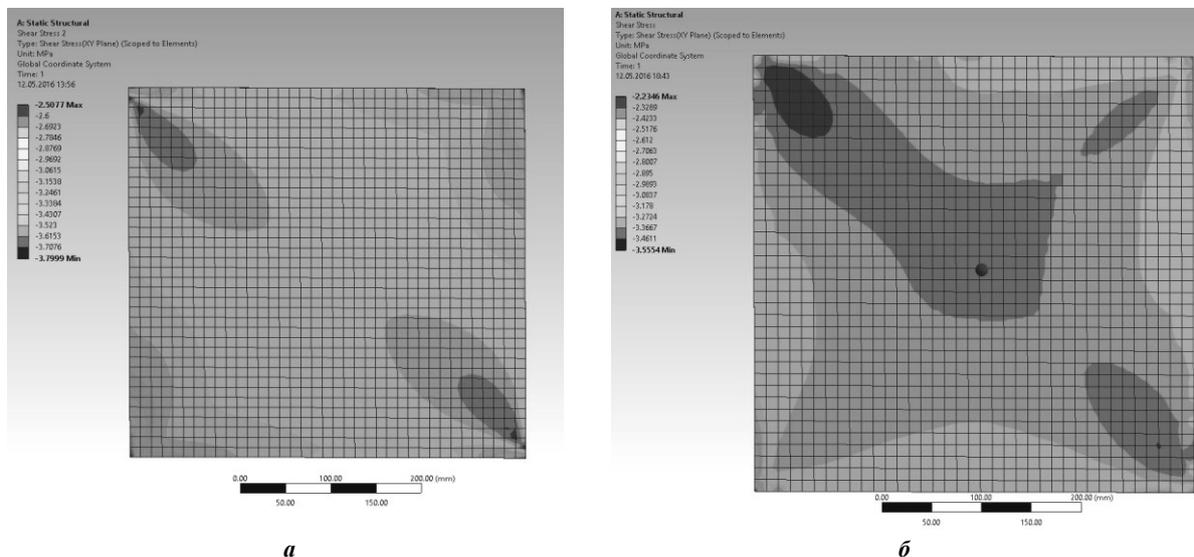
1 – испытываемая пластина; 2 – пластины для захватов разрывной машины;
3 – грани четырехзвенника, передающие нагрузку на пластину

Рисунок 2. – Общий вид испытательной установки

В качестве материала исследуемых пластин использовалось оргстекло. Выбор органического стекла обусловлен двумя причинами: оно легко поддается обработке и представляет линейно-упругий материал с низким модулем Юнга (2800...3300 МПа) и средней предельной прочностью при растяжении 70...83 МПа. Такое сочетание характеристик позволяет при испытании ограничиться невысокими нагрузками и в качестве граней четырехзвенника не использовать массивные стальные элементы, а ограничиться, например, прокатным уголком. Однако следует учесть высокий коэффициент линейного температурного расширения ($0,7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что примерно втрое больше, чем у стали), чтобы не допустить искажения результатов эксперимента.

Для оценки адекватности распределения нормальных и касательных напряжений в исследуемой пластине и соблюдения всех требований, предъявленных к установке, в процессе разработки выполнен анализ с использованием программного комплекса на основе метода конечных элементов (МКЭ). Такой подход позволяет не только виртуально апробировать установку, но и выявить особенности работы отдельных ее элементов.

В ряде литературных источников для подобных испытаний упоминается использование крестообразных пластин (т.е. с вырезами в углах). В связи с этим проведено сравнение результатов расчета при помощи МКЭ и сопоставлены характеры распределения напряжений по рабочей площади пластин (рис. 3), а также величины касательных напряжений, приводящих к потере устойчивости. Несмотря на некоторое несоответствие между распределением касательных напряжений по площади пластин, критические касательные напряжения τ_{cr} отличаются не более чем на 1%, а форма потери устойчивости полностью совпадает (рис. 4). Однако следует заметить, что необходимое растягивающее усилие, прикладываемое к установке в случае использования прямоугольных пластин, превышает таковое для крестообразных на значительную величину – до 25%.



а – крестообразная пластина; **б** – прямоугольная
 Рисунок 3. – Поля касательных напряжений в рабочей зоне исследуемых пластин

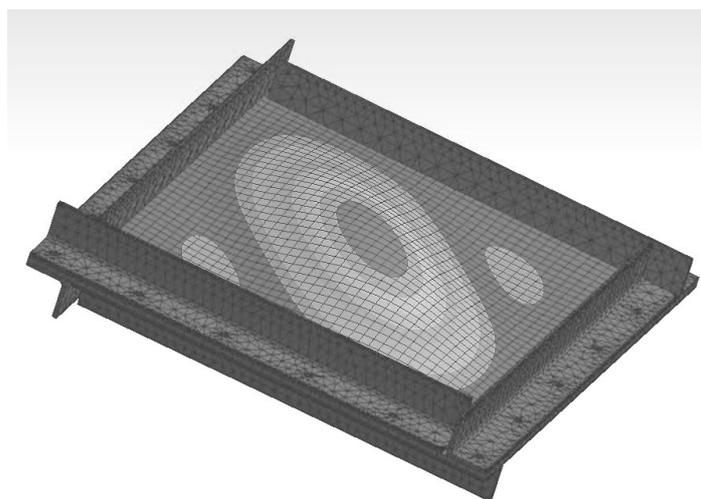


Рисунок 4. – Форма потери устойчивости пластины при чистом сдвиге

Еще одним немаловажным фактором является отсутствие эффектов закручивания или смещения незакрепленных углов установки при действии расчетных нагрузок. В случае появления таковых произойдет деформация срединной плоскости пластины, и форма потери устойчивости может существенно отличаться. При представленном варианте реализации установки эффекты смещения незакрепленных углов появляются только при испытании образцов с высоким сопротивлением сдвигу и величины смещения из плоскости пластины не превышают 0,01 мм, следовательно, ими можно пренебречь.

Предварительный анализ работы установки свидетельствует о наличии местных перенапряжений у отверстий в углах четырехзвенника (рис. 5). Данный факт необходимо учитывать при подготовке экс-

перимента, чтобы не допустить разрушения пера уголка. Помимо этого, необходимо проводить расчет угловых шпилек на срез, так как они подвержены наибольшему нагружению.

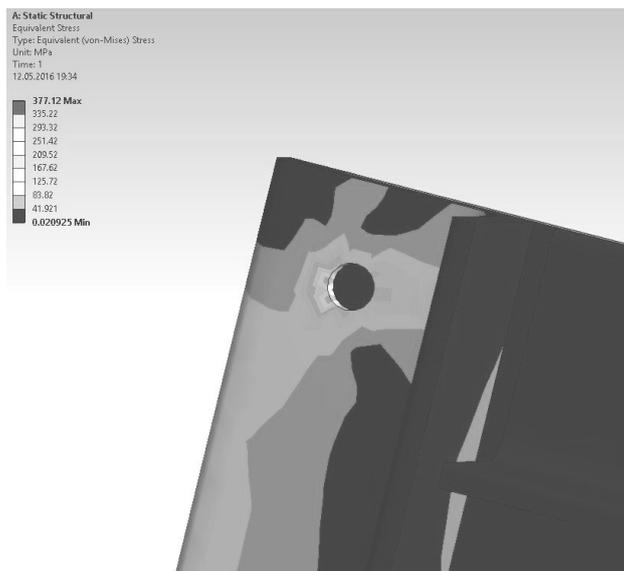


Рисунок 5. – Перенапряжения у отверстий в углах четырехзвенника (эквивалентные напряжения по критерию Мизеса)

Заключение. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие **выводы:**

- 1) представленный вариант реализации установки для перекоса пластины в шарнирном четырехзвеннике отвечает всем предъявленным требованиям и позволяет получить корректные результаты при исследовании устойчивости пластин на действие касательных напряжений;
- 2) использование прямоугольных пластин без вырезов в углах позволяет получить более равномерное распределение касательных напряжений по площади пластины, но требует увеличения внешней нагрузки вплоть до 25%;
- 3) наиболее опасными частями конструкции с точки зрения прочности являются угловые шпильки, работающие на срез и выполняющие функцию шарниров, и перо уголка, к ним прилегающее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко, С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек / С.П. Тимошенко // Избр. работы ; под ред. Э.И. Григолюка. – М. : Наука, 1971. – С. 646–652.
2. Инженерный анализ в ANSYS Workbench : учеб. пособие / В.А. Бруйка [и др.]. – Самара : Самар. гос. ун-т, 2010. – 271 с.

Поступила 01.06.2016

THE TEST SETUP FOR INVESTIGATING THE STABILITY OF THE SHEAR PLATES

A. IVANOV, V. ATRAKHIMOVICH

The article is dedicated test rig based on the principle of the skew plate in the hinge quadric. This setting allows testing plates of various shapes, sizes and thicknesses of the stability and resistance to shear. An overall view of the installation, operation principle scheme, a possible form of its implementation. Also in the experiment preparation, preliminary calculations and simulation of plant operation in conditions as close to real. Shows the stress distribution in the working area of the plate when using rectangular samples and cruciform shapes. Also describes some of the features of the individual system components.

Keywords: test set, shear, articulated quadric, finite element method, stability, test plates, shear stresses, experiment.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 697:721.011.25

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ НОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛО-, ГАЗО-, ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВТОРИЧНЫХ И ПРИРОДНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ

*канд. техн. наук, доц. В.И. ЛИПКО; О.Н. ШИРОКОВА
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены основные направления научных исследований по экономии энергетических и сырьевых ресурсов в одном из наиболее энергозатратных секторов экономики – градостроительном, где энергоёмкость единицы национального продукта Республики Беларусь значительно превышает индустриально развитые страны мира. Необходимость в преобразовании энергозатратной технологии и отопительно-вентиляционной техники в сфере жилищного строительства тесно связана с реструктуризацией инженерных систем со значительно меньшими затратами материальных средств и энергоресурсов за счёт более широкого использования вторичных и природных энергоисточников.

Ключевые слова: *энергоёмкость, теплоснабжение, отопление, вентиляция, реструктуризация, модернизация, утилизация, энергосбережение.*

Рациональное использование природных ресурсов и интенсификации экономики в значительной степени зависят от уровня достижений науки, техники и передового опыта в области создания энергоэффективных конструктивно-технологических решений, направленных на снижение энергоёмкости единицы национального дохода. Отопительно-вентиляционная техника, инженерные сети здания и теплотехническое оборудование из всех энергопотребляющих отраслей экономики занимают одно из первых мест, потребляя ежегодно свыше трети всех видов топливно-энергетических ресурсов, что является тяжелым бременем для всей экономики Республики Беларусь, не имеющей своей топливно-энергетической базы в полном объеме и расположенной в географической зоне с умеренно-холодным климатом. Поэтому вполне очевидна необходимость дальнейшего совершенствования энергетических систем зданий и сооружений.

Основная часть. Эксплуатация объектов жилищно-культурного строительства связана с необходимостью обогрева зданий одновременно с непрерывной подачей свежего наружного воздуха в помещения с постоянным или длительным пребыванием людей для удовлетворения требований комфортного проживания или технологических процессов, например, сжигания топлива.

По существующей технологии вентиляции жилых и общественных зданий наружный воздух поступает в вентилируемые помещения неорганизованно сквозь толщу наружных ограждений за счет воздухопроницаемости и через неплотности оконных и дверных притворов под действием вытяжной вентиляции за счет инфильтрации. Однако принятые в многоэтажных зданиях конструктивно-планировочные решения с наличием внутри зданий лестнично-лифтовых объемов создают вынужденные условия аэрации, при которых нижняя часть объема здания находится под разрежением и работает в режиме инфильтрации, а верхняя часть объема здания из-за теплового гравитационного подпора работает в режиме эксфильтрации. Неорганизованная фильтрация холодного наружного воздуха способствует интенсивному сквозному продуванию здания: горизонтальному – под действием ветрового напора; вертикальному – за счет сил гравитации, что значительно переохлаждает здание и неизбежно приводит к безвозвратным потерям тепловой энергии и дискомфорту микроклимата жилых помещений.

В целях нормализации микроклимата и энергоресурсосбережения при строительстве и эксплуатации жилых зданий на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Полоцкого государственного университета разработаны и запатентованы [1–3] *рекуперативные воздухоприточные устройства для новой высокоэффективной безинфильтрационной технологии вентиляции* зданий любой этажности, конфигурации, объема и конструктивного исполнения с наружными ограждениями повышенной теплозащиты и герметичности, обеспечивающей нормируемый режим воздухообмена каждого вентилируемого помещения без специальных средств автоматизации, комфортные условия проживания и энергоресурсосбережение.

Другая научная разработка кафедры также связана с нормализацией микроклимата и экономией топливно-энергетических ресурсов. К реализации предлагается *многофункциональная газовая плита* с

экологически безопасными энергоресурсоэффективными возможностями ее использования, подтвержденная патентами Республики Беларусь [4; 5]. Конструкция плиты обеспечивает помимо приготовления пищи еще и сушку продуктов, горячее и холодное копчение, локализацию и удаление вредных выделений, связанных со сжиганием газа и приготовлением пищи, снижение воздухообменов и расхода потребляемого природного или сжиженного газа до 40%, утилизацию тепловых газообразных выбросов, затрачиваемых на предварительный нагрев наружного вентиляционного приточного воздуха, снижающих нагрузку на систему отопления от внешних энергоисточников. Максимальный расход природного газа в 4-х конфорочных плитах, включая жарочный шкаф, не превышает $1 \text{ м}^3/\text{ч}$, на что с учетом коэффициента избытка воздуха требуется около $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ наружного воздуха. В то же время по существующим нормативам из газифицированной кухни необходимо удалять не менее $90 \text{ м}^3/\text{ч}$ подогретого системой отопления вентиляционного воздуха, что многократно превышает нормативное его количество для технологического горения газа.

В целях снижения материальных средств и энергоресурсов на тепловоздухоснабжение жилых чердачных зданий разработано несколько *энергоресурсоэффективных конструктивно-технологических решений* с использованием модернизированных технологических чердаков, навесных вентилируемых светопрозрачных фасадных систем и многоступенчатой утилизацией вторичных и природных энергоресурсов по патентам [6–13].

Модернизация технологического чердака, превращенного из объемной вытяжной секционной камеры в приточную вентиляционную камеру обеспечивает утилизацию трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через потолок верхнего этажа круглосуточно на протяжении всего отопительного периода, а также используется теплота прямой и рассеянной солнечной радиации в дневное время отопительного периода дополнительно для нагрева наружного приточного вентиляционного воздуха, поступающего через объем технологического чердака, что суммарно позволяет экономить до 36% теплопотребления зданием от внешних теплоисточников за счет вторичных и природных энергоресурсов.

На снижение отопительной нагрузки здания в дневное время суток существенное влияние оказывает прямая и рассеянная солнечная радиация, которая воздействует на вертикальные ограждающие конструкции, закрытые навесными светопрозрачными вентилируемыми фасадными системами, и существенно поднимает температуру циркулирующего в щелевом канале наружного воздуха за счет так называемого «парникового эффекта», суть которого заключается в следующем. Лучистая энергия видимой части солнечного спектра с длиной волн в диапазоне $380 \dots 1500 \text{ нм}$ легко проникает сквозь кристаллическую решетку обычного силикатного стекла и нагревает наружную поверхность наружного ограждения, от которой отражается тепловой поток, но уже в виде инфракрасного излучения с длиной волны от $7,5$ до 14 нм , для которых оконное стекло становится экраном, а вся отраженная тепловая энергия аккумулируется наружным воздухом, циркулирующим внутри щелевого канала, поднимая его температуру на значительную величину.

Для обеспечения устойчивой тяги в вытяжных каналах в некоторых конструкциях предлагаемых к внедрению отопительно-вентиляционных устройств, работающих при естественной гравитационной циркуляции воздушных потоков, предусматривается установка в устье вытяжной шахты дефлекторов, дополнительно усиливающих естественную гравитационную составляющую тяги за счет природной энергии ветра.

При малоэтажном строительстве жилых домов коттеджного типа в агрогородках, небольших населенных пунктах, спальных пригородных районах, численность которых постоянно возрастает, используют для автономного отопления индивидуальные котлы, так как из-за большого разброса абонентов по территории застройки централизованное теплоснабжение не всегда экономически обоснованно.

Для энергоресурсоэффективного тепловоздухоснабжения малоэтажных зданий разработано и запатентовано [14] устройство приточной вентиляции здания, совмещенной с его обогревом. Предлагаемая к внедрению авторская разработка основана на вторичном использовании теплоты бытовых теплопоступлений, трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через наружные ограждающие конструкции, теплоты выбрасываемых высокотемпературных газов от отопительного котла, теплоты удаляемого вытяжного воздуха, а также природной теплоты солнечной радиации и энергии ветра.

За участие в Республиканской выставке и семинаре «Новые строительные технологии и материалы», которые проводились под эгидой Минстройархитектуры Республики Беларусь, Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь и Белорусского института системного анализа информационного обеспечения научно-технической сферы, эта работа отмечена Дипломом за лучшую инновационную разработку.

В жилищном строительстве и при эксплуатации зданий повышенной теплозащиты и герметичности ограждающих конструкций основную долю затрат на тепловоздухоснабжение составляют теплопо-

тери через окна. При коэффициенте остекления в среднем для жилых зданий $k = 0,35$ и нормативе по теплозащите $R \geq 1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ суммарные безвозвратные теплотери через оконные конструкции зданий превышают трансмиссионные потери теплоты для других типов ограждений. В связи с актуальностью данной проблемы на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Полоцкого государственного университета проведены научные исследования по *инновационной модернизации конструктивного исполнения оконных стеклопакетов* с наделением им функций рекуперативного пластинчатого теплообменника с аэродинамическим режимом управляемой инфильтрации наружного приточного воздуха, утилизацией трансмиссионной теплоты, теряемой через поверхность остекления, и использованием природной теплоты прямой и рассеянной солнечной радиации для подогрева приточного вентиляционного воздуха.

Новизна научной разработки подтверждена патентом № 947u Республики Беларусь, по результатам которого выполнено построение физической и математической моделей, разработаны основы теории аэродинамических и тепломассообменных процессов, произведен сравнительный анализ различных вариантов конструктивного исполнения вентилируемых оконных стеклопакетов, по которым рекомендованы оптимальные технические решения по их использованию. Благодаря санитарно-гигиеническим, теплотехническим, конструктивно-технологическим, экологическим и социально-экономическим преимуществам вентилируемый оконный стеклопакет конструкции Полоцкого государственного университета предлагается для широкого использования в практике градостроительства [15].

Информация о результатах проводимых научных исследований по тематике энергоресурсосбережения жилых зданий повышенной теплозащиты и герметичности представлена в кратком изложении. Более полно эта тема раскрыта в монографиях: «Вентиляция герметизированных зданий» [16; 17], «Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий» [18; 19], а их детальная проработка отражена в публикациях [20–48].

По результатам участия в выполнении важной тематики Республики Беларусь: ГНТП № 1.5.159 «Разработать и внедрить энергосберегающие материалы и технологии в строительстве и эксплуатации зданий и сооружений» по разделу «Модернизация и тепловая санация существующего жилого фонда» отдельным пунктом выполнялась тема по заданию Минстройархитектуры № 2.02.04 «Разработать безыфильтрационную технологию вентиляции жилых зданий с наружными ограждениями повышенной герметичности». Подготовленная и изданная 2-х томная монография «Вентиляция герметизированных зданий» затребована многими научными, проектными, строительными и эксплуатирующими организациями Республики Беларусь и Российской Федерации.

По Государственной научно-технической программе ГНТП 4.02.08 «Создать и внедрить новые материалы, энергосберегающие технологии и ресурсоэкономные конструктивные системы жилых домов, снижающие ресурсо- и энергопотребление при строительстве и эксплуатации жилья» специалисты Полоцкого государственного университета также принимали участие в разделе «Строительные материалы и технологии» по заданию Минстройархитектуры № 1.1.455 «Создать и внедрить эффективную беструбную систему отопления жилых зданий, снижающую ресурсо- и энергопотребление при ее строительстве и эксплуатации», по результатам которой подготовлена и издана двухтомная монография «Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий», которая также активно востребована субъектами хозяйствования. Результаты выполненных исследований по важнейшей тематике доложены на Научно-техническом Совете Минстройархитектуры и положительно оценены.

Заключение. В целях выполнения стратегического партнерства в сфере энергосбережения и возобновляемых источников энергии между органами государственного управления, субъектами хозяйствования и учреждениями, занимающимися научной деятельностью, рекомендовать проектным, строительным и эксплуатирующим организациям более детально ознакомиться с научными разработками Полоцкого государственного университета по тематике энергоэффективного жилья и использования вторичных и природных энергоисточников. По данному направлению исследований создана достаточно обширная информативная база, в частности по кафедре теплогазоснабжения и вентиляции опубликовано 15 патентов, изданы три двухтомные монографии и свыше 200 научных статей, что обосновывает более активное привлечение к использованию научных разработок кафедры в практику градостроительства.

На основании вышеизложенного по результатам выполненных патентных исследований, аналитических, натурных и экспериментальных изысканий и инженерных расчетов можно сделать следующие *выводы и обобщения*:

- в целях повышения энергоэффективности архитектурно-планировочных решений вновь возводимые здания для максимального природного их обогрева целесообразно ориентировать коротким торцевым фасадом на север, на который также вынести лестнично-лифтовый объем без его отопления, что дает снижение энергопотребления от внешних энергоисточников до 20%;

- в целях нормализации микроклимата при естественной вентиляции зданий и повышения энергоэффективности целесообразно использовать рекуперативные воздухоприточные устройства с автоматически регулируемым режимом воздухообмена;

- существенного снижения свыше 40% эксплуатационных расходов можно достичь при использовании усовершенствованных бытовых газовых плит с multifunctionальными возможностями, рекуперацией теплоты удаляемых продуктов сжигания газа и теплоты вытяжного вентиляционного воздуха с целью предварительного подогрева наружного приточного вентиляционного воздуха;

- предлагаемые к внедрению инновационно модернизированные технологические схемы жилых зданий повышенной теплозащиты и герметичности ограждающих конструкций с использованием навесных светопрозрачных вентилируемых фасадных систем, реконструированных технологических чердаков, функционирующих как объемные приточные секционные вентиляционные камеры с установкой в них рекуперативных теплоутилизаторов, обеспечивают снижение теплопотребления от внешних энергоисточников свыше 73,5% за счет трехступенчатой схемы рекуперации трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через вертикальные и потолочные ограждающие конструкции, а также рекуперации теплоты вытяжного вентиляционного воздуха, при этом экономия материальных средств за отопительный период только для односекционного десятиэтажного жилого дома серии 90 составляет свыше 50 млн белорус. руб. по данным Совета Министров Республики Беларусь стоимости тепловой энергии на конец 2014 года;

- для энергоресурсоэффективного тепловоздухоснабжения малоэтажных зданий с индивидуальными отопительными котлами целесообразно использовать теплоту топочных газов от котлов для воздушного обогрева зданий, совмещенного с активной вентиляцией, обеспечивающих комфортное проживание с минимальным потреблением топливно-энергетических ресурсов;

- для энергоресурсоэффективных зданий с наружными ограждениями повышенной теплозащиты и герметичности из всех рассмотренных многочисленных технологических и конструктивных решений по оконным конструкциям наилучшие технологические, аэродинамические, социально-экономические и санитарно-экологические характеристики имеют вентилируемые оконные стеклопакеты и стеклоблоки. Наличие жалюзи в них улучшают теплотехнические показатели, но значительно увеличивают аэродинамические сопротивления на инфильтрацию наружного воздуха через межстекольное пространство, что в условиях естественной вентиляции жилых зданий становится неприемлемым, а механическая вентиляция для жилых зданий не всегда экономически выгодна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентиляционное приточное устройство : пат. 4410А Респ. Беларусь : МПК (2001) F24F 13/08 / В.И. Липко, В.А. Борванов ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а19981165 ; заявл. 23.12.1998 ; опубл. 30.03.2002 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2001.
2. Рекуперативный приточный вентиляционный элемент : пат. № 4651А Респ. Беларусь : МПК (1998) F24F 13/08 / В.И. Липко, В.А. Борванов ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а19980753 ; заявл. 12.08.1998 ; опубл. 30.09.2002 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002.
3. Воздухоприточные устройства : пат. № 4963А Респ. Беларусь : МПК (2002) F24F 13/08 / В.И. Липко ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а1990196; заявл. 26.02.1992; опубл. 30.03.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002.
4. Газовая плита : пат. 4338А Респ. Беларусь : МПК (1999) F24C 3/00 / В.И. Липко ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а1990297 ; заявл. 30.03.1999 ; опубл. 30.03.2002 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002.
5. Бытовая газовая плита : пат. 8117u Респ. Беларусь : МПК (2006.01) F24C 3/00 / В.И. Липко, С.В. Липко ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20110722 ; заявл. 26.09.2011; опубл. 03.01.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012.
6. Отопительно-вентиляционная система здания : пат. 1134u Респ. Беларусь : МПК (2003) F24D 7/00 / В.И. Липко ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20030177; заявл. 21.04.2003 ; опубл. 30.12.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.
7. Устройство приточной вентиляции здания : пат. 892u Респ. Беларусь : МПК (2002) F24F 13/08 / В.И. Липко, А.Н. Бендо ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20020288 ; заявл. 15.10.2002 ; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.
8. Оголовок вытяжного вентиляционного блока : пат. 5954А Респ. Беларусь : МПК (2000) F24F 7/00, E04F 17/04 / В.И. Липко, В.А. Барванов ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а20000367 ; заявл. 18.04.2000 ; опубл. 30.03.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004.

9. Отопительно-вентиляционная система здания : пат. 9599u Респ. Беларусь : МПК (2006) F24Д 7/00 / В.И. Липко, В.А. Зафатаев, С.В. Липко ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20130201 ; заявл. 04.03.2013 ; опубл. 30.10.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013.
10. Рекуперативное устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : пат. 8381u Респ. Беларусь : МПК (2006.01) F24Д7/00 / В.И. Липко, С.В. Липко ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20120004 ; заявл. 02.01.2012 ; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012.
11. Устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : пат. 7952u Респ. Беларусь : МПК (2006.01) F24F7/00 / В.И. Липко, С.В. Липко ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20110378 ; заявл. 13.05.2011 ; опубл. 28.02.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012.
12. Технологический чердак здания : пат. 9618u Респ. Беларусь : МПК (2006.01) E04Н 1/02 / В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, С.В. Липко, С.В. Ланкович ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20130302 ; заявл. 09.04.2013 ; опубл. 30.10.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013.
13. Устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : решение о выдаче патента по заявке на полезную модель от 24.02.2014 Респ. Беларусь : МПК (2006.01) F24F 7/00 / В.И. Липко, О.Н. Широкова ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20130985 ; заявл. 25.11.2013 ; положительное решение 24.02.2014.
14. Устройство приточной вентиляции здания, совмещенной с его обогревом : пат. 8998u Респ. Беларусь : МПК (2006.01) F24Д 7/00 / В.И. Липко, С.В. Липко, Е.А. Самохвал, О.Н. Широкова ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20120681 ; заявл. 16.07.2012 ; опубл. 28.02.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013.
15. Приточный вентиляционный оконный блок : пат. 947u Респ. Беларусь : МПК (2006.01) E06В 7/02, 7/10 / В.И. Липко ; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20020379 ; заявл. 04.12.2002 ; опубл. 30.09.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.
16. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2-х т. / В.И. Липко. Т. 1. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 300 с.
17. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2-х т. / В.И. Липко. Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 244 с.
18. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий : в 2-х т. / В.И. Липко. Т. 1. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2004. – 212 с.
19. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий : в 2-х т. / В.И. Липко. Т. 2. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2004. – 392 с.
20. Липко, В.И. Резервы снижения затрат при строительстве и эксплуатации систем теплогасоснабжения и вентиляции герметизированных зданий повышенной теплозащиты / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Вестн. БрГТУ. – 2015. – № 2 : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геология. – С. 50–52.
21. Липко, В.И. Инновационная модернизация систем тепловоздухоснабжения чердачных зданий по критерию энергосбережения / В.И. Липко, С.В. Ланкович // Вестн. БрГТУ. – 2015. – № 2 : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геология. – С. 52–55.
22. Липко, В.И. Методика расчета ограждающих конструкций жилого чердака с учетом исключения конденсации влаги / В.И. Липко // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров Республики Беларусь : материалы XI Междунар. науч.-метод. межвуз. семинара. Ч. 2. – С. 157–160. – (Приложение к Вестн. Брест. гос. технол. ун-та. Строительство и архитектура).
23. Липко, В.И. Совершенствование методов теплотехнического расчета наружных ограждающих конструкций / В.И. Липко // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров Республики Беларусь : материалы XI Междунар. науч.-метод. межвузов. семинара). Ч. 2. – С. 160–165. – (Приложение к Вестн. Брест. гос. технол. ун-та. Строительство и архитектура).
24. Липко, В.И. Совершенствование воздушного обогрева гражданских зданий / В.И. Липко, А.Б. Багель // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XI Междунар. науч.-метод. межвуз. семинара). Ч. 2. – С. 165–169. – (Приложение к Вестн. Брест. гос. технол. ун-та. Строительство и архитектура).
25. Липко, В.И. Пути совершенствования технологии вентиляции герметизированных зданий / В.И. Липко, В.А. Борвонов, А.Б. Багель // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров Республики Беларусь : материалы XI Междунар. науч.-метод. межвуз. семинара. Ч. 2. – С. 169–174. – (Приложение к Вестн. Брест. гос. технол. ун-та. Строительство и архитектура).
26. Липко, В.И. Инновационная модернизация отопительно-вентиляционных устройств для малоэтажных индивидуально отапливаемых зданий / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Инновации в науке, производстве и образовании : материалы Первой междунар. науч.-практ. конф., Калининград, 2015 г. // Вестн. науки и образования Северо-Запада России. – Калининград, 2015.

27. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение чердачных зданий / В.И. Липко, А.С. Лапезо, С.В. Ланкович // Вестн. науки и образования Северо-Запада России : материалы Первой междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в науке, производстве и образовании», Калининград, 2015 г. – Калининград, 2015.
28. Липко, В.И. Теория исследования работы рекуперативных приточных вентиляционных элементов в инновационной технологии поддержания микроклимата герметизированных зданий / В.И. Липко, Н.В. Кундро // Вестн. науки и образования Северо-Запада России : материалы Первой междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в науке, производстве и образовании», Калининград, 2015 г. – Калининград, 2015.
29. Липко, В.И. Утилизация трансмиссионной теплоты при инфильтрации приточного воздуха через вентилируемые оконные стеклопакеты / В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, Е.К. Синюкович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – С. 103–108.
30. Липко, В.И. Основы теории расчета тепломассообменных процессов при вентиляции герметизированных зданий // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений : сб. науч. тр. / под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – С. 252–260.
31. Липко, В.И. Анализ результатов экспериментальных исследований аэродинамических и теплотехнических параметров рекуперативных приточных вентблоков типа РПВЭ / В.И. Липко, С.И. Пивоварова // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений : сб. науч. тр. / под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – С. 261–270.
32. Липко, В.И. Концепция энергосбережения в системах теплогасоснабжения и вентиляции жилых и общественных зданий с наружными ограждениями повышенной герметичности / В.И. Липко, А.А. Шакель // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений : сб. науч. тр. / под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – С. 270–273.
33. Липко, В.И. Реструктуризация инженерных систем тепловоздухоснабжения жилых зданий / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Энергосберегающие технологии теплогасоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры : материалы Междунар. науч.-практ. интернет-конференции / Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2013. – С. 20–22.
34. Липко, В.И. Устройство приточно-вытяжной вентиляции здания, совмещенной с его обогревом / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Энергосберегающие технологии теплогасоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры : материалы Междунар. науч.-практ. интернет-конференции / Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2013. – С. 92–95.
35. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективная технология тепловоздухоснабжения чердачных зданий / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Энергосберегающие технологии теплогасоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры : материалы Междунар. науч.-практ. интернет-конференции / Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2013. – С. 95–98.
36. Липко, В.И. Инновационная модернизация технологических чердаков с использованием вторичных и природных энергоресурсов для тепловоздухоснабжения зданий / В.И. Липко, С.В. Ланкович // Энергосберегающие технологии теплогасоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры : материалы Междунар. науч.-практ. интернет-конференции / Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2013. – С. 98–100.
37. Липко, В.И. Инновационная модернизация бытовой газовой плиты в энергоресурсоэффективных системах теплогасоснабжения и вентиляции жилых домов / В.И. Липко, Н.В. Кундро // Энергосберегающие технологии теплогасоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры : материалы Междунар. науч.-практ. интернет-конференции / Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2013. – С. 142–144.
38. Липко, В.И. Построение физической и математической моделей к вопросу теории расчёта рекуперативного теплообмена при инфильтрации приточного воздуха через энергосберегающие вентилируемые двухслойные стеклопакеты с утилизацией трансмиссионной теплоты / В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, С.В. Ланкович // Проблемы инновационного биосферно-совместного социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах : материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Брянск 9–10 апр. 2013 г. : в 2-х т. Т.2 / Брянская гос. инж.-технол. акад. – Брянск, 2013. – С. 75–81.
39. Липко, В.И. Энергоэффективное автономное тепловоздухоснабжение малоэтажных герметичных зданий / В.И. Липко, О.Н. Широкова, С.В. Липко // Проблемы инновационного биосферно-совместного социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах : материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 9–10 апр. 2013 г. : в 2-х т. Т.2 / Брянская гос. инж.-технол. акад. – Брянск, 2013. – С. 81–88.

40. Липко, В.И. Моделирование тепломасообменных процессов и конструктивный расчет кожухотрубного теплообменника-утилизатора отопительно-вентиляционной системы здания / В.И. Липко, А.С. Лапезо // Проблемы инновационного биосферно-совместного социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах : материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 1–2 дек. 2015 г. / Брян. гос. инж.-технол. акад. – Брянск, 2015. – С. 189–196.
41. Липко В.И. Тепловой расчет кожухотрубного теплообменника-утилизатора отопительно-вентиляционной системы здания по безразмерным комплексам / В.И. Липко, А.С. Лапезо, О.Н. Широкова // Проблемы инновационного биосферно-совместного социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах : материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 1–2 дек. 2015г. / Брян. гос. инж.-технол. акад. – Брянск, 2015. – С. 196–203.
42. Липко, В.И. Методология построения математической модели инновационной технологии тепловоздухоснабжения герметичных зданий / В.И. Липко, Н.В. Кундро // Проблемы инновационного биосферно-совместного социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах : материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Брянск 1–2 дек. 2015 г. / Брян. гос. инж.-технол. акад. – Брянск, 2015. – С. 203–209.
43. Липко, В.И. Инновационная модернизация отопительно-вентиляционных устройств эжекторного типа для малоэтажных зданий / В.И. Липко, О.Н. Широкова, А.С. Лапезо // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск : СибАДИ, 2015. – С. 337–341.
44. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективная реструктуризация систем тепловоздухоснабжения чердачных зданий / В.И. Липко, С.В. Ланкович // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск : СибАДИ, 2015. – С. 332–337.

Поступила 05.02.2016

**ENERGY SAVING INNOVATIVE TECHNOLOGY
HEAT GAS AIR SUPPLY OF RESIDENTIAL BUILDINGS
AND USE OF RENEWABLE SECONDARY AND NATURAL RESOURCES PLANNING**

V. LIPKO, O. SHIROKOVA

The article describes the main directions of scientific research on saving energy resources and ran materials in one of the most energy-consumption sectors of the economy-urban engineering, where energy intensity of the national product in the Republic of Belarus is must higher than in industrialized countries. The need in transformation of energy-consumption technology and of heating and ventilation mechanism in the system of house building is closely connected to the restructuring of engineering systems at a much lower costs of material and energy resources to the increased use of secondary and natural resources.

Keywords: *energy consumption, heat supply, heating, ventilation, restructuring, recycling, energy saving.*

УДК 621.646

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЛИКВИДАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ,
ПРОЛОЖЕННЫХ СПОСОБОМ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ**

*канд. тех. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ; Д.А. КИСЕЛЁВ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается проблема ликвидации трубопроводов, проложенных способом наклонно-направленного бурения под естественными и искусственными препятствиями. Проанализированы применяемые на сегодняшний день методы ликвидации трубопроводов. На основе проведенного анализа сформулированы преимущества и недостатки каждого из методов. Предложены альтернативные способы ликвидации трубопроводов. Проведен анализ альтернативных способов, в ходе которого выявлены преимущества и недостатки каждого из способов.

Ключевые слова: *трубопровод, ликвидация, наклонно-направленное бурение, грунт, альтернативные способы.*

В современном мире прокладка труб методом наклонно направленного бурения получила широкое распространение. Однако проблема ремонта таких труб все еще остается актуальной. Особенность состоит в том, что трубы могут находиться на достаточно большой глубине (минимум 6 м от поверхности земли), под реками или озерами (в этом случае глубина отсчитывается от дна водоема), а также под искусственными препятствиями, такими как дороги, здания и т.д. В случае нарушения целостности такого трубопровода может возникнуть вопрос о его удалении из земли [1].

Удалить трубопровод, проложенный методом наклонно направленного бурения, можно либо его полным раскапыванием, что приводит к колоссальным объемам земляных работ, либо попытавшись вырвать трубопровод из земли, что из-за большой протяженности трубы (200...400 м) и явления «присоса» конструкций, долгое время находящихся в земле, требует усилий, по величине больших, чем прочность стальной трубы. Отсюда формулируется проблема: существующие методы ликвидации таких конструкций являются трудоемкими и дорогостоящими.

Цель данной работы заключается в разработке методов ликвидации трубопровода, сооруженного методом наклонно направленного бурения с учетом существующих технологий и возможностей.

Основная часть. Наклонно направленное бурение – это высокотехнологичный метод производства подземных работ, позволяющий при этом минимизировать ущерб окружающей среде, прокладывая инженерные коммуникации в недоступных при производстве работ обычным открытым способом местах, под автомобильными дорогами, железнодорожными путями и реками, под зданиями и сооружениями, под насыпями и оврагами.

Специальной буровой установкой в поверхностном слое земли (на глубине до 15 м) производится наклонное бурение скважины небольшого диаметра по заданной траектории. Локационная система позволяет с высокой точностью (0,1% от глубины залегания – на 10 м ± 1 см) определять координаты буровой головки и прокладывать трассу в соответствии с проектом. Затем скважину расширяют до требуемого диаметра, позволяющего проложить трубопровод. После этого протаскивают плетть (заранее сваренного и испытанного) рабочего трубопровода. Буровой комплекс состоит из собственно буровой установки (рис. 1) и узла приготовления бурового раствора.



Рисунок 1. – Установка наклонно направленного бурения

Оборудование полностью размещается на одном трейлере (мобильно, автономно) и транспортируется на любое расстояние к месту проведения работ.

Монтаж на объекте занимает 2...4 часа и сводится к выставлению установки на точке забуривания и подсоединению к растворяющему узлу. Монтажные работы методом наклонно направленного бурения выполняются на ограниченных по размерам и площади стройплощадках. Использование этого метода бурения позволяет сократить сроки производства работ в 1,5 и более раз.

Скорость проведения работ методом наклонно направленного бурения достигает 100 м прокладки трубопроводов (d 110...600 мм) за смену.

Рассмотрим существующие методы ремонта трубопроводов, проложенных методом наклонно направленного бурения [2; 3]. Основными методами ремонта трубопроводов на сегодняшний день являются:

- метод «труба в трубе» (считается наиболее экономичным);
- метод «взламывания» старой трубы с одновременной протяжкой новой плети;

Также известен метод «раскопки» ремонтируемого трубопровода.

Метод «труба в трубе»

При использовании метода «труба в трубе» (рис. 2) в первую очередь подбирается диаметр трубы, который будет максимально соответствовать диаметру ремонтируемого трубопровода.



Рисунок 2. – Метод «труба в трубе»

Введение новых труб в старые осуществляется через открытый в начале участка котлован путем проталкивания предварительно сваренных в плетень труб меньшего диаметра. Трубы на месте свариваются в плети длиной, обусловленной рядом факторов. Главный из них – протяженность участка ремонтируемого трубопровода. Перед введением труб проводится предварительная очистка участка трубопровода, подлежащего санации. Затем к концу трубы приваривается специальная насадка, к которой прикрепляется трос. Втягивание трубопровода осуществляется с помощью лебедки, установленной над колодезем в конце ремонтируемого участка.

Преимущества метода «труба в трубе»:

- минимальное трение о внутреннюю поверхность;
- отсутствие трения о грунт, что определяет малые тяговые усилия;
- отсутствие нерасчетных перегибов трубопровода;
- труба не контактирует с окружающим грунтом (отсутствие почвенной коррозии);
- не нарушается движение транспорта, т.е. возможно применение данного метода в условиях плотной городской застройки;
- использование в нестабильных грунтовых условиях;
- отсутствие риска повреждения существующих коммуникаций по сравнению с открытыми способами прокладки трубопроводов;
- минимальная разработка грунта при реконструкции сетей и сооружений.

Недостатки метода «труба в трубе»:

- уменьшение диаметра трубы, что влечет за собой резкое повышение гидравлического сопротивления ремонтируемого участка и создает препятствия для проведения внутритрубной диагностики;
- требуется предварительная очистка трубопровода;
- необходимо предусмотреть недопущение контакта внутренней и наружной труб.

Метод «взламывания»

Данный метод применяется в тех случаях, когда необходимо сохранить или увеличить диаметр трубопровода. В этом случае через разрушаемую трубу со стороны приемного котлована пропускаются штанги (рис. 3). На конце штанг в стартовом котловане крепится нож-расширитель, который через вертлюг соединен с протягиваемой трубой. Со стороны приемного котлована штанги затягиваются гидравлическими домкратами, размещенными на дне котлована. Рама имеет упорную плиту для фиксации в котловане. Штанги циклически вынимаются, и процесс протяжки продолжается до полного выхода ножа в приемный котлован. При этом поврежденная труба (одновременно) разрезается ножом, расширяется, и в нее затягивается новая труба [4].

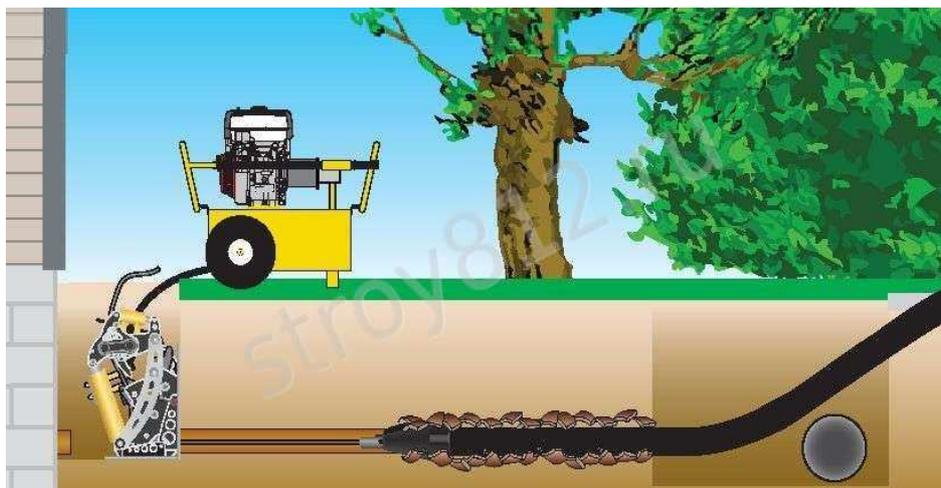


Рисунок 3. – Метод «взламывания»

Преимущества метода «взламывания»:

- высокая производительность – более 100 м трубопровода в день;
- метод применим при любых видах повреждений;
- значительная экономия за счет минимума земляных работ при реконструкции сетей и сооружений;
- не нарушается движение транспорта, т.е. возможно применение данного метода в условиях плотной городской застройки;
- небольшой риск повреждения существующих коммуникаций по сравнению с открытыми способами прокладки трубопроводов;
- возможна замена труб на трубы такого же или большего диаметра.

Недостатки метода «взламывания»:

- неэкологичность;
- необходима предварительная очистка трубопровода;
- возможное повреждение изоляции на новом трубопроводе оставшимися в грунте фрагментами старого трубопровода;
- невозможность использования метода под реками, если труба проложена траншейным способом.

Метод «раскопки»

Суть данного метода состоит в том, что трубопровод полностью раскапывается при помощи экскаватора, далее происходит непосредственно ремонт трубы. Одним из главных недостатков данного метода является то, что глубина залегания трубопровода, проложенного методом наклонно направленного бурения, составляет от 6 м и более, создавая тем самым проблему его раскопки. Трубопроводы в основном пролегают под реками и дорогами, что, в свою очередь, затрудняет применение данного метода.

Преимущества метода «раскопки»:

- использование легкодоступной землеройной техники (экскаваторы, бульдозеры, скреперы);
- возможность ремонта непосредственно ремонтируемого участка.

Недостатки метода «раскопки»:

- огромный фронт земляных работ;
- резкое повышение трудоемкости и сложности проведения работ под реками;
- образование над отремонтированным трубопроводом слоя взрыхленного, легко аэрируемого грунта, способствующего ускорению коррозионных процессов.

Альтернативные методы ремонта

Предлагаемые ниже методы направлены на снижение сил трения между трубопроводом и окружающим грунтом при вытягивании трубы по направлению ее оси.

Метод параллельного бурения

Метод основан на бурении параллельных скважин методом наклонно направленного бурения (рис. 4), что позволит уменьшить силы трения, возникающие между трубопроводом и землей. Скважины бурятся параллельно ремонтируемому трубопроводу. Количество вспомогательных скважин определяется по расчету.

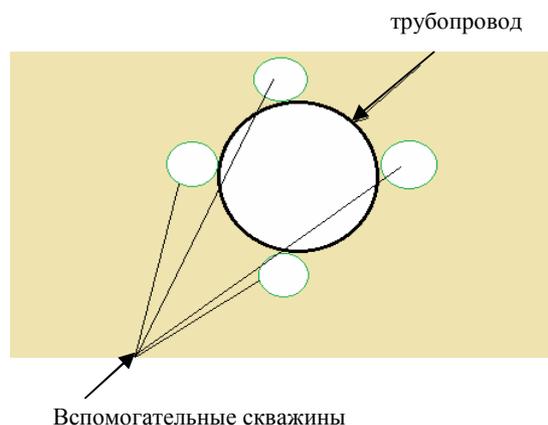


Рисунок 4. – Метод параллельного бурения

Преимущества метода параллельного бурения:

- использование типового оборудования (установка наклонно направленного бурения);
- не загрязняет окружающую среду;
- значительное снижение трения вытаскиваемого, подлежащего ремонту трубопровода;
- возможность прокладки трубопровода большего диаметра;
- не нарушается движение транспорта, т.е. возможно применение данного метода в условиях плотной городской застройки.

Недостатки метода параллельного бурения:

- большие затраты за счет использования установки наклонно направленного бурения;
- большие затраты времени на проведение работ;
- высокие требования к точности осуществления бурения.

Метод вибрационного разрушения окружающего грунта

Метод основан на воздействии на трубопровод специального оборудования с целью передачи вибрационных колебаний, позволяющих осуществить уплотнение грунта вокруг уложенного трубопровода и, следовательно, расширить диаметр скважины, в которой находится трубопровод, что снизит трение между трубопроводом и грунтом при вытягивании плети из скважины.

Преимущества метода вибрационного разрушения окружающего грунта:

- не загрязняет окружающую среду;
- создание вокруг трубопровода скважины со стенками из переуплотненного грунта;
- возможность применения данного метода в условиях плотной городской застройки, не нарушая движения транспорта.

Недостатки метода:

- необходимость использования специального оборудования;
- возможность отклонения оси будущего трубопровода от старого, что создает опасность для рядом проходящих коммуникаций;
- возможность разрывов стенки старого трубопровода при осуществлении вибрационного расширения скважины.

Метод механического отделения тела трубопровода от грунта

Суть данного метода заключается в установке на наружную часть трубопровода специального оборудования, которое сможет отделить тело трубопровода от грунта путем механического воздействия. В технологическом плане данный метод прост – специальное оборудование устанавливается на наружную стенку трубопровода, осуществляется запуск машины, которая отделяет стенку трубопровода от грунта на протяжении всей длины трубопровода.

Преимущества метода механического отделения тела трубопровода от грунта:

- возможность прокладки трубопровода большего диаметра;
- происходит существенное снижение сопротивления трению при вытаскивании старого и протаскивании нового трубопровода;
- не загрязняется окружающая среда;
- не нарушается движение транспорта, т.е. возможно применение данного метода в условиях плотной городской застройки.

Недостатки метода механического отделения тела трубопровода от грунта:

- необходимость использования специфического оригинального оборудования

Метод нагрева стенки трубопровода

Данный метод основан на нагреве стенок трубопровода до температуры плавления изоляции. Переходящая в пластическое состояние изоляция позволит уменьшить коэффициент трения между телом трубопровода и грунтом (рис. 5).



Рисунок 5. – Метод нагрева стенки трубопровода

Преимущества метода нагрева стенки трубопровода:

- не загрязняет окружающую среду;
- вокруг трубопровода создается слой расплавленного изоляционного покрытия, снижающего трение трубопровода о грунт;
- эффективность метода повышается с ростом толщины изоляционного покрытия (например, усиленный тип);
- не нарушается движение транспорта, т.е. возможно применение данного метода в условиях плотной городской застройки.

Недостатки метода нагрева стенки трубопровода:

- применим только для узкого перечня трубопроводов, имеющих определенное изоляционное покрытие (например, битумное, полиуретановое и т.д.);
- необходимо полное опорожнение трубопровода;
- требуется одновременный нагрев трубопровода по всей длине;
- необходим подогрев стенки трубы до температур свыше 100 °С (130...160 °С), что приводит к вскипанию окружающей трубопровод грунтовой воды;
- требуется специальное оборудование;
- существенные тепловые затраты, из-за чего способ более рационально применять для сверхкоротких трубопроводов.

Таким образом, можно сделать *вывод*, что предложенные методы более эффективны при использовании технологии «коротких» или «длинных» трубопроводов.

Технология «коротких» и «длинных» трубопроводов

Суть технологии заключается в механическом воздействии на трубопровод с помощью механизированной техники (в качестве примера можно использовать бульдозер). Разделим трубопроводы, проложенные методом наклонно направленного бурения, на две категории:

- первая категория будет условно называться *«короткие» трубопроводы*. При ликвидации «коротких» трубопроводов необходимо трубопровод разделить на две части в точке, которая имеет наибольшее заглубление относительно земли;

- вторую категорию условно назовём *«длинные» трубопроводы*. При ликвидации «длинных» трубопроводов, необходимо трубопровод разделить на три и более части.

Выбор одной из этих категорий влияет только на способ соединения тягового троса со стенкой трубопровода. Выбор категории трубопровода выполняется при помощи расчета, определяющего требуемое усилие для вытягивания трубы из скважины.

Заключение. На основе выполненного анализа существующих методов ликвидации трубопроводов, проложенных методом наклонно направленного бурения, выявлены преимущества и недостатки каждого из существующих методов. Предложены альтернативные методы ликвидации трубопроводов, проложенных методом наклонно направленного бурения. Выявлены преимущества и недостатки каждого из альтернативных методов. Для повышения эффективности предложенных альтернативных методов рассмотрена технология «коротких» и «длинных» трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. DVN-STROY [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.dvn-stroy.ru/>. – Дата доступа: 25.04.2016.
2. Автобур ГНБ [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://gnb32.ru/technology-gnb.html>. – Дата доступа: 25.04.2016.
3. Сооружение подводных трубопроводов: учеб. пособие для вузов / Б.В. Самойлов [и др.]. – М. : Недра, 1995. – 304 с.
4. ООО Микрошит [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.beztranshey.ru/bestranshtech/metodsanac>. – Дата доступа: 25.04.2016.

Поступила 17.05.2016

THE WORKING OUT METHODS OF ELIMINATION PIPELINES BY DIRECTED DRILLING

A. KULBEI, D. KISIALIOY

The problem of pipelines elimination by directed drilling under natural and artificial barriers are examined in this article. The modern methods of pipelines elimination are analyzed. The authors analyze their and formulate advantages and disadvantages. The alternative methods of pipelines elimination are suggested. The advantages and disadvantages of alternative methods are discovered.

Keywords: *pipeline, clearing, directional drilling, ground, alternative ways.*

УДК 621.643

**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ
ПО ОЧИСТКЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ ОТ ОСТАТКОВ НЕФТИ**

*канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЁНОК; В.О. КАЗМИРКИВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Представлен анализ методов и предложений по организации работ и технологии очистки от остатков нефти и асфальтосмолопарафиновых отложений с внутренней поверхности магистральных нефтепроводов. Разработаны критерии соблюдения технологии выполняемых работ, обобщены требования. По результатам анализа предложены способы по их организации. Раскрыты основные аспекты проблемы, предложены варианты решения. Показана актуальность рассматриваемого вопроса. Предложены меры по улучшению технологии очистки, направленные на увеличение качества очистки, экономической эффективности и снижение времени технологических операций.

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, очистка нефтепроводов от остатков нефти и отложений, варианты решения проблемы.

В 2007 году компания «Транснефть» завершила часть проекта «Север», целью которого было создание новой трубопроводной системы по транспортировке и отгрузке экспортных нефтепродуктов. Магистраль прошла по территориям Владимирской, Ивановской, Ярославской, Тверской, Новгородской, Ленинградской областей. Ее протяженность 1056 км. Строительство всех объектов нефтепровода обошлось почти в 31 млрд руб., из них около 7,5 млрд было вложено в создание перегрузочных мощностей в порту «Приморск», который стал первым в России морским терминалом по наливу светлых нефтепродуктов.

В 2011 году была принята программа модернизации российских нефтеперерабатывающих заводов и ввода новых мощностей вторичной переработки нефти, которая предполагала качественный скачок в развитии отрасли. В результате действия программы увеличились объемы производства нефтепродуктов и объемы их экспорта. Если в 2012 году в направлении порта «Приморск» было перекачено 6,5 млн тонн топлива, то в 2013-м – уже 9,3 млн. Через год благодаря применению противотурбулентных присадок нефтепродуктопровод превысил свои проектные мощности на 2,9 млн тонн.

Как видим, в результате модернизации будет увеличиваться производство качественных светлых нефтепродуктов, следовательно, понадобится больше трубопроводных мощностей для их транспортировки на экспорт через российские терминалы. Перед ОАО «Транснефть» поставлена задача по обеспечению этих мощностей [1].

Решить эту задачу можно двумя способами: первый способ – построить новый нефтепродуктопровод, а следовательно, создать новую инфраструктуру и перекачивающие станции; второй способ – использовать имеющуюся нефтепроводную инфраструктуру, максимально адаптировав её под перекачку нефтепродуктов, проведя зачистку внутренней полости трубы. Этот способ оказался наиболее быстрым и экономически выгодным.

Учитывая опыт, полученный в ООО «Балтнефтепровод» при реализации проекта «Развитие системы магистральных нефтепроводов для увеличения поставок нефтепродуктов в порт “Приморск” до 15 млн тонн в год»: перевод магистрального нефтепровода Ярославль – Кириши и Кириши – Приморск к перекачке дизельного топлива, проведен анализ технологии очистки от остатков нефти и асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) с внутренней поверхности магистральных нефтепроводов Ярославль – Кириши (Ду700 участок 525,4...546 км) и «Кириши – Приморск» (Ду700 участок 546...804,8 км). В результате при разработке нормативно-технической документации были внесены предложения по организации работ при проведении очистки от остатков нефти и АСПО с внутренней поверхности нефтепроводов.

Согласно утвержденным ООО «НИИ ТНН» предложениям и рекомендациям по очистке полости нефтепровода от нефти использовалась следующая технология, состоящая из 3-х этапов:

1-й этап – очистка внутренней поверхности магистрального нефтепровода растворителем:

- запуск двух поролоновых литых поршней (ППЛ) и очистных скребков поршня-разделителя внутритрубного (ПРВ1) (№ 1) на 3 км вперед;
- формирование пробки растворителя: ПРВ1 (№ 2) – пробка растворителя – ПРВ1 (№ 3) – пробка растворителя – ПРВ1 (№ 4) согласно рисунку 1;
- запуск пробки из конечной точки очищаемого участка в начальную со скоростью не более 0,7 км/ч и созданием противодавления не менее 2,0 кгс/см², но не более 4,0 кгс/см²;
- прием ППЛ (№ 1), ППЛ (№ 2) и ПРВ 1 (№ 1) в начале очищаемого участка;
- прием объединенной пробки растворителя в начале участка;

- пропуск пробки (реверсом) в обратном направлении;
- прием объединенной пробки на конце участка.

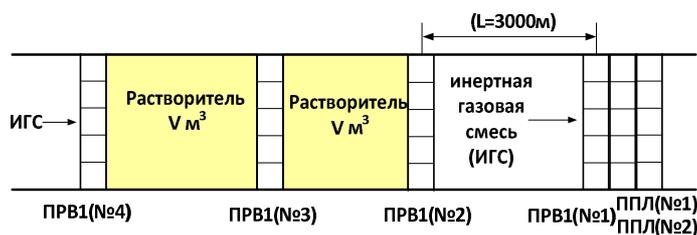


Рисунок 1. – Пробка растворителя согласно 1-му этапу очистки

При учете неравномерности движения пробки растворителя, связанного с одновременным удалением из нефтепровода герметизирующих устройств (ГРК), необходимо дополнительно прогнать использованный растворитель (после реверса), не извлекая его в начальной точке участка, перед пробкой абсорбционного дизельного топлива ДТ № 1.

2-й этап – прокачка абсорбционной партии дизельного топлива

Очистка внутренней поверхности магистрального нефтепровода от остатков растворителя и АСПО абсорбционной партии дизельного топлива должна проводиться тремя циклами.

Первый цикл:

- перед пробкой абсорбционного ДТ (№ 1) запустить использованную пробку растворителя (после реверса) на 3 км вперед, затем на 3 км вперед запустить пробку ДТ (5 м³), ограниченную двумя ПРВ. Схема формирования: ПРВ1 (№ 1) – растворитель – ПРВ1 (№ 2) – растворитель – ПРВ1 (№ 3) – 3 км – ПРВ1 (№ 4) – ДТ 5 м³ – ПРВ1 (№ 5) – 3 км – ПРВ1 (№ 6) – ДТ – ПРВ1 (№ 7) – ДТ – ПРВ1 (№ 8) (рис. 2);
- прогон абсорбционной пробки ДТ из конечной точки очищаемого участка в начальную со скоростью 0,7...1,0 км/ч;
- прием пробки растворителя и абсорбционного ДТ (№ 1) в начале очищаемого участка;
- утилизация пробки растворителя и 5 м³ абсорбционного ДТ в поток нефти;
- основную пробку абсорбционного ДТ пропустить реверсом;
- прием пробки абсорбционного ДТ № 1 в конце очищаемого участка.

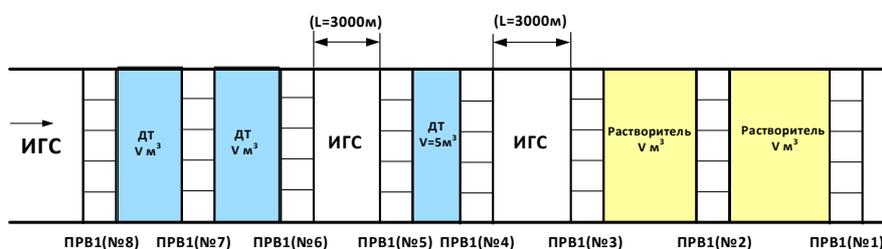


Рисунок 2. – Абсорбционная пробка ДТ № 1

Второй и третий циклы:

- перед запуском пробки абсорбционного ДТ (№ 2 и № 3) запустить два ПРВ1 на 5 км вперед. Схема формирования представлена на рисунке 3: ПРВ1 (№ 1) – 1 км – ПРВ1 (№ 2) – 5 км – ПРВ1 (№ 3) – ДТ – ПРВ1 (№ 4) – ДТ – ПРВ1 (№ 5);
- прогон пробки абсорбционного ДТ (№ 2 и № 3) из начальной точки очищаемого участка в конечную со скоростью 1,2...1,5 км/ч;
- прием пробки абсорбционного ДТ (№ 2 и № 3) в конце очищаемого участка.

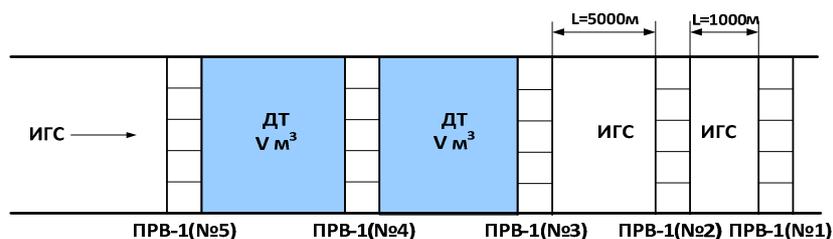


Рисунок 3. – Абсорбционная пробка дизельного топлива (№ 2 и № 3)

3-й этап очистки – прокачка контрольной партии дизельного топлива

Время между прокачкой абсорбционной и контрольной партий ДТ не лимитируется.

- перед запуском пробки контрольного ДТ запустить четыре ПРВ вперед. Схема формирования (рис. 4): ПРВ1 (№ 1) – 1 км – ПРВ1 (№ 2) – 1 км – ПРВ1 (№ 3) – 3 км – ПРВ1 (№ 5) – ДТ – ПРВ1 (№ 6);
- прогон контрольной пробки ДТ из начальной точки очищаемого участка в конечную со скоростью 0,4...0,6 км/ч;
- прием пробки контрольного ДТ (№ 1) в начале очищаемого участка;
- отбор проб контрольной партии ДТ в конце участка из установленного пробоотборника в начале, середине и конце очищаемого участка.

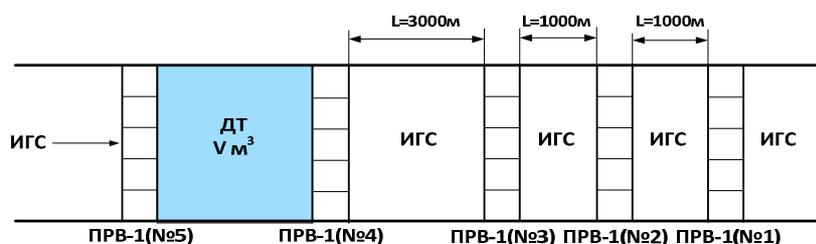


Рисунок 4. – Контрольная пробка дизельного топлива

Принятая в конце очищаемого участка контрольная партия дизельного топлива может применяться в качестве абсорбционной для следующего очищаемого участка при условии соответствия выбранных показателей качества установленным требованиям:

- содержание серы менее 10 мг/кг – использование как абсорбционное ДТ № 2 на любых следующих участках;
- содержание серы от 10 до 50 мг/кг – использование как абсорбционную партию дизтоплива на любых следующих участках.

Для успешной реализации проекта, а именно очистки от остатков нефти и удаления пристенных отложений с внутренней поверхности магистрального нефтепровода, необходимо обеспечить выполнение **особых условий** – в связи с особенностями технологического процесса по химической очистке внутренней полости нефтепровода от АСПО и в соответствии с рекомендациями ООО «НИИ ТНН» необходимо **соблюдение скоростных режимов движения пробки химического реагента и дизельного топлива** (абсорбционных и контрольных партий).

1. Увеличение производительности мобильной компрессорной азотной установки для выхода на рекомендуемую скорость движения пробки абсорбционных партий дизельного топлива 1,2...1,5 км/ч

При распределении имеющихся азотных установок по участкам необходимо руководствоваться рекомендациями ООО «НИИ ТНН» по скоростному режиму пробки и, безусловно, обеспечивать соответствие указанным в них параметрам, отклонение от которых может привести к нарушению технологии.

Следование технологии, согласованной с ООО «НИИ ТНН» и указанной в методике, в части скорости движения пробки обеспечит:

- производительность азотных установок (рис. 5) не менее 65 м³/мин (рассчитывается исходя из противодавления не менее 2 кг/см², но не более 4,0 кгс/см²);
- жесткое соблюдение скорости пробки при каждом пропуске в пределах от 1,2 до 1,5 км/ч (абсорбционные партии ДТ);

- необходимое время контакта химического реагента с внутренней поверхностью нефтепровода. Так как средняя скорость не позволяет его определить, то необходимо производить фиксацию и регистрацию параметров (рис. 6) работы азотных установок, таких как: расход азота; концентрация кислорода; скорость движения; давление в точке подачи азота; дистанция прохождения пробки L (м); мгновенная скорость пробки на время предоставления информации; средняя скорость от последнего времени предоставления информации; средняя скорость от времени запуска пробки. Для этого требуется установить на азотных установках оборудование, позволяющее производить фиксацию и регистрацию параметров при движении пробки. Эти значения должны фиксироваться как в режиме он-лайн, так и в усредненном значении на каждый пропуск. Оборудование, входящее в состав азотных установок, позволяет мгновенно корректировать движение пробки и избежать разрушения сформированной пробки. Отсутствие данного оборудования и программного обеспечения в составе азотных установок ставит под вопрос возможность соблюдения скорости движения партий химреагента, абсорбционных и контрольных партий дизельного топлива (Евро-5, сорт С, вид III) согласно рекомендациям НИИ ТНН;

- обязательное наличие резервных азотных установок на случай выхода из строя имеющихся.



Рисунок 5. – Мобильная компрессорная азотная установка МКАУ-25/13 С-95 (а); передвижная азотная компрессорная станция ПКСА-9/200 (б)

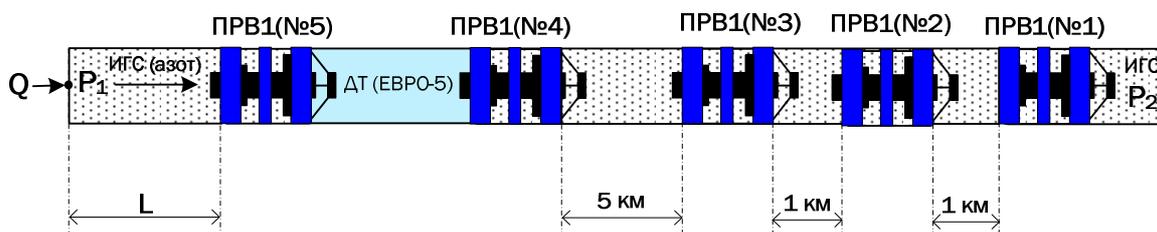


Рисунок 6. – Основные параметры при движении партий дизельного топлива:
 Q – расход азота, м³/мин; P_1 – давление в точке закачки, кгс/см²;
 P_2 – противодействие, не менее 2,0 кгс/см²; L – дистанция прохождения пробки, м;
 U – средняя скорость от времени запуска прохождения пробки

Автоматизация систем управления технологическими процессами обеспечивает дистанционное и автоматическое управление агрегатами (регулирование расхода и давления, регулирование чистоты азота), регистрацию, хранение, передачу и визуализацию информации о работе агрегатов (давления, расходы, и т.д.).

2. Возможность использования отработанного химического реагента при очистке трубопроводной обвязки камеры пуска и приема средств очистки и диагностирования (КПП СОД)

Количество необходимого химического реагента производит ООО «НИИ ТНН» по результатам проведенных лабораторных исследований в зависимости от длины участков, степени насыщения реагента, минимального времени контакта с внутренней стенкой трубы, обеспечивающего качество удаления остатков нефти и АСПО.

После окончания всех этапов очистки внутренней полости магистрального нефтепровода (рис. 7) при прогоне пробки с химическим растворителем объема принятой партии отработанного растворителя достаточно для заполнения им трубопроводной обвязки для промывки, в том числе промывки линейных задвижек и дренажных линий узла камер пуска-приема СОД.



Рисунок 7. – Пробка растворителя последнего этапа очистки

После приема контрольной партии ДТ, разработав мероприятия по промывке обвязки КПП СОД дизельным топливом, включающим в себя предварительную пропарку отводов камер СОД, дренажных линий, напорных линий погружных насосов, механическую очистку внутренней полости емкостей, требуется провести комплекс работ по проверке качества очистки узлов КПП СОД на соответствие показателей качества ДТ требованиям, установленным стандартом, техническим условиям. Эти работы играют немаловажную роль в определении количества некондиционного топлива, принимаемого в конечной точке после заполнения магистрального нефтепровода.

3. Увеличение противодействия до 4 кгс/см² на момент пуска пробки

Согласно рекомендациям ООО «НИИ ТНН» для очистки внутренней поверхности магистрального нефтепровода от АСПО необходимо обеспечить контакт растворителя с АСПО, отложившимися на внутренней поверхности нефтепровода. Величина противодействия должна быть не менее 2,0 кгс/см², но не более 4,0 кгс/см². Схема регулировки представлена на рисунке 8.

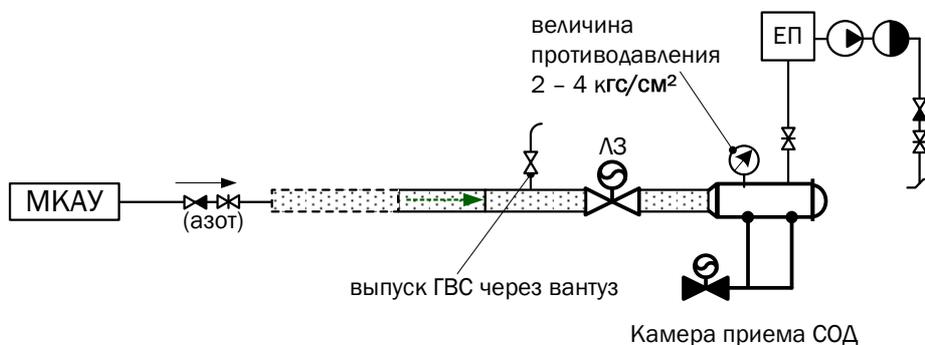


Рисунок 8. – Регулировка величины противодействия

После прогона каждой предыдущей партии реагента или дизельного топлива остаточное давление в участке магистрального нефтепровода составляет порядка 4...6 кгс/см².

Проанализировав основные параметры работы азотных установок при проведении очистки от АСПО участков МН «Ярославль – Кириши» (525,4...546 км) и МН «Кириши – Приморск» (546...805 км) определено, что скорость движения очистных устройств в МН зависит не только от производительности МКАУ, но и от интенсивности снижения (сравливания) противодействия в конечной (приемной) точке.

При величине противодействия 4 кгс/см² на момент пуска пробки интенсивность сравливания давления выше, нежели при 2 кгс/см², что способствует искусственному подтягиванию пробки. Таким образом, очистные устройства движутся более равномерно и стабильно напрессовывают противодействие.

Стоит отметить, что особенно важно осуществлять такой метод пропуска абсорбционных партий дизельного топлива по участкам магистрального нефтепровода, где требуется большая средняя скорость 1,2...1,5 км/ч, при этом уменьшается время прогона партии по участку, следовательно, снижается средний расход топлива на работу азотных установок.

4. Двойной реверс пробки с химическим реагентом Petro Vic2

Согласно рекомендациям ООО «НИИ ТНН» партия с химическим реагентом после реверса пробки должна быть запущена без выемки повторно с абсорбционной партией ДТ № 1. С учетом неравномерности хода (скачков движения) очистного устройства необходимо производить двойной реверс пробки с химическим реагентом Petro Vic2. Так можно добиться эффекта полного контакта со стенками трубы по всей длине участка магистрального нефтепровода.

Предложение заключается в повторном пропуске растворителя в прямом и реверсивном направлении, осуществив полный цикл пропуска без первой абсорбционной партии ДТ.

5. Увеличение числа очистных устройств в абсорбционных и контрольных партиях дизельного топлива

По рекомендациям ООО «НИИ ТНН» внести вместо двух пропусков абсорбционных пробок с дизельным топливом с реверсивным движением пропуск трех пробок абсорбционного дизельного топлива без реверсивного движения. Партии с абсорбционным и контрольным ДТ пропускаются по участкам, имея в конце движения только ПРВ1 – последний в пробке с ДТ.

Необходимо запускать дополнительные очистные устройства за основной пробкой с дизельным топливом для доудаления остатков продукта на стенке трубопровода и объема частично перепускаемого продукта при пропуске предыдущих пробок.

Также перед запуском всех пробок абсорбционного ДТ необходимо предусмотреть возможность очистки камер пуска всех участков от остатков отложений, механических примесей и других продуктов, оставшихся после пропусков предыдущих пробок.

6. Возможность отказаться от врезки и последующей врезки временных линейных задвижек и вантузов

Имеющаяся технология предполагает врезку временных вантузов и линейных задвижек, используемых для формирования пробок с химическим реагентом и дизельным топливом. Возможно отказаться

от врезки и последующей вырезки временных линейных задвижек и вантузов, так как это предполагает большие экономические затраты и увеличение времени технологических операций.

Как показала практика по пропуску итоговых контрольных партий по МН «Кириши – Приморск» (546...805 км), выпуск инертной газовой смеси (ИГС), отбор проб, заливку ДТ возможно осуществлять через КПП СОД, используя дренажную трубопроводную обвязку камер СОД, отборы давления, взрывозащищенные насосы с обратным клапаном для закачки ДТ, МКАУ для формирования пробок с ДТ.

7. Усовершенствование линии для подключения азотных установок

Немаловажной задачей является снижение времени технологических операций. Предлагаемая схема оборудования камер СОД (рис. 9) дает возможность обойтись без остановки закачки азота в магистральный нефтепровод, тем самым, запустив очередное очистное устройство, возможно производить запасовку следующего, закрыв секущую задвижку камеры СОД, и одновременно осуществлять прогон запущенного ПРВ1 на необходимую дистанцию в трубопроводе.

Данная схема также позволяет использовать камеру СОД в качестве камеры приема при осуществлении реверсивного движения пробок с химическим реагентом и абсорбционной партией ДТ.

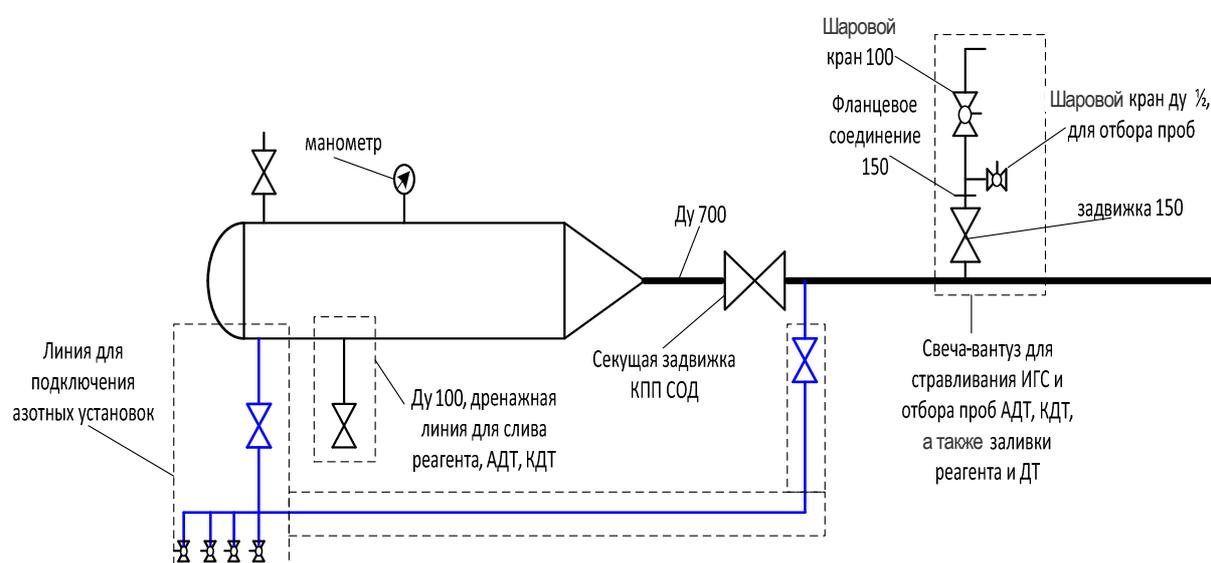


Рисунок 9. – Предлагаемая схема камер средств очистки и диагностирования

8. Утилизация принятых асфальтосмолопарафиновых отложений

Чтобы исключить возможность нанесения ущерба окружающей среде, необходимо проводить своевременную утилизацию принятых АСПО, имеющих сложный физико-химический состав. Работа по утилизации нефтешламов – необходимая мера для защиты экологии от загрязнения почвы, грунтовых вод и воздуха. Переработку и утилизацию АСПО с внутренней поверхности трубопровода следует производить эффективными и экологически безопасными технологиями с применением специализированного оборудования и безотходной технологии очистки и утилизации.

При приеме очистных устройств необходимо учитывать тот факт, что отложения могут включать в себя остатки химического реагента.

Растворитель представляет собой горючую жидкость и относится к легковоспламеняющимся жидкостям, при работе с ним должны выполняться требования пожарной безопасности. При работе с растворителем (как и с его остатками) необходимо применять средства индивидуальной защиты. Для защиты рук применяют перчатки по ГОСТ 12.4.010, для защиты ног – обувь по ГОСТ 12.4.137, защитные костюмы, для защиты органов дыхания – респираторы РПГ-67 с патроном марки А.

К работе с растворителями допускаются: лица, обученные в соответствии с ГОСТ 12.0.004, РД 03-19-2007, РД 03-20-2007 безопасным методам выполнения работ и оказанию первой помощи пострадавшим на производстве; прошедшие инструктаж по охране труда и пожарной безопасности; обученные пожарно-техническому минимуму; прошедшие стажировку на рабочем месте, проверку знаний требований охраны труда, промышленной и пожарной безопасности.

Заключение. Все вышеизложенные предложения по организации работ при проведении очистки от остатков нефти и асфальтосмолопарафиновых отложений с внутренней поверхности магистральных

нефтепроводов направлены на увеличение качества очистки, экономической эффективности и снижение времени технологических операций и могут быть использованы при разработке нормативно-технической документации данного вида работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Р.А. Алиев [и др.]. – М. : Недра, 1972.
2. Использование внутритрубных снарядов на трубопроводах // Трубопроводный транспорт нефти. – 1996. – № 12. – С. 14–18.
3. Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава : ГОСТ 2177-99 / Гос. ком. Рос. Федерации по стандартизации, метрологии. – Введ. 01.01.2001.
4. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб: межгосударственный стандарт : ГОСТ 2517-2012. – М. : Стандартинформ, 2014.
5. Регламент очистки магистральных нефтепроводов от асфальтосмолопарафиновых веществ (АСПВ) : ОР-75.180.00-КТН-018-10 (отраслевой регламент ОАО «Транснефть»).
6. Освобождение нефтепроводов от нефти при выводе из эксплуатации для последующей консервации, перевода в безопасное состояние, демонтажа : РД-75.180.00-КТН-060-13.
7. Правила безопасности при эксплуатации магистральных нефтепроводов : РД-13.110.00-КТН-319-09.
8. Правила пожарной безопасности на объектах организаций системы «Транснефть» : РД-13.220.00-КТН-211-12.

Поступила 04.02.2016

STANDARD TECHNICAL BASE WHILE CONDUCTING REFINING WORKS OF MAIN PIPELINES FROM OIL LEFTOVERS

L. SPIRIDENOK, V. KAZMIRKIVSKI

The given article represents an analysis of methods and suggestions for organizing works and technologies of refining the inner surface of main pipelines from oil leftovers and asphaltene precipitates. The abundance criteria of the working technologies are developed; the generalization of requirements to the work organizing of refining the inner surface of main pipelines from oil leftovers and asphaltene precipitates is held. As a result of the analysis, recommendations for work organizing are given. Here come the main aspects of problems and variants of solutions are put forward. In the article, one may find the topicality of the problem. The article proposed measures to improve the treatment technologies which are aimed at increasing of treatment quality, economic efficiency and reducing of time of technological operations. Keywords: trunk pipeline, oil pipelines cleaning from oil residues and deposits the solutions to the problem.

Keywords: *trunk pipeline, oil pipelines cleaning from oil residues and deposits the solutions to the problem.*

УДК 614.842.615

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ТУШЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ
ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПОДСЛОЙНОГО СПОСОБА****С.М. МАЛАШЕНКО***(Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь, Минск);**канд. техн. наук, доц. О.О. СМИЛОВЕНКО**(Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск)*

Демонстрируется разработанный авторами способ подслоного тушения с использованием оперативной врезки в технологический трубопровод резервуара с нефтепродуктом для вертикальных стальных резервуаров объемом 500...5000 тонн, не оборудованных стационарно смонтированными пенопроводами. Разработана математическая модель и метод имитационного компьютерного моделирования процесса движения пены при подслоном тушении резервуаров, позволяющий исследовать данный процесс с учетом реально существующего дрейфа параметров тушения и прогнозировать время тушения. Разработана методика выбора режимных параметров тушения. Определены значения режимных параметров тушения, обеспечивающих заданные временные показатели (критерии) тушения для резервуара емкостью 2000 тонн, заполненного бензином.

Ключевые слова: резервуар, пожар, воздушно-механическая огнетушащая пена, подслоный способ тушения нефти и нефтепродуктов, время тушения, математическая модель.

Хранение нефти и нефтепродуктов осуществляется на специализированных предприятиях – нефтехранилищах – в специальных емкостях, резервуарах. Благодаря своим конструктивным особенностям топливные резервуары являются наиболее эффективным из них для хранения как темных, так и светлых нефтепродуктов или нефти. Применяются резервуары металлические, железобетонные, из синтетических материалов [1]. Наиболее распространенными являются цилиндрические емкости. Так, например, на сегодняшний день в России насчитывается парк резервуаров для нефтепродуктов общей емкостью около 100 млн. тонн [2].

Несмотря на определенный прогресс, достигнутый в обеспечении пожарной безопасности, на интенсивную разработку и применение комплекса мер по предотвращению и ликвидации пожаров, проблемы защиты резервуаров остаются нерешенными, о чем свидетельствуют происходящие за рубежом и в странах СНГ пожары, наносящие огромный ущерб действующим предприятиям.

Так, например, на нефтеперерабатывающем заводе «Коноко» в северной Англии в 2001 году произошел сильный взрыв, после которого территорию предприятия охватил обширный пожар. На тушении пожара были задействованы 15 расчетов пожарной охраны, но пожар удалось локализовать лишь спустя 8 часов, а 80 пожарных все еще продолжали борьбу с огнем [3].

На севере Японии в 2002 году возник сильный пожар на крупном нефтеперерабатывающем предприятии. Завод одной из крупнейших японских нефтяных компаний «Idemitsu», расположенный на острове Хоккайдо, ежедневно перерабатывает около 140 000 баррелей нефти. Огонь охватил резервуар с нефтью и вскоре перекинулся на соседние строения, но через два с половиной часа распространение огня удалось взять под контроль. В тушении участвовали 15 пожарных расчетов.

В 2003 году в резервуаре с 20 м³ бензина на нефтеперерабатывающем заводе в Гданьске вспыхнул пожар, погибли 3 сотрудника завода, которые проверяли качество бензина в резервуаре. Пожар был ликвидирован на следующий день. Потушить огонь удалось благодаря «пенной атаке» на горящий резервуар. В тушении огня были задействованы 32 пенные пушки, каждая из которых одновременно могла подавать от 1600 до 5000 л пены.

В декабре 2005 года произошло три взрыва с последующим горением на нефтехранилище Bansfield, расположенном к северу от Лондона. Bansfield – пятое по величине нефтехранилище Великобритании, в котором содержится до 5% всех нефтепродуктов страны. Более 60 часов продолжалась борьба с огнем в 20 основных резервуарах с топливом.

В марте 2009 года в Мозыре (Беларусь) на территории парка светлых нефтепродуктов ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» концерна «Белнефтехим» произошел пожар в стальном резервуаре объемом 10 тыс. куб. метров для хранения бензина. В резервуаре находилось 3 тыс. литров бензина марки АИ-92. Тушение продолжалось более суток [2].

Основная часть. Приведенные факты свидетельствуют о том, что тушение пожаров в резервуарах подачей пены на горящую поверхность является продолжительным и затратным. При этом экономические потери растут каждую минуту за счет выгорания нефтепродукта и расхода огнетушащих средств.

Задача минимизации времени тушения является актуальной как с точки зрения материальных затрат, так и с точки зрения обеспечения безопасности пожарных расчетов, участвующих в тушении. Усовершенствование и доработка уже существующей технологии *подслоного тушения пожаров* сможет решить упомянутую выше задачу и сделать производственные объекты безопаснее.

Основные преимущества подслоного тушения состоят в следующем. Оперативность тушения пожара в резервуаре обеспечивается образованием на поверхности воспламенившегося продукта негорючей пленки. Пленка характеризуется способностью к самозатягиванию и образуется из всплывших на поверхность мелких пузырьков пены. В результате пленка перекрывает доступ кислорода к месту пожара.

Поскольку пена подается в нижний холодный слой продукта в резервуаре, эффективность подслоного тушения не зависит от времени развития пожара.

Подслоное тушение обеспечивает резкое снижение температуры воспламенившегося продукта в резервуарах и не теряет эффективности даже при нарушении конструкции резервуара вследствие пожара (сварачивании стенки, обрушении крыши, деформации понтона).

Разработано устройство оперативной врезки (рис. 1) и способ подачи огнетушащих растворов в резервуар с горящим слоем легковоспламеняющейся жидкости, не оборудованный стационарно смонтированным пенопроводом для тушения. Устройство оперативной врезки интегрированное (УОВИ) предназначено для выполнения отверстий в технологических коммуникациях и последующей подачи огнетушащей воздушно-механической пены низкой кратности. Привод УОВИ – пневматический. Режущий инструмент – корончатая фреза диаметром 80 мм с твердосплавными пластинами. Подача/отвод фрезы – производится вручную. На устройство оперативной врезки получен патент Республики Беларусь [4].

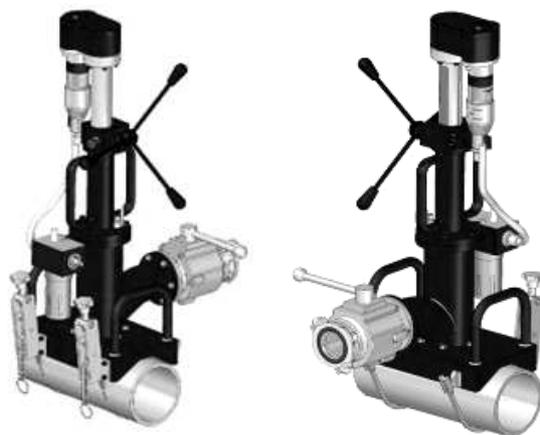
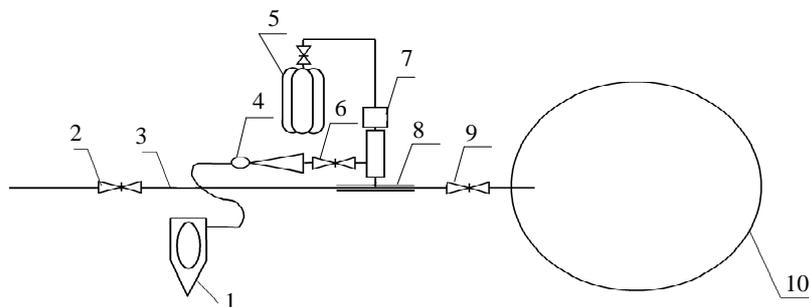


Рисунок 1. – Устройство оперативной врезки интегрированное

На рисунке 2 приведена принципиальная схема реализации способа подачи воздушно-механической огнетушащей пены в резервуар через действующий продуктопровод с помощью УОВИ.



- 1 – пожарный аварийно-спасательный автомобиль; 2, 6, 9 – шаровой кран (задвижка);
3 – действующий продуктопровод; 4 – высоконапорный генератор пены;
5 – источник сжатого воздуха; 7 – устройство врезки; 8 – бандаж; 10 – резервуар

Рисунок 2. – Принципиальная схема реализации способа подачи воздушно-механической огнетушащей пены в резервуар через действующий продуктопровод

Устройство врезки монтируют на действующий трубопровод. На входном патрубке устройства врезки устанавливают высоконапорный генератор пены. Прокладывают рукавную линию от пожарно-

го аварийно-спасательного автомобиля к высоконапорному генератору пены. Осуществляют врезку в действующий трубопровод. По окончании врезки открывают задвижку и от пожарного аварийно-спасательного автомобиля через высоконапорный генератор подают воздушно-механическую огнетушащую пену в резервуар.

Для разработанного устройства и способа актуальной задачей является определение оптимальных условий подачи пены к месту горения, что требует разработки модели, описывающей гидродинамику пены.

Время тушения при реализации способа подслоного тушения может быть формально разделено на три этапа: время движения пены в технологическом трубопроводе; подъем пены в резервуаре; растекание по поверхности нефтепродукта до полного ее покрытия и прекращения горения.

Время прохождения пены по технологическому трубопроводу до выхода в резервуар определяется скоростью ее движения, значением расхода, то есть характеристиками оборудования. При расчете времени подъема пены нас интересует время достижения поверхности нефтепродукта первой порцией пены, то есть момент начала процесса растекания ее по поверхности. Затем процессы подъема пены в резервуаре и растекания по поверхности идут параллельно и одновременно. Время растекания пены по поверхности горения описано выражением, приведенным в трудах А.Ф. Шароварникова [5]. Таким образом, суммируя время движения огнетушащей пены на всех трех этапах – движение по трубопроводу от места врезки до резервуара, подъем в резервуаре и растекание по поверхности нефтепродукта – получим полное время тушения. Суммарное время является основным критерием эффективности тушения.

Разработанная математическая модель описывает движение пены на трех этапах и связывает между собой характеристики процесса подслоного тушения, свойства нефтепродукта, внешние влияющие факторы, принятые за параметры, и время тушения как важнейший показатель эффективности процесса, принятый за критерий [6]. Такая модель позволяет рассчитывать время тушения.

Однако при выполнении расчетов на базе детерминированных моделей реально существующее явление разброса параметров не принимается во внимание. Это приводит к несоответствию расчетных и фактических выходных показателей процесса. Более эффективно решать такие задачи позволяют вероятностные методы расчета. Для этого построено девятимерное пространство параметров, учитывающее возможное изменение параметров при тушении.

Моделирование в полном пространстве параметров проведено путем зондирования пространства параметров пробными точками. Для заполнения девятимерного пространства параметров выбрано 2048 зондирующих точек, каждая из которых описывает состояние системы по девяти параметрам и трем критериям. Критерии являются взаимно независимыми величинами, однако в математические выражения для критериев входят одни и те же параметры. Для каждой точки (сочетания параметров) рассчитаны значения критериев.

Анализ значений критериев показывает, что время прохождения пены по трубопроводу изменяется в диапазоне от 0,57 до 2,55 с, что составляет 1...3% от суммарного времени движения пены, и весь полученный ряд значений данного критерия является допустимым для принятой при расчете длины трубопровода.

При увеличении расстояния от врезки до резервуара это время будет увеличиваться, достигая в среднем 5...8 с при врезке на расстоянии до 50 м от резервуара. Такая ситуация может сложиться при невозможности нормативного (сразу за обвалованием) расположения врезки, например, при позднем обнаружении пожара, совпадении направления ветра с направлением технологического трубопровода либо при частичном обрушении резервуара.

Расчетное время подъема пены в резервуаре составило 5,7... 25,0 с. При расчете учтено изменение плотности нефтепродукта, изменение диаметра струи пены при подъеме в резервуаре, изменение кратности пены и расхода раствора через пеногенератор. При натурном эксперименте на резервуаре РВС-2000, расположенном на территории ОАО «Нафтан», проведена апробация подслоного способа тушения с помощью устройства оперативной врезки и получено суммарное значение времени, включающее в себя время прохождения пены через трубопровод и время подъема пены в резервуаре. При выполнении эксперимента на резервуаре невозможно отделить время нахождения пены в трубопроводе. Суммарное среднее время (по данным эксперимента) составляет около 30 с, что соответствует значению, полученному при моделировании.

При изменении температуры окружающего воздуха изменяется плотность и вязкость нефтепродукта. Это изменение, судя по аналитическим формулам, описывающим движение пены на различных этапах, может повлиять на скорость подъема пены, а следовательно и на время подъема пены в резервуаре. Однако диапазон изменения плотности топлива, введенный в модель, полностью охватывает значения плотности бензина при температурах от -40 до $+40$ °С. В работах, посвященных исследованию свойств нефтепродуктов, и в нормативных документах на их производство плотности бензинов, дизельных топлив, керосинов и т.д. не приводятся в детерминированных значениях для каждой марки, а указан

диапазон, в котором допустимо изменение плотности [7]. При моделировании не выявлено существенного влияния данного параметра на временные критерии.

Далее был определен диапазон изменения критерия «время растекания пены по поверхности нефтепродукта». Изменяемые параметры: расход огнетушащего средства, кратность пены, коэффициент гидросопротивления и др. При моделировании получены следующие значения этого критерия 9,7–239,0 с. Максимальное время растекания получено при самом неблагоприятном сочетании параметров тушения. Полученные значения критериев сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Разброс значений критериев

Критерий	Минимальное значение, с	Максимальное значение, с
Время движения пены по трубопроводу	0,57	2,55
Время подъема пены в резервуаре	5,7	25,0
Время растекания пены по поверхности нефтепродукта	9,7	239,0

Чтобы обеспечить наибольшую эффективность тушения, необходимо минимизировать время. Это сделано путем введения ограничений на критерии и решения обратной задачи (определения оптимальных параметров) в ограниченном пространстве критериев.

На критерии наложены следующие ограничения (табл. 2):

- в 10%-ном диапазоне от минимальных значений критериев;
- в 25%-ном диапазоне от минимальных значений критериев;
- в 50%-ном диапазоне от минимальных значений критериев.

Значения критериев с учетом ограничений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Ограничения на критерии

Критерий	10%-ный диапазон	25%-ный диапазон	50%-ный диапазон
Время движения пены по трубопроводу	0,57...0,77	0,57...1,07	0,57...1,56
Время подъема пены в резервуаре	5,7...7,63	5,7...10,52	5,7...15,35
Время растекания пены по поверхности нефтепродукта	9,7...32,63	9,7...67,03	9,7...124,35

Анализ результатов моделирования в приведенных диапазонах критериев показывает, что первый (10%-ный) и второй (25%-ный) диапазоны не имеют практического значения, так как суммарное время тушения от 15,97 до 78,62 с может быть достигнуто при неоправданно большом расходе огнетушащего средства, высокой интенсивности подачи пены и пенном слое на поверхности нефтепродукта от 100 мм. Наиболее рациональным является третий диапазон. Однако в него были внесены коррективы, продиктованные следующими соображениями. Влияние времени прохождения пены через технологический трубопровод до резервуара при штатном расстоянии врезки по сравнению с другими критериями незначительно, диапазон изменения этого критерия до 1 с допустим. Процесс подъема пены в резервуаре наименее изучен, однако рассчитанное по предложенной математической модели время оказалось близким к экспериментальному (около 25 с). Для уменьшения общего времени тушения примем в качестве допустимого время подъема пены до 20 с.

Таким образом, определяем параметры подслоного тушения при следующих ограничениях на критерии:

- время движения пены в трубопроводе – до 1 с;
- время подъема пены в резервуаре – до 20 с;
- время растекания пены по поверхности – до 35 с.

При моделировании в ограниченном пространстве критериев установлено, что необходимо поддерживать значения управляемых параметров следующими:

- плотность пены – 237,8 кг/м³, то есть кратность 4,2 (допустимый разброс 3,7...4,6);
- расход пены 20,18 л/с (допустимый разброс 18,5... 21,3 л/с);
- оптимальная толщина слоя пены на поверхности нефтепродукта для тушения 54 мм (допустимый разброс 41... 62 мм).

Данные значения управляемых параметров обеспечивают заданное время тушения с вероятностью 99,9% при учете разброса остальных параметров.

Заключение. Разработан способ подслоного тушения с использованием оперативной врезки в технологический трубопровод резервуара с нефтепродуктом для вертикальных стальных резервуаров

объемом 500...5000 т, не оборудованных стационарно смонтированными пенопроводами при хранении нефтепродуктов с плотностью до 800 кг/м³.

Разработан метод имитационного компьютерного моделирования процесса движения пены при подслоном тушении резервуаров, позволяющий исследовать данный процесс с учетом реально существующего дрейфа параметров тушения и прогнозировать время тушения.

Разработана методика выбора режимных параметров тушения и определены значения параметров, обеспечивающих заданные временные показатели (критерии) тушения для резервуара емкостью 2000 тонн, заполненного бензином.

Разработанный метод имитационного моделирования может быть использован при определении времени тушения для резервуаров разного объема, при хранении различных топлив, изменяющейся степени заполнения резервуара, температуре окружающего воздуха и времени свободного горения до начала тушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Склады нефти и нефтепродуктов : СНБ 3.02.01-98. – Введ. 01.01.1999. – Минск : Минстройархитектура, 1998. – 46 с.
2. Кокорин, В.В. Проблемы эффективного тушения пожаров вертикальных стальных резервуаров в слой горючего / В.В. Кокорин, И.Н. Романова, Ф.Ш. Хафизов // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 3.
3. Описание пожара, произошедшего на нефтеперерабатывающем заводе «Коноко» в северной Англии 16.04.2001 [Электронный ресурс] / BBC World Service. – Режим доступа: http://news.bbc.co.uk/hi/russian/uk/newsid_1280000/1280560.stm. – Дата доступа: 20.03.2013.
4. Устройство оперативной врезки интегрированное : пат. 8559 Респ. Беларусь, МПК А 62 С 31/00 / В.К. Емельянов, В.М. Карач, О.В. Черневич, О.Д. Навроцкий, С.М. Малашенко ; заявитель Учреж. «НИИ пож. безоп. и проб. ЧС МЧС Респ. Беларусь». – и 20110944 ; заявл. 23.11.2011 ; опубл. 30.10.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5. – С. 183.
5. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шароварников [и др.]. – М. : Изд-во «Пожнаука», 2005. – 448 с.
6. Малашенко, С.М. Математическая модель движения пены при подслоном тушении нефтепродуктов / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. тр. двенадцатой междунар. науч.-техн. конф., Курск, 19–20 марта 2015 г. / Юго-Западный гос. ун-т ; редкол. : С.Г. Емельянов [и др.]. – Курск, 2015. – С. 27–31.
7. Гуреев, А.А. Применение автомобильных бензинов / А.А. Гуреев. – М. : Химия, 1972. – 368 с.

Поступила 18.02.2016

PREDICTION TIME FIGHTING TANKS WHEN APPLYING THE SUBSURFACE METHOD

S. MALASHENKO, O. SMILOVENKO

The subsurface extinguishing method using the operative cut-in integrated device in the industrial pipeline tank with oil products for vertical steel tanks with a capacity of 500...5000 tons, not equipped with fixed mounted foam wires was developed. The mathematical model and computer simulation method of the foam motion during subsurface extinguishing of tanks, which allows to investigate this process taking into account the actually existing drift of the extinguishing parameters and to predict extinguishing time, was developed. The method of selection of operating extinguishing parameters was developed. The values of operating extinguishing parameters, providing specified time indicators (criteria) of the extinguishing tank with a capacity of 2000 tons, filled with gasoline were defined.

Keywords: tank, fire, air and mechanical fire-extinguishing foam, subsurface extinguishing method of oil and oil products, extinguishing time, mathematical model.

УДК 621.646:006

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НОРМАТИВНОЙ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЁНОК;
Д.А. КИСЕЛЁВ; А.А. ГРИНЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается проблема изменения пространственного положения трубопровода под действием эксплуатационных нагрузок и вследствие естественных изменений ландшафта. Показаны известные методы восстановления нормативной глубины залегания участков магистральных трубопроводов. Приведены технические операции для каждого метода по восстановлению глубины залегания трубопровода. Проведен анализ выбора метода заглубления трубопровода при ремонте. Выявлены факторы, влияющие на выбор метода по восстановлению глубины залегания трубопровода. Используя выявленные факторы, предложено оптимизировать выбор метода ремонта.

Ключевые слова: *трубопровод, восстановление, залегание, грунт, засыпка, локальный участок.*

По территории Республики Беларусь трассы магистральных нефте- и продуктопроводов проложены в 6 технических коридорах общей протяженностью 1233 км. Общая протяженность всех магистральных нефтепроводов в одниточном исчислении составляет около 4000 км. Для магистральных нефтепроводов, которые проходят в северной и северо-восточной части республики (Унеча – Полоцк; Полоцк – Скрудалиена; Полоцк – Мажейкай; Сургут – Полоцк), характерно большое разнообразие ландшафтов, комплексность почвенного покрова и наличие значительного количества водных объектов. Для магистральных нефтепроводов в южной части республики (Унеча – Мозырь; Мозырь – Брест; Мозырь – Броды), характерно однообразие ландшафтов [1].

Республика Беларусь обладает также развитой системой магистральных газопроводов. В настоящее время поставку газа в Республику Беларусь и его транзит в третьи государства осуществляет ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». По территории страны проходят магистральные газопроводы, пересекающие страну с северо-востока на юго-запад. Газопроводы проходят по территории с разнообразным ландшафтом (болотные ландшафты, возвышенности, водные ландшафты) [2].

Основная часть. Предприятия по транспорту нефти и газа ежегодно осуществляют комплекс мер по диагностике, обслуживанию и реконструкции объектов газо- и нефтетранспортной системы, автоматизации и телемеханизации производственных процессов, что способствует их надежному и устойчивому функционированию. Надежность и безопасность эксплуатации объектов магистральных газонефтепроводов определяется комплексным подходом, основанным на взаимосвязи таких факторов, как обеспечение качества проектных работ; обеспечение качества строительства; организация системы в эксплуатации объектов. При этом следует отметить, что фактический срок эксплуатации большинства магистральных трубопроводов в Республике Беларусь приближается к тому периоду, когда значительно возрастает интенсивность отказов и аварий. По мере увеличения возраста трубопроводов усиливается тенденция к снижению их надежности и повышению вероятности аварий. Старение трубопроводов сопровождается как изменением пространственного положения самого трубопровода под действием эксплуатационных воздействий, так и изменением ландшафта, вследствие естественных и антропогенных воздействий. Следует учитывать, что для действующего трубопровода возможны отклонения эксплуатационных параметров от проектных, связанные с изменением его пространственного местоположения в результате взаимодействия с окружающим грунтом. Возникающие при этом напряженно-деформационные изменения способны привести к аварийным ситуациям и, как следствие, к губительному воздействию на окружающую среду и значительному материальному ущербу.

Трубопроводная система способна оказывать влияние на окружающий грунт посредством постоянно действующей нагрузки (вес трубы, давление и т.д.) либо переменных нагрузок, обусловленных продольной силой в трубопроводе и изменением температуры и давления перекачиваемого продукта по длине трубопровода. Следует отметить, что на стадии создания проекта подземных трубопроводов в основном учитывается только постоянное воздействие трубопровода на грунт, в то время как воздействие переменной составляющей учитывается не всегда либо в значительно меньшей степени. В то время как в сложных климатических, гидрогеологических либо геокриологических условиях не менее важным становится учет и переменных нагрузок при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных трубопроводов.

Существенное влияние на различные виды взаимодействия трубопроводов с грунтами оказывают следующие природные процессы [3]:

- промерзание талых грунтов в холодный период года;

- динамика изменения толщины снежного покрова в этот же период;
- оттаивание мерзлых грунтов в теплый период года;
- скорость и интенсивность паводковых явлений при таянии снега;
- характер и направление движения паводковых вод;
- осадки в виде дождя в теплый период времени;
- изменение уровня грунтовых вод.

Такие эксплуатационные характеристики, как изменение рабочего давления, объем перекачиваемой жидкости, температурный режим, изменение свойств перекачиваемых продуктов, оказывают влияние на характер взаимодействия грунтов с подземным трубопроводом и могут приводить к изменению его пространственного положения. Возникающие при этом дополнительные продольные напряжения изгиба могут вызывать перестройку напряженно-деформированного состояния стенки трубопровода с уменьшением его эксплуатационной надежности и долговечности.

В условиях эксплуатации магистрального трубопровода на территории Республики Беларусь наиболее актуальным является оценка указанного взаимного влияния при его пересечении с различными инженерными сетями и сооружениями, естественными препятствиями и при расположении трубопровода на землях с высокой хозяйственной деятельностью человека.

Таким образом, наиболее опасный вариант изменения пространственного положения трубопровода обусловлен таким изменением его пространственного положения, при котором трубопровод оказывается недостаточно заглубленным, что приведет к увеличению эксплуатационных и экологических рисков как для самого трубопровода, так и для окружающей среды.

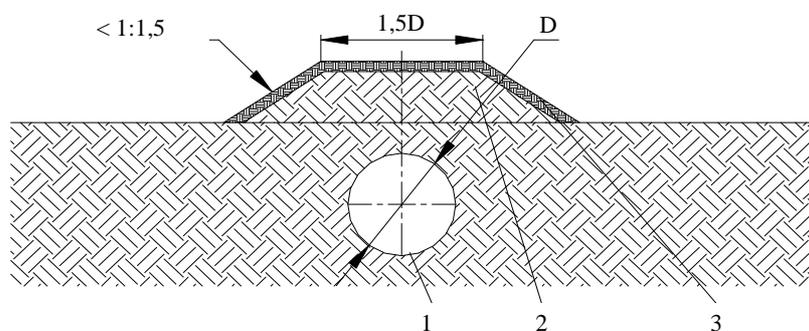
Республика Беларусь – транзитная страна по доставке нефтегазового сырья в Европу, поэтому проблема надежности эксплуатационных характеристик трубопроводных систем (в частности, оценка изменения их положения под влиянием природных и эксплуатационных процессов) является весьма актуальной.

Ремонт участков линейной части магистрального трубопровода с ненормативной глубиной залегания производится следующими способами:

- *ремонт без заглубления трубопровода* – отсыпкой грунтом с закреплением отсыпанного грунта;
- *ремонт с заглублением* – при совмещении с ремонтом трубопровода по замене изоляции;
- ремонт с заглублением, перекладкой в совмещенную (околотрубную) траншею, в зависимости от результатов расчета согласно приведенной методике;
- ремонт с заглублением трубопровода с использованием грунтовых перемычек (опор);
- ремонт с заглублением, с опорожнением трубопровода.

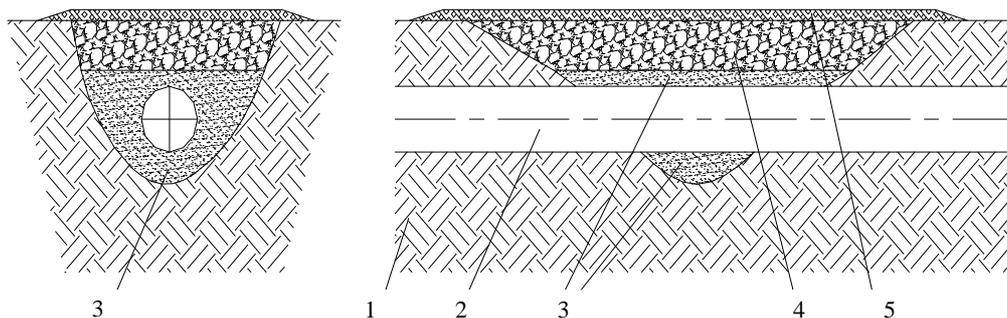
Восстановление нормативной глубины залегания локальных участков магистрального трубопровода, без заглубления. Данный способ восстановления нормативной глубины залегания может использоваться на необрабатываемых землях или локальных участках на обрабатываемых землях. К таким локальным участкам могут быть отнесены: участки, примыкающие к узлам запорной арматуры, пересечения с полевыми и лесными дорогами, локальные участки. Восстановление нормативной глубины производится отсыпкой привозным грунтом с последующим уплотнением и при необходимости укладкой железобетонных плит в соответствии с типовыми решениями.

Отсыпка грунтом выполняется в виде валика. Грунт отсыпки разравнивают и уплотняют. В качестве мягкого грунта подсыпки может применяться песок. В качестве насыпного грунта рекомендуется использовать минеральный грунт. Схемы отсыпки показаны на рисунках 1 и 2.



1 – магистральный трубопровод; 2 – грунт минеральный;
3 – противэрозионные материалы и конструкции

Рисунок 1. – Восстановление нормативной глубины залегания отсыпкой привозным грунтом на необрабатываемых землях



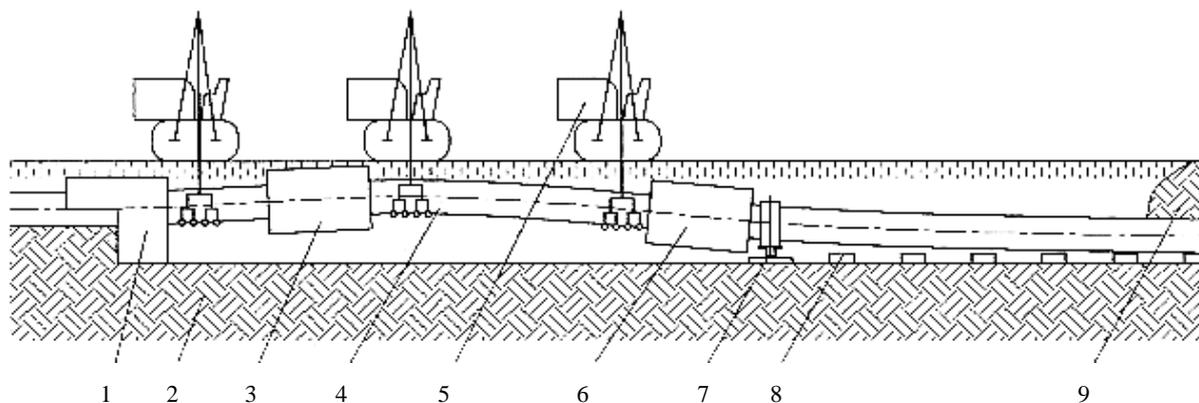
1 – грунт минеральный; 2 – магистральный трубопровод; 3 – мягкий грунт; 4 – насыпной грунт;
5 – противозрозионные материалы и конструкции

Рисунок 2. – Восстановление нормативной глубины залегания
на локальных участках магистрального трубопровода на обрабатываемых землях

Восстановление нормативной глубины залегания локальных участков магистрального трубопровода с заглублением. Данный способ восстановления нормативной глубины залегания используется при невозможности использования способа восстановления с засыпкой, например на обрабатываемых землях. В свою очередь, данный метод подразделяется на заглубление магистрального трубопровода с подкопом, заглубление с укладкой в совмещенную траншею и заглубление магистрального трубопровода с использованием грунтовых перемычек.

Заглубление локальных участков магистрального трубопровода с подкопом. Способ заглубления трубопровода с подкопом без остановки перекачки может применяться для трубопроводов всех диаметров, во всех грунтовых условиях, кроме скальных грунтов.

Заглубление с подкопом предусматривает укладку подкопанного магистрального трубопровода на опоры заданной высоты и его присыпку с подбивкой грунта после укладки трубопровода на опоры. В качестве опор заданной высоты могут использоваться мешки из негниющих материалов с наполнителем. Схема метода представлена на рисунке 3.



1 – подкапывающая машина или разработка грунта вручную; 2 – минеральный грунт;
3 – очистная машина; 4 – магистральный трубопровод; 5 – трубоукладчик; 6 – изоляционная машина;
7 – страховочная опора; 8 – опора заданной высоты; 9 – минеральный грунт засыпки

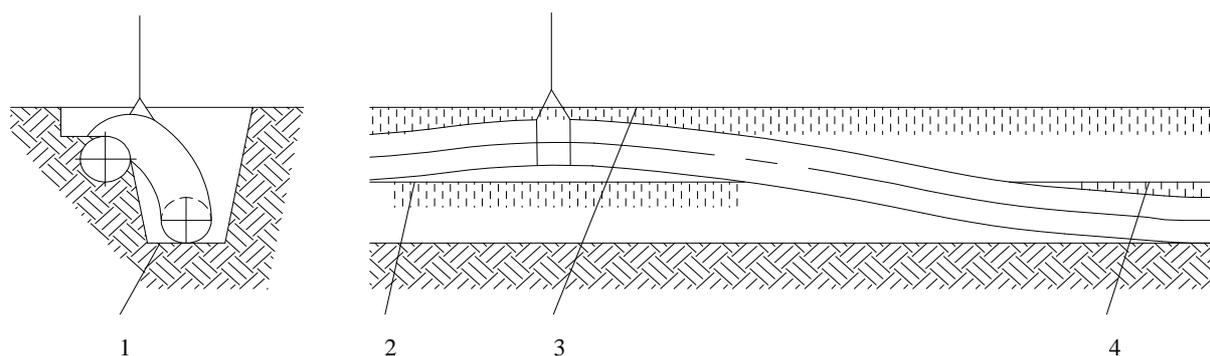
Рисунок 3. – Заглубление магистрального трубопровода с подкопом

Технологические операции при заглублении магистрального трубопровода выполняются в следующей последовательности:

- уточнение положения трубопровода и подземных коммуникаций в зоне производства работ и закрепление их на местности вешкованием, разбивка оси магистрального трубопровода с указанием на вешках фактической глубины залегания; снятие плодородного слоя почвы и откачка воды из траншеи;
- установка на магистральном трубопроводе ремонтных машин и страховочной опоры с мягкой прокладкой;
- разработка грунта под трубопровод с градацией грунтовых перемычек; поддержка и подъем вскрытого участка магистрального трубопровода трубоукладчиками;
- установка опор заданной высоты под трубопроводом;

- укладка магистрального трубопровода по мере непрерывного или циклического перемещения поддерживающих его трубоукладчиков на опоры заданной высоты;
- присыпка занявшего расчетное по глубине положение трубопровода с одновременной подбивкой грунта под нижнюю его образующую;
- откачка воды из траншеи, а также подготовка дна совмещенной траншеи;
- засыпка траншеи и уплотнение грунта засыпки.

Заглубление локальных участков магистрального трубопровода с укладкой в совмещенную траншею. Способ заглубления локальных участков магистрального трубопровода с укладкой в совмещенную траншею используется при отсутствии возможности заглубления протяженных участков линейной части и пойменных участков подводных переходов трубопровода. Данный метод состоит в укладке трубопровода в заранее выкопанную до нормативной глубины залегания параллельную траншею. Схема метода представлена на рисунке 4.



1 – совмещенная траншея; 2 – магистральный трубопровод; 3 – бровка траншеи;
4 – уровень залегания магистрального трубопровода до заглубления

Рисунок 4. – Заглубление с укладкой в совмещенную траншею протяженных локальных участков магистральных трубопроводов

Технологические операции при заглублении магистрального трубопровода укладкой в совмещенную траншею выполняются в следующей последовательности:

- уточнение положения магистрального трубопровода и коммуникаций и разбивка оси трубопровода с указанием глубины залегания;
- снятие плодородного слоя почвы и перемещение его в отвал хранения;
- разработка траншеи одноковшовым экскаватором в соответствии с параметрами, предусмотренными проектом на ремонт конкретного участка трубопровода;
- поддержка и подъем трубопровода трубоукладчиками по мере его вскрытия;
- укладка трубопровода на дно совмещенной траншеи и его присыпка;
- засыпка траншеи и уплотнение грунта засыпки.

Заглубление линейной части магистрального трубопровода с использованием грунтовых перемычек. Способ заглубления локальных участков трубопровода с использованием грунтовых перемычек используется при наличии деформации ремонтируемого трубопровода.

Заглубление участка **магистрального трубопровода** в проектное положение производится путем разборки вручную высоты грунтовых перемычек (опор), с равномерным удалением и постепенным опуском магистрального трубопровода на грунт. Разборку грунтовых опор выполняют равномерно по обе стороны от опускаемой точки трубы, очень плавно с медленным удалением грунта из-под трубопровода;

Технологические операции при заглублении магистрального трубопровода с использованием грунтовых перемычек (опор) выполняются в следующей последовательности:

- уточнение положения трубопровода и коммуникаций, разбивка его оси с указанием глубины залегания;
- снятие плодородного слоя почвы и перемещение его в отвал хранения;
- разработка траншеи до нижней образующей трубопровода;
- разработка грунта под магистральный трубопровод с градацией грунтовых перемычек;
- предварительный осмотр технического состояния трубопровода, определение мест расположения дефектов, обнаруженных внутритрубным инспекционным прибором (ВИП) и другими методами контроля, ремонт трубопровода при необходимости;
- очистка трубопровода от старого изоляционного покрытия;

- определение мест расположения дефектов и выполнение работ по устранению дефектов стенки трубы;
- зачистка трубопровода в местах ремонта дефектов;
- нанесение нового изоляционного покрытия, контроль качества изоляционного покрытия;
- заглубление участка магистрального трубопровода в проектное положение путем разборки вручную высоты грунтовых перемычек (опор) с равномерным удалением и постепенным опуском трубопровода на грунт. При процессе заглубления участка трубопровода не должно создаваться излишних напряжений на трубопровод;
- заглубление участка магистрального трубопровода выполняется, максимально соблюдая меры предосторожности по сохранности изоляции. После заглубления участка в проектное положение выполняется подбивка грунта под трубопровод [4].

Выбор перечисленных способов восстановления глубины залегания зависит от ряда факторов. Проведенный анализ показал, что выбор метода заглубления трубопровода, в первую очередь, зависит от месторасположения трубопровода – на обрабатываемых или необрабатываемых сельскохозяйственных землях. Следующим фактором, влияющим на выбор способа восстановления глубины залегания, является прочностное состояние трубопровода (наличие деформаций и коррозионных дефектов) и наличие дефектов изоляционного покрытия.

Разработка ведомостей выбора методов заглубления трубопровода в зависимости от перечисленных факторов позволит оптимизировать процесс ремонта, повысив тем самым эксплуатационную и экологическую безопасность магистрального трубопровода.

Заключение. Для магистральных трубопроводов, расположенных на территории Республики Беларусь, наибольшую опасность представляет изменение напряженно-деформированного состояния в стенке трубы в совокупности с приближением тела трубы к естественным, искусственным препятствиям и зоне хозяйственной деятельности человека.

Разработка оптимальных методов ремонта трубопроводов сократит затраты на ремонт магистральных трубопроводов и повысит их эксплуатационную безопасность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита водных объектов при аварийных разливах нефти / Д.П. Комаровский [и др.]; под ред. В.К. Липского. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – 220 с.
2. ПАО «Газпром трансгаз Беларусь» [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://belarus-tr.gazprom.ru>. – Дата доступа: 25.09.2016.
3. Горковенко, А.И. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.19. – Тюмень, 2006. – 305 с.
4. Технология ремонта трубопроводов в местах недостаточной глубины залегания. Методика расчета технологических параметров заглубления трубопроводов : РД-75.200.00-КТН-015-09. – М. : ОАО «ВНИИСТ», 2008.

Поступила 17.05.2016

THE METHODS OF NORMATIVE DEPTH OCCURRENCE RECONSTRUCTION OF TRUNK PIPELINES ANALYSIS

L. SPIRIDENOK, D. KISIALIOY, A. GRINEVICH

The problem of change position of pipelines as a result of performance loads and natural changes of landscape are examine in this article. The known methods of normative depth occurrence reconstruction of trunk pipelines are shown in the article. The technical operations for depth occurrence reconstruction of pipelines are brought. The analyze of method deepening pipeline choosing at repair are brought. The factors influencing the method deepening pipeline choosing are discovered. The authors suggest to optimize choosing of repair method to use ascertained facts.

Keywords: pipeline, renewal, bedding, soil, backfill, local area.

ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 528.854.4

РАСЧЕТ ВЗАИМНОЙ ИНФОРМАЦИИ МЕЖДУ РАСПОЗНАВАЕМЫМИ ОБЪЕКТАМИ ПРИ ДЕШИФРИРОВАНИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*д-р техн. наук, проф. А.С. ЯРМОЛЕНКО**(Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого);**О.А. КУЦАЕВА**(Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия, Горки)*

Представлен вывод формулы зависимости взаимной информации от определителей ковариационных матриц оцениваемых и эталонных объектов. На ее основе приводятся частные случаи коррелированности признаков, которые проявляют влияние коэффициентов корреляции на значение взаимной информации. По результатам теоретических исследований разработан алгоритм распознавания, основанный на расчете взаимной информации между объектами для дешифрования многоканальных изображений по её максимуму на алгоритмическом объектно-ориентированном языке IDL. Приведен пример тестирования разработанного алгоритма. Показаны его состоятельность, новизна – возможность распознавания объектов по количеству взаимной информации, учитывающей множество корреляционных зависимостей между составляющими вектора признаков эталонных и распознаваемых объектов, что актуально при распознавании многоканальных изображений.

Ключевые слова: распознавание образов, взаимная информация, дешифрование изображений.

Введение. О возможности применения взаимной информации в распознавании образов указывается в [1]. Ею определяется количество информации, которое содержит один объект о другом. В этом заключается универсальность подхода к оценке образов при любом распределении значений признаков распознаваемых объектов. Поскольку в [1] и других известных авторам литературных источниках отсутствуют выводы для определения взаимной информации при множестве признаков распознаваемых объектов, то считаем выполнение данных исследований актуальным, особенно в свете широких возможностей современных информационно-коммуникационных технологий.

Из базового курса теории информации известно, что взаимная информация двух изображений α и β друг относительно друга определяется формулой [2, с. 120]:

$$I(\beta, \alpha) = H(\alpha) + H(\beta) - H(\alpha, \beta), \quad (1)$$

где $H(\alpha)$, $H(\beta)$ – энтропия образа α , β соответственно; $H(\alpha, \beta)$ – совместная энтропия этих образов (энтропия совместного появления событий α и β).

Событиями считаются образы (изображения) α и β . Отметим, что взаимная информация может быть выражена и через условную энтропию [2, с. 119], но в данной работе принимаем (1) как удобную в соответствии с [2]. Совместная энтропия может быть вычислена согласно [2, с. 90] или [3, (1.30)]. В соответствии с терминологией [3] под сообщением будем понимать набор значений пикселей изображения, ограниченных определенной областью, задаваемой правильной геометрической фигурой – квадратом, прямоугольником, кругом, эллипсом. Поскольку результаты исследований реализованы в программном комплексе ENVI [4], то в нем такие области называются ROI (Regions of Interests). Символом источника сообщения принимаются значение яркости пикселя в интервале от 0 до 255 в каждом канале изображения.

Основная часть. Вначале в качестве признака, характеризующего образ, принимаем распределенное значение пикселей по области ROI изображения. Значением пикселя может быть его яркость на определенном канале изображения. В качестве модели для исследования примем нормальный закон распределения значений пикселей изображения. Для таких исследований выводы, получаемые на основе этого закона, являются гарантированными по точности, то есть в соответствии с полученными на основе [5–7] выводами [8–10], минимаксными, а если предполагаются известными и параметры распределения, то и самыми точными. Несколько другими словами минимаксность нормального закона распределения сигнала источника сообщений выражена в [3, (1.27)]. Этот закон в [11], по нашему мнению, обоснованно принимается как пример функции плотности распределения признаков дешифрования.

В данной работе предполагаем возможность достоверного определения дисперсии, среднего значения символов сообщения, коэффициентов корреляции между рядами символов сообщений.

Пусть значения пикселей образа α имеют плотность распределения

$$f_{\alpha}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (2)$$

а значения пикселей образа β – плотность распределения

$$f_{\beta}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} e^{-\frac{(y-b)^2}{2\sigma_y^2}}. \quad (3)$$

Плотность совместного распределения значений пикселей изображений α и β представим следующим образом [12, (9.1.1)]:

$$f_{\alpha\beta}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{(x-a)^2}{\sigma_x^2} - 2r\frac{(x-a)(y-b)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-b)^2}{\sigma_y^2}\right)}. \quad (4)$$

В формуле (4) все обозначения общепринятые; r , как известно, – коэффициент корреляции значений пикселей этих двух образов. Значения a и b могут быть найдены как средние значения пикселей по области ROI для каждого канала изображения. Коэффициент корреляции устанавливается для значений пикселей каждой пары каналов. Тогда с учетом (2)–(4) взаимная информация (1) примет вид:

$$I(\beta, \alpha) = -\int_{-\infty}^{\infty} f_{\alpha}(x) \ln f_{\alpha}(x) dx + \left(-\int_{-\infty}^{\infty} f_{\beta}(y) \ln f_{\beta}(y) dy\right) - \left(-\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\alpha\beta}(x, y) \ln f_{\alpha\beta}(x, y) dx dy\right). \quad (5)$$

После несложных преобразований найдем

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{\alpha}(x) \ln f_{\alpha}(x) dx = -\ln(\sqrt{2\pi\sigma_x}) - \frac{1}{2} = -\ln(\sqrt{2\pi e}\sigma_x). \quad (6)$$

Аналогично

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{\beta}(y) \ln f_{\beta}(y) dy = -\ln(\sqrt{2\pi e}\sigma_y). \quad (7)$$

Для определения дифференциальной энтропии совместного распределения признака образов α и β вначале сделаем замену переменных:

$$u = \frac{1}{\sqrt{1-r^2}} \left(\frac{(x-a)}{\sigma_x} - \frac{r(y-b)}{\sigma_y} \right); \quad (8)$$

$$v = \frac{(y-b)}{\sigma_y}. \quad (9)$$

В общем случае, если задана плотность распределения $f_1(z)$ вектора z и определена зависимость

$$w = \varphi(z), \quad (10)$$

плотность распределения вектора w будет [13]

$$f_2(w) = f_1(\varphi^{-1}(w)) \cdot |J(w)|, \quad (11)$$

где $J(w)$ – якобиан преобразований при переходе к переменной w , вычисляется как

$$J(w) = \frac{\partial \varphi^{-1}(w)}{\partial w} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_1^{-1}(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial \varphi_1^{-1}(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_1^{-1}(w)}{\partial w_n} \\ \frac{\partial \varphi_2^{-1}(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial \varphi_2^{-1}(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_2^{-1}(w)}{\partial w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varphi_n^{-1}(w)}{\partial w_1} & \frac{\partial \varphi_n^{-1}(w)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_n^{-1}(w)}{\partial w_n} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где

$$\varphi^{-1}(w) = z; \quad (13)$$

n – число составляющих w_i вектора w .

В случае (8), (9)

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \varphi_1^{-1}(w) = x \\ z_2 &= \varphi_2^{-1}(w) = y \\ w_1 &= u \\ w_2 &= \vartheta \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Следовательно,

$$x = \sigma_x(u\sqrt{1-r^2} + r\vartheta) + a; \quad (15)$$

$$y = \sigma_y\vartheta + b. \quad (16)$$

В соответствии с (15) и (16)

$$J(w) = \begin{pmatrix} \sigma_x\sqrt{1-r^2} & \sigma_x \cdot r \\ 0 & \sigma_y \end{pmatrix}; \quad (17)$$

$$|J(w)| = \sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}. \quad (18)$$

С учетом (18), (11), (15) и (16) после логарифмирования запишем энтропию совместного появления образов α и β :

$$H(\alpha, \beta) = \ln(2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}) + 1 = \ln(2\pi\sigma_x\sigma_y e\sqrt{1-r^2}). \quad (19)$$

При вычислении (19) принимались следующие определенные интегралы [14]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{a}; \quad (20)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 e^{-a^2x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a^3}. \quad (21)$$

После подстановки (19), (7), (6) в (5) находим

$$I(\beta, \alpha) = \ln \frac{2\pi e\sigma_x\sigma_y}{2\pi e\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} = -\frac{1}{2} \ln(1-r^2). \quad (22)$$

Из (22) следует, что количество взаимной информации определяется коэффициентом корреляции образов α и β . Однако это справедливо лишь в случае наличия одного признака объекта, тем более без вывода эта формула дана в [1]. В случае более одного признака необходимы дополнительные исследования, выполненные нами далее.

Взаимная информация при наличии многих признаков распознавания образов. Пусть изображения α и β многоканальные. В каждом канале яркость одного и того же пикселя будет различной. Однако эти яркости между каналами также могут различаться. В таком случае один пиксель будет характеризоваться вектором значений яркостей. Размерность такого вектора будет равна числу каналов изображения. Представим вектор значений яркостей в следующем виде:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (23)$$

Здесь n – число каналов изображения; x_i – яркость пикселя на канале i , которую определим как признак с номером i . В общем случае эти признаки могут быть и коррелированы между собой. Ковариационная матрица составляющих вектора признаков может быть записана в виде:

$$K_1 = \begin{pmatrix} D_1 & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & D_2 & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & D_n \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где $D_i = K_{ij}$ – дисперсия i составляющей вектора (22); K_{ij} – ковариационный момент составляющих i и j этого вектора.

В соответствии с [13, с. 158] можно записать функцию плотности нормального распределения вектора X :

$$f_{\alpha}(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} \frac{1}{\sqrt{D_1}} e^{-\frac{1}{2}(x-A)^T K_1^{-1}(x-A)}, \quad (25)$$

где A – вектор математических ожиданий составляющих вектора X ; K_1 – ковариационная матрица признаков, составляющих вектор X ; D_1 – определитель матрицы K_1 .

Будем считать, что функция (25) записана для вектора характеристик входного образа α .

Для эталонного образа β такую же функцию запишем следующим образом:

$$f_{\beta}(y) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} \frac{1}{\sqrt{D_2}} e^{-\frac{1}{2}(y-B)^T K_2^{-1}(y-B)}, \quad (26)$$

где B – вектор математических ожиданий составляющих вектора Y признаков образа β ; K_2 – ковариационная матрица признаков составляющих вектор Y ; D_2 – определитель матрицы K_2 признаков образа β .

Значение взаимной информации между образами α и β можно по аналогии с (1) и (5) записать так:

$$I(\beta, \alpha) = -\int_X f_{\alpha}(x) \ln f_{\alpha}(x) dx + \left(-\int_Y f_{\beta}(y) \ln f_{\beta}(y) dy \right) - \left(-\int_{XY} f_{\alpha\beta}(x, y) \ln f_{\alpha\beta}(x, y) dx dy \right), \quad (27)$$

где символы X, Y, XY у знаков интегралов указывают на области интегрирования по многомерным переменным x, y в каждой из трех составляющих данного выражения.

Согласно (27) можно записать

$$\ln f_{\alpha}(x) = -\ln\left((\sqrt{2\pi})^2 \sqrt{D_1}\right) - \frac{1}{2}(x-A)^T K_1^{-1}(x-A). \quad (28)$$

Тогда первое выражение в (27) будет:

$$H_{\alpha} = \int_X \left(\ln\left((\sqrt{2\pi})^2 \sqrt{D_1}\right) + \frac{1}{2}(x-A)^T K_1^{-1}(x-A) \right) f_{\alpha}(x) dx. \quad (29)$$

Для определения такого интеграла прибегают к диагонализации формы:

$$(x-A)^T K_1^{-1}(x-A). \quad (30)$$

Суть диагонализации заключается в следующем [15]. Если дана некоторая прямоугольная матрица (необязательно квадратная и симметричная) $W_{n \times p}$ (n – число строк, p – число столбцов), ее можно представить в виде:

$$W = P \cdot \Sigma \cdot Q^T, \quad (31)$$

где P – матрица, образованная p ортогональными собственными векторами, соответствующими p наибольшим собственным значениям матрицы WW^T . Размерность матрицы составляет $n \times p$; Q – ортогональная матрица, образованная ортогональными векторами матрицы $W^T W$; Σ – диагональная матрица, составленная из квадратных корней собственных значений матрицы $W^T W$.

Если же матрица W квадратная неособенная и симметричная размерности $n \times n$, то существует такая ортогональная матрица H , при которой справедливо произведение

$$H^T W H = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n), \quad (32)$$

где λ_i – собственные числа матрицы W .

Для приведения квадратичной формы (30) к диагональному виду введем обозначение:

$$Z = H^T (x - A), \quad (33)$$

из которого следует

$$(x - A) = HZ. \quad (34)$$

Подстановка (34) в (30) приводит к форме

$$Z^T H^T K^{-1} H Z. \quad (35)$$

Можно подобрать такую ортогональную матрицу H , чтобы форма (30) была выражена как

$$Z_1^2 \cdot \frac{1}{\sigma_1^2} + Z_2^2 \cdot \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + Z_n^2 \cdot \frac{1}{\sigma_n^2} = \sum_{i=1}^n Z_i^2 \cdot \frac{1}{\sigma_i^2}. \quad (36)$$

В формуле (36) $\frac{1}{\sigma_i^2}$ – собственные числа матрицы K^{-1} .

С учетом преобразования (36) плотность (25) запишем следующим образом:

$$f_{\alpha}(Z) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} \frac{1}{\sqrt{D_1}} |H| e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Z_i^2 \frac{1}{\sigma_i^2}}, \quad (37)$$

где $|H|$ – определитель матрицы H как якобиана преобразования (33).

Поскольку H – ортогональная матрица, то определитель

$$|H| = 1. \quad (38)$$

Аналогично можно переписать и выражение (28)

$$\ln f_{\alpha}(z) = -\ln\left((\sqrt{2n})^n \sqrt{D_1}\right) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Z_i^2 \cdot \frac{1}{\sigma_i^2}. \quad (39)$$

Тогда с учетом (37), (39) можно вычислить дифференциальную энтропию

$$-\int_X f_{\alpha}(x) \ln f_{\alpha}(x) dx = -\int_Z f_{\alpha}(Z) \ln f_{\alpha}(Z) dZ = \int_Z \left(\ln\left((\sqrt{2\pi})^n \sqrt{D_1}\right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Z_i^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \right) f_{\alpha}(Z) dZ. \quad (40)$$

Для вычисления выражения (40) воспользуемся интегралами (20), (21). В них

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_i}. \quad (41)$$

С учетом (41) первое выражение (40) после интегрирования будет

$$\ln\left((\sqrt{2\pi})^n \sqrt{D_1}\right). \quad (42)$$

Второе выражение с учетом интеграла (21) и обозначения (41) примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdots \sigma_n (\sqrt{2\pi})^n}{(\sqrt{2\pi})^n \cdot \sqrt{D_1}} = n. \quad (43)$$

Поскольку

$$\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdots \sigma_n = \sqrt{D_1}, \quad (44)$$

то с учетом (42), (43) дифференциальная энтропия (40) будет

$$H_{\alpha} = \ln\left((\sqrt{2\pi})^n \sqrt{D_1}\right) + n = \ln\left((\sqrt{2\pi})^n e \sqrt{D_1}\right). \quad (45)$$

Дифференциальные энтропии образа β и совместно образов α и β по аналогии с (45) можно записать

$$H_{\beta} = \ln\left((\sqrt{2\pi})^n e^n \sqrt{D_2}\right); \quad (46)$$

$$H_{\alpha\beta} = \ln\left((\sqrt{2\pi})^{2n} e^{2n} \sqrt{D}\right), \quad (47)$$

где D_2 и D – определители матриц K_2 и K . Причем матрица K является ковариационной матрицей вектора

$$(X - A, X - B)^T. \quad (48)$$

Ее можно представить так:

$$K = \begin{pmatrix} K_1 & K_{12} \\ K_{21} & K_2 \end{pmatrix}, \quad (49)$$

где K_{12} – ковариационный момент векторов $(X - A)$ и $(X - B)$.

После подстановки (46), (47) в (27) найдем

$$I(\alpha, \beta) = \ln \left((\sqrt{2\pi})^n e^n \sqrt{D_1} \right) + \ln \left((\sqrt{2\pi})^n e^n \sqrt{D_2} \right) - \ln \left((\sqrt{2\pi})^{2n} e^{2n} \sqrt{D} \right), \quad (50)$$

или

$$I(\alpha, \beta) = \ln \sqrt{\frac{D_1 D_2}{D}}. \quad (51)$$

Вычисление взаимной информации при известных ковариационных матрицах их признаков.

Будем считать, что в (49) все матрицы известны. Для определения определителя D матрицы K приведем ее путем гауссовых преобразований к треугольному виду [16]. Для этого вычтем из второй строки (49) первую, умноженную на $-K_{21} \cdot K_1^{-1}$. Получим

$$\begin{pmatrix} K_1 & K_{12} \\ 0 & K_2 - K_{21} K_1^{-1} K_{12} \end{pmatrix}. \quad (52)$$

Определитель такой матрицы равен

$$D = |K_1| |K_2 - K_{21} K_1^{-1} K_{12}| \quad (53)$$

или, поскольку

$$|K_1| = D_1, \quad (54)$$

то

$$D = |D_1| |K_2 - K_{21} K_1^{-1} K_{12}|. \quad (55)$$

На основании (51) с учетом (53) будем иметь

$$I(\alpha, \beta) = \ln \sqrt{\frac{D_2}{|K_2 - K_{21} K_1^{-1} K_{12}|}}. \quad (54)$$

Некоторое преимущество формулы (54) заключается в том, что в ней вычисляется определитель матрицы меньшего размера. Кроме того, на ее основе можно осуществить качественный анализ взаимной информации и коррелированности признаков.

Пусть признаки образа α характеризуются следующей ковариационной матрицей

$$K_1 = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \cdots & \alpha_{nn} \end{pmatrix}, \quad (55)$$

где α_{ij} – ковариационные моменты признаков i, j образа α .

Такие же (или иные) признаки образа β характеризуются ковариационной матрицей

$$K_2 = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \cdots & \beta_{nn} \end{pmatrix}, \quad (56)$$

где β_{ij} – ковариационные моменты признаков i, j образа β .

Совместная ковариационная матрица признаков образов α и β имеет вид

$$K = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1n} & \alpha\beta_{11} & \alpha\beta_{12} & \cdots & \alpha\beta_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2n} & \alpha\beta_{21} & \alpha\beta_{22} & \cdots & \alpha\beta_{2n} \\ \cdots & \cdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \cdots & \alpha_{nn} & \alpha\beta_{n1} & \alpha\beta_{n2} & \cdots & \alpha\beta_{nn} \\ \beta\alpha_{11} & \beta\alpha_{12} & \cdots & \beta\alpha_{1n} & \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1n} \\ \beta\alpha_{21} & \beta\alpha_{22} & \cdots & \beta\alpha_{2n} & \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2n} \\ \cdots & \cdots \\ \beta\alpha_{n1} & \beta\alpha_{n2} & \cdots & \beta\alpha_{nn} & \beta_{n1} & \beta_{n2} & \cdots & \beta_{nn} \end{pmatrix}. \quad (57)$$

Здесь $\alpha\beta_{ij}$ – ковариационный момент признака i образа α и признака j образа $\alpha\beta$.

Очевидно, что

$$\alpha\beta_{ij} = \beta\alpha_{ij}. \quad (58)$$

Здесь

$$K_{12} = \begin{pmatrix} \alpha\beta_{11} & \alpha\beta_{12} & \cdots & \alpha\beta_{1n} \\ \alpha\beta_{21} & \alpha\beta_{22} & \cdots & \alpha\beta_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha\beta_{n1} & \alpha\beta_{n2} & \cdots & \alpha\beta_{nn} \end{pmatrix}, \quad (59)$$

$$K_{21} = K_{12}^T. \quad (60)$$

Возможен частный случай матрицы (59), когда

$$K_1 = \text{diag}(\alpha_{11}, \alpha_{22}, \cdots, \alpha_{nn}); \quad (61)$$

$$K_2 = \text{diag}(\beta_{11}, \beta_{22}, \cdots, \beta_{nn}); \quad (62)$$

$$K_{12} = \text{diag}(\alpha\beta_{11}, \alpha\beta_{22}, \cdots, \alpha\beta_{nn}). \quad (63)$$

С учетом (61)–(63) перепишем количество взаимной информации в следующем виде

$$I(\alpha, \beta) = \ln \sqrt{\frac{D_2}{|K_2(E - K_2^{-1}K_{21}K_1^{-1}K_{12})|}}. \quad (64)$$

Полагая диагональность матриц K_1 , K_2 , K_{12} , найдем

$$K_2^{-1}K_{21} = \text{diag}\left(\frac{\beta\alpha_{11}}{\beta_{11}}, \frac{\beta\alpha_{22}}{\beta_{22}}, \cdots, \frac{\beta\alpha_{nn}}{\beta_{nn}}\right); \quad (65)$$

$$K_1^{-1}K_{12} = \text{diag}\left(\frac{\alpha\beta_{11}}{\alpha_{11}}, \frac{\alpha\beta_{22}}{\alpha_{22}}, \cdots, \frac{\alpha\beta_{nn}}{\alpha_{nn}}\right). \quad (66)$$

Произведение матриц (65)–(66) будет следующим:

$$\text{diag}\left(\frac{\beta\alpha_{11}\alpha\beta_{11}}{\beta_{11}\alpha_{11}}, \frac{\beta\alpha_{22}\alpha\beta_{22}}{\beta_{22}\alpha_{22}}, \cdots, \frac{\beta\alpha_{nn}\alpha\beta_{nn}}{\beta_{nn}\alpha_{nn}}\right). \quad (67)$$

Очевидно, что в (67)

$$\beta\alpha_{ii} = \alpha\beta_{ii}, \quad (68)$$

и каждый элемент можно представить как

$$r_i^2 = \left(\frac{\alpha\beta_{ii}}{\sqrt{\beta_{ii}}\sqrt{\alpha_{ii}}}\right)^2. \quad (69)$$

Тогда (67) можно переписать так

$$K_2^{-1}K_{21}K_1^{-1}K_{12} = \text{diag}(r_1^2, r_2^2, \cdots, r_n^2). \quad (70)$$

Поскольку

$$|K_2| = D_2, \quad (71)$$

то (64) можно переписать в следующем виде:

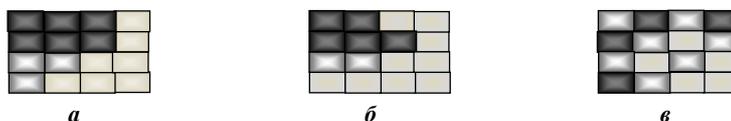
$$I(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \ln \left| \left(E - \text{diag}(r_1^2, r_2^2, \cdots, r_n^2) \right) \right|; \quad (72)$$

$$I(\alpha, \beta) = -\frac{1}{2} \ln \left((1-r_1^2), (1-r_2^2), \cdots, (1-r_n^2) \right). \quad (73)$$

Частным случаем (73) является формула (22) двумерного случая.

В программе ENVI распознавание осуществляется при помощи инструмента ROI (Region of Interest). Суть инструмента заключается в наложении на распознаваемый объект правильной площадной фигуры. Это может быть квадрат, треугольник, эллипс, круг и др. Этому распознаваемому объекту вменяется опреде-

ленный цвет при распознавании. Пусть в границах этой области (ROI) определяется цвет пикселя (канал) и его яркость (рисунок). Это разные величины, но взаимосвязанные. В таблице 1 приведены значения цветов пикселей двух ROI соответствующих объектов. В таблице 2 – значения яркостей соответствующих пикселей.



Объект, который подлежит распознаванию (а); эталон 1 (б); эталон 2 (в)

Таблица 1 – Значения цветов пикселей ROI двух эталонных объектов

Объекты	Значения цветов пикселей															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	250	250	100	100	250	250	250	100	180	180	100	100	100	100	100	100
2	180	250	180	250	250	180	100	180	180	100	180	200	250	180	100	100

Таблица 2 – Значения яркостей пикселей ROI двух эталонных объектов

Объекты	Значения яркостей пикселей															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	100	100	200	200	200	200	200	200	100	100	150	150	200	200	100	100
2	200	100	200	100	100	200	200	100	100	200	100	200	200	200	100	100

Данные таблиц 1 и 2 являются обучающими для распознавания третьего объекта. Цвет пикселей и значения яркостей приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения цвета и яркости пикселей ROI распознаваемого объекта

Признаки	Значения цветов и яркостей пикселя															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Цвет	250	250	200	100	250	250	250	100	150	150	100	100	150	100	100	100
Яркость	100	100	100	200	100	100	120	200	150	160	110	120	160	110	110	100

Для решения задачи по взаимной информации необходимо определить ковариационные матрицы признаков K_1 , K_2 по формулам (55), (56) сравниваемого и обучающего образов. Эти матрицы будут отнесены соответственно к распознаваемому образу и образу 1 (K_1 , K'_2), к распознаваемому образу и образу 2 (K_1 , K''_2).

Совместная ковариационная матрица образов α и β (57) здесь будет строиться для распознаваемого образа и образа 1 (K') и для распознаваемого образа и образа 2 (K'').

По формуле (64) будет определено два значения взаимной информации. Большее из них укажет на распознавание образа.

Согласно данным таблицы 1 ковариационная матрица K_1 цвета и яркости (далее – признаков) распознаваемого образа равна

$$K_1 = \begin{pmatrix} 4610,06 & -1125,21 \\ -1125,21 & 1216,25 \end{pmatrix}. \quad (74)$$

Ковариационная матрица признаков K_2 обучающего образа 1, вычисленного по данным таблиц 1 и 2, равна

$$K'_2 = \begin{pmatrix} 4902,92 & 628,33 \\ 628,33 & 3380,00 \end{pmatrix}. \quad (75)$$

Общая ковариационная матрица K' признаков образа распознаваемого и обучающего объекта 1

$$K' = \begin{pmatrix} 4610,06 & -1125,21 & 4297,54 & 1071,17 \\ -1125,21 & 1216,25 & -919,58 & 331,67 \\ 4297,54 & -919,58 & 4902,92 & 628,33 \\ 1071,17 & 331,67 & 628,33 & 3380,00 \end{pmatrix}. \quad (76)$$

Ей соответствующая корреляционная матрица

$$K_{1об} = \begin{pmatrix} 1 & -0,47519 & 0,90394 & 0,27136 \\ -0,47519 & 1 & -0,37658 & 0,16358 \\ 0,90393 & -0,37658 & 1 & 0,15435 \\ 0,27136 & 0,16358 & 0,15435 & 1 \end{pmatrix}. \quad (77)$$

Определители соответственно равны:

$$D_1 = 4340894,7; D_2 = 16177055,6; D = 9,6353E + 12. \quad (78)$$

Взаимная информация

$$I(\beta, \alpha) = 0,9993118. \quad (79)$$

Распознаваемый образ сравнивался с другим обучающим объектом.

Здесь

$$K_2'' = \begin{pmatrix} 2291,67 & 666,67 \\ 666,67 & 2666,67 \end{pmatrix}. \quad (80)$$

Общая ковариационная матрица признаков этих двух образов равна

$$K'' = \begin{pmatrix} 4610,06 & -1125,21 & 276,25 & 1030,00 \\ -1125,21 & 1216,25 & 345,83 & -366,67 \\ 276,25 & 345,83 & 2291,67 & 666,67 \\ 1030,00 & -366,67 & 666,67 & 2666,67 \end{pmatrix}. \quad (81)$$

Ей соответствующая корреляционная

$$K_{2об} = \begin{pmatrix} 1 & -0,47519 & 0,08499 & 0,29377 \\ -0,47519 & 1 & 0,20715 & 0,20360 \\ 0,08499 & 0,20715 & 1 & 0,26968 \\ 0,29377 & 0,20360 & 0,26968 & 1 \end{pmatrix}. \quad (82)$$

И определители:

$$D_1 = 4340894,7; D_2 = 5666666,7; D = 2,015E + 13. \quad (83)$$

Взаимная информация, вычисленная по (64)

$$I(\beta, \alpha) = 0,099705. \quad (84)$$

Поскольку взаимная информация (79) больше, то распознаваемый образ следует отнести к классу образа 1.

Вычисление взаимной информации по упрощенной формуле (73) приводит к результатам:

- из сравнения с образом 1

$$I(\beta, \alpha) = -\frac{1}{2} \ln((1-0,903^2)(1-0,163^2)) = 0,863; \quad (85)$$

- из сравнения с образом 2

$$I(\beta, \alpha) = -\frac{1}{2} \ln((1-0,085^2)(1-(-0,204)^2)) = 0,025. \quad (86)$$

Из сравнения (85) и (86) подтверждается отнесение распознаваемого образа к образу 1. Отметим, что значения, полученные по упрощенным формулам, значительно отличаются от строгих значений, поэтому применять упрощенные формулы на практике не рекомендуется.

В соответствии с разработанным алгоритмом авторами составлена программа [17] на алгоритмическом объектно-ориентированном языке IDL системы распознавания (дешифрирования) многоканальных изображений. Название программы OROI_DATA_CORR24BITINFO.

Программа тестирована на обновлении ЗИС одного из хозяйств Беларуси площадью 6361,67 га. Выборка состояла из 12 видов (кодов) земель сельскохозяйственного назначения. Площади участков варьировали от 4 до 100 га. Всего исследовано 48 земельных участков. Изменения контуров за 16 лет составляли по модулю от 0,12 до 23,89 га. Средняя квадратическая ошибка определения точек измененных границ по 28 контрольным натурным геодезическим определениям составила 2,6 м. Наибольшие ошибки контура в двух точках по модулю составили соответственно 10,4 и 11,8 м. Поскольку настоящая величина

средней квадратической ошибки согласно «ТКП 010-2005 ЗИС РБ. Основные положения (пункт 5)» соответствует точности ЗИС Республики Беларусь, то выполненная работа была принята для ее обновления.

Заключение. Настоящий алгоритм и созданная на алгоритмическом языке IDL в системе ENVI программа обладает следующей новизной по отношению к существующим алгоритмам:

- распознавание площадных объектов теперь возможно на количестве взаимной информации, учитывающей множество корреляционных зависимостей между составляющими вектора признаков эталонного и распознаваемого объектов, что актуально при распознавании многоканальных изображений; по максимуму количества взаимной информации унифицируется процесс отнесения объекта к определенному классу;
- программирование алгоритма может быть реализовано на любом алгоритмическом объектно-ориентированном языке по аналогии с его авторской реализацией на IDL в системе ENVI;
- программированием обеспечивается гибкость, оперативность решения специальных задач дешифрирования, а также возможностью изменения параметров для удобства решения конкретной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайкин, С. Нейронные сети : полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. испр. ; пер. с англ. – М. : И.Д. Вильямс, 2006. – 1104 с.
2. Яглом, А.М. Вероятность и информация / А.М. Яглом, И.М. Яглом. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 512 с.
3. Журкин, И.Г. Автоматизированная обработка данных дистанционного зондирования: учеб. для вузов / И.Г. Журкин, Н.К. Шавенько ; под общ. ред. И.Г. Журкина. – М. : ООО «Диона», 2013. – 456 с.
4. Ярмоленко, А.С. Технология, точность и экономическая эффективность автоматизированного дешифрирования сельскохозяйственных земель / А.С. Ярмоленко, О.А. Куцаева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 3. – С. 64–71.
5. Закс, Ш. Теория статистических выводов / Ш. Закс. – М. : Мир, 1975. – 776 с.
6. Хьюбер, П.Дж. Робастность в статистике / П.Дж Хьюбер. – М. : Мир, 1984. – 304 с.
7. Кульбак, С. Теория информации и статистика / С. Кульбак ; пер. с англ. – М. : Наука, 1967. – 408 с.
8. Ярмоленко, А.С. Определение функции плотности распределения ошибок измерений с применением вариационного исчисления / А.С. Ярмоленко // Геодезия и картография. – 1992. – № 8. – С. 7–10.
9. Ярмоленко, А.С. Минимаксное оценивание параметра положения в одномерном случае / А.С. Ярмоленко // Геодезия и картография. – 1993. – № 6. – С. 5–9.
10. Ярмоленко, А.С. О формальном применении теории энтропии для сравнения точности геодезических приборов / А.С. Ярмоленко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1993. – № 4. – С. 88–94.
11. Шавенько, Н.К. Алгоритмы обработки изображений / Н.К. Шавенько. – М. : МИИГАиК, 2002. – 62 с.
12. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
13. Пугачев, В.С. Теория вероятностей и математическая статистика / В.С. Пугачев. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 496 с.
14. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 544 с.
15. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М. : Мир, 1980. – 456 с.
16. Гантмахер, Ф.А. Теория матрицы / Ф.А. Гантмахер. – М. : Наука, 1968. – 576 с.
17. Расчет взаимной информации между объектами для дешифрирования многоканальных изображений по её максимуму : свидетельство № 2015613067 РФ / А.С. Ярмоленко, О.А. Куцаева ; дата публ. 03.03.2015.

Поступила 22.04.2016

THE CALCULATION OF MUTUAL INFORMATION BETWEEN OBJECTS FOR THE INTERPRETATION OF MULTIBAND IMAGES IN ITS MAXIMUM

A. YARMOLENKO, O. KUTSAEVA

Given the derivation of the formula based mutual information of determinants of covariance matrices of the estimated and reference objects. On its basis are special cases of correlation that show the influence of correlation coefficients on the value of mutual information. According to the results of theoretical researches of the developed recognition algorithm based on the calculation of mutual information between objects for decryption multi-channel images in its maximum algorithmic object-oriented language IDL. An example of testing the developed algorithm. The research results show the viability of the developed algorithm. The novelty of this algorithm is the possibility of recognition of objects by the number of mutual information that takes into account the multiple correlations between the components of the feature vector and reference recognized objects, which is very important for recognition of multi-channel images.

Key words: pattern recognition, mutual information, decryption of images.

УДК 528.77

ВЫБОР МАСШТАБА АЭРОФОТОСЪЕМКИ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗНЫХ ФОРМ

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

Рассматривается масштаб фотографирования и разрешающая способность снимка с точки зрения качества дешифрирования и, следовательно, качества создаваемых (обновляемых) топографических карт (планов) в целом. Анализируется вопрос выбора масштаба аэрофотосъемки для качественного дешифрирования в зависимости от разрешающей способности аэрофотоснимков и размеров, преобладающих на местности объектов разных форм. Предложена формула расчета масштаба фотографирования, при котором будет выполнено дешифрирование как с вероятностью 0,75, так и с большей вероятностью. Однако увеличение вероятности дешифрирования объектов приведет к тому, что аэрофотосъемку придется выполнять в более крупном масштабе и, следовательно, к увеличению камеральных работ, но уменьшит объем полевых работ по уточнению камерального дешифрирования.

Ключевые слова: аэрофотосъемка, масштаб, дешифрирование, разрешающая способность снимка, вероятность дешифрирования.

Дешифрирование аэроснимков является одним из важнейших процессов при создании и обновлении топографических карт (планов), от качества дешифрирования зависит качество карты (плана) в целом. В работе [1] рассмотрен вопрос расчета разрешения при сканировании для обеспечения дешифрирования с вероятностью 0,75 для круглых объектов, которые, как правило, имеют небольшие размеры на местности. Однако для разных участков местности малые размеры могут иметь и объекты других форм. Поэтому рассмотрим вопрос расчета разрешения при сканировании для объектов разных форм.

Математическое выражение вероятности распознавания простых объектов P имеет вид [2]:

$$P = \exp \left[- \left(B \frac{A}{L} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где L – геометрический размер простого объекта (диаметр, диагональ, длина и т.п.), который сможем отдешифрировать с вероятностью P ; A – разрешение аэрофотоснимка, указывающее размер минимального еще раздельно изобразившегося на снимке объекта; B – коэффициент распознавания формы простого объекта.

Как видим (формула (1)), на достоверность распознавания большое влияние оказывают разрешение аэрофотоснимка, форма объекта и его размеры. Объекты, имеющие одинаковые размеры, но отличающиеся по форме, воспринимаются по-разному и распознаются с различной степенью достоверности. Влияние формы объекта на вероятность дешифрирования учитывается коэффициентом B .

В данной работе будем рассматривать компактные объекты разной формы, имеющие малые размеры, которые наиболее сложно дешифрировать.

Для обеспечения качественного дешифрирования, исходя из экономических соображений, считается удовлетворительным результат распознавания, равный 75% [2]. Тогда большинство задач будет выполнено с минимумом затрат на производство дешифрирования.

Разрешение аэроснимка A и, следовательно, вероятность дешифрирования объектов будет зависеть от масштаба фотографирования $1:M_c$ и разрешающей способности снимка R [2]:

$$A = \frac{M_c}{2R}. \quad (2)$$

Расчеты разрешения аэрофотоснимка A будем выполнять для разных масштабов фотографирования $1:M_c$ и приведенной в инструкции [3] разрешающей способности снимка $R = 40 \text{ мм}^{-1}$. Результаты расчетов минимальных размеров объектов, видимых на снимке, представим в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет минимального размера объекта A , видимого на снимке

$1: M_c$	1 : 10000	1 : 15000	1 : 20000
$A = \frac{M_c}{2R}$ (2), мм	125	187,5	250

В работе [1] предложена формула расчета размера распознаваемого объекта круглой формы:

$$L = \frac{BA}{0,53} = \frac{0,97A}{0,53} = 1,8302A = KA, \quad (3)$$

где 0,53 – коэффициент, полученный в работе [1] для круглых объектов, при котором вероятность распознавания $P \geq 0,75$;

$$K = \frac{B}{0,53}. \quad (4)$$

По формуле (4) легко получить значение коэффициента K для объектов других форм по значениям коэффициентов распознавания формы объектов B , приведенным в работе [2].

По формуле (3) для выбранных масштабов аэросъемки (см. табл. 1) получим геометрические размеры распознаваемых объектов разных форм L в мм (табл. 2), где также приведем значения коэффициентов K и B .

Таблица 2 – Расчет размеров дешифрируемых объектов L разных форм с вероятностью 0,75

Форма объекта	M_C		
	10000	15000	20000
Круглая, L , мм	$B_1 = 0,97 \quad K_1 = 1,8302$		
	228,8	343,2	457,6
Прямоугольная, L , мм	$B_2 = 1,45 \quad K_2 = 2,7358$		
	342	513	684
Форма угла, L , мм	$B_3 = 1,58 \quad K_3 = 2,9811$		
	373	559	746
Квадрат L , мм	$B_4 = 1,72 \quad K_4 = 3,2453$		
	406	608	812
Стенка L , мм	$B_5 = 2,78 \quad K_5 = 5,2453$		
	656	983	1312

Таким образом, мы сможем отдешифровать камерально с вероятностью 0,75 все объекты разных форм, размеры которых будут больше значений, приведенных в таблице 2.

Анализ таблицы 2 показал, что объекты круглой формы имеют минимальные размеры, а объекты формы «стенка» – максимальные размеры. Из таблицы 2 видно, что объекты формы «стенка» имеют максимальный коэффициент распознавания B , поэтому такие объекты можно будет отдешифровать в случае, если их протяженность будет больше значений, указанных в таблице 2. К таким объектам относятся различные ограды разной высоты, а также сохранившиеся стены исторического значения, заборы, изгороди и т.п. [4].

Приведенные в таблице 2 объекты разных форм являются простыми и распознаются по прямым признакам, им присущим. Простой объект чаще всего является элементом сложного объекта. Поэтому он располагается на местности в окружении других простых объектов. Это сказывается на качестве результатов дешифрирования – повышает их достоверность за счет того, что в процессе используются дополнительные демаскирующие признаки [2].

Из расчетов (см. табл. 2) явно просматривается закономерность – геометрический размер распознаваемого объекта пропорционален масштабу аэросъемки. Кроме того, размеры дешифрируемых с вероятностью 0,75 объектов растут пропорционально отношению B_i/B_1 , что подтверждают расчеты. Величины отношений B_i/B_1 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения отношений B_i/B_1

B_i	0,97	1,45	1,58	1,72	2,78
Форма объекта	Круг	Прямоугольник	Угол	Квадрат	Стенка
B_i/B_1	1,0	1,5	1,63	1,77	2,87

Используя отношение B_i/B_1 (см. табл. 3) и имея размеры распознаваемых объектов круглой формы, можно рассчитать размеры распознаваемых объектов других форм, умножив размер распознаваемого объекта круглой формы на приведенное в таблице 3 отношение B_i/B_1 . Отношение B_i/B_1 показывает,

во сколько раз больший размер объекта любой формы будет отдешифрован по отношению к круглому с вероятностью 0,75.

В зависимости от характера преобладающих на местности объектов и разрешающей способности снимка можно рассчитать масштаб фотографирования, при котором сможем отдешифровать выбранные объекты с вероятностью 0,75. Для вывода формулы расчета размера распознаваемого объекта любой формы воспользуемся зависимостью (3) [1], куда подставив значение A из формулы (2), получим

$$L = K \frac{M_c}{2R}. \quad (5)$$

Решим равенство (5) относительно знаменателя масштаба фотографирования M_c :

$$M_c = \frac{2LR}{K}. \quad (6)$$

Здесь K – коэффициент, зависящий от формы объекта. Значения коэффициентов K для объектов разных форм приведены в таблице 2.

На основании формулы (6) можно вычислить масштаб аэрофотосъемки, при котором будет выполнено дешифрирование с вероятностью 0,75 для объектов разных форм.

Рассмотрим, как увеличение вероятности дешифрирования повлияет на размеры дешифрируемых объектов для случая, когда возникнет необходимость выполнить дешифрирование с вероятностью P , больше чем 75%, т.е. $P > 0,75$ (например, 0,80; 0,85; 0,90 и 0,95). Для этого обратимся к формуле (1). Формулу (1) можно представить в следующем виде:

$$P = e^{-x^2}, \quad (7)$$

где $x^2 = -\left(B \frac{A}{L}\right)^2$.

Значение x можно определить по формуле:

$$x = \sqrt{\left| -\left(B \frac{A}{L}\right)^2 \right|} = B \frac{A}{L}. \quad (8)$$

Приняв вероятность распознавания P , равной 0,75; 0,8; 0,85; 0,9 и 0,95, можно найти x , например, в справочнике по математике [5]. Используя значение x , по формуле (3) определим искомое значение размеров дешифрируемых с разной вероятностью объектов различных форм L . Результаты расчетов приведем в таблице 4.

Таблица 4 – Расчет размеров распознаваемых с разной вероятностью объектов различных форм

P	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
x^2	0,285	0,224	0,163	0,105	0,051
x	0,534	0,473	0,404	0,324	0,226
L	$\frac{BA}{0,534}$	$\frac{BA}{0,473}$	$\frac{BA}{0,404}$	$\frac{BA}{0,324}$	$\frac{BA}{0,226}$
L , при $B = 0,97$	1,816 A	2,051 A	2,401 A	2,994 A	4,292 A
L , при $B = 1,45$	2,715 A	3,066 A	3,589 A	4,475 A	6,416 A
L , при $B = 1,58$	2,959 A	3,340 A	3,911 A	4,876 A	6,991 A
L , при $B = 1,72$	3,321 A	3,336 A	4,257 A	5,309 A	7,611 A
L , при $B = 2,78$	5,206 A	5,877 A	6,881 A	8,580 A	12,301 A
$L_i/L_{0,75}$	1,00	1,13	1,32	1,65	2,36

В таблице 4 значение коэффициента B зависит от формы объекта. Название формы объекта для разных коэффициентов приведены в таблице 3. Величина A – размер минимального объекта, изобразившегося на снимке, рассчитывается по формуле (2). Значения A для некоторых масштабов фотографирования приведены в таблице 1.

Как видим (табл. 4), размеры дешифрируемых объектов L с увеличением вероятности дешифрирования P растут пропорционально отношению $L_i/L_{0,75}$, но зависимость эта нелинейная, чем с большей вероятностью необходимо отдешифровать объект, тем более крупный масштаб фотографирования надо

принять. Если необходимо выполнить дешифрирование с вероятностью 0,95, то придется увеличить масштаб аэросъемки более чем в два раза, что приведет к увеличению числа обрабатываемых аэроснимков более чем в два раза.

При выборе масштаба фотографирования для разной вероятности дешифрирования достаточно разделить рассчитанный по формуле (6) знаменатель масштаба съемки на отношение $L_i/L_{0,75}$, где L_i – минимальный размер распознаваемого объекта при разной вероятности дешифрирования.

Если трудно оценить, какие на местности преобладают объекты малых размеров, то при прогнозировании возможностей дешифрирования простых топографических элементов местности коэффициенты распознавания их формы V_i допустимо считать равными и выбирать в пределах от 2 до 3. В этом случае обеспечивается надежное определение нижней границы ожидаемой вероятности распознавания объектов [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеева, А.А. Расчет разрешения при сканировании для обеспечения качественного дешифрирования снимка / А.А. Михеева, А.В. Ильюшенко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 176–182.
2. Живичин, А.Н. Дешифрирование фотографических изображений / А.Н. Живичин, В.С. Соколов. – М. : Недра, 1980. – 253 с.
3. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. – Минск : УП «БелНИЦЗЕМ», 2003. – 78 с.
4. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000; 1:2000; 1:1000; 1:500. – М. : Недра, 1989. – 286 с.
5. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, 1967. – 608 с.

Поступила 23.02.2016

AEROPHOTOGRAPHY SCALE SELECTION FOR QUALITATIVE DECODING OF DIFFERENT SHAPES OBJECTS

A. MIKHEEVA

Aerophotography scale and resolving capacity of the image in terms of quality of decoding and hence the quality of generated (updated) topographic maps (plans) as a whole are considered. An assessment of the choice of high-quality aerophotography scale for decoding according to the resolving capacity of images and size prevailing in the area of different shapes objects is analyzed. A formula for calculating aerophotography scale in which interpretation will be performed with both the probability of 0.75 and more is offered. However, the increasing of the probability of decoding facilities will lead to the fact that aerophotography have to perform on a large scale and, consequently, to an increase in office work, but it will reduce the amount of field work to refine laboratory decoding.

Keywords: aerophotography, scale, interpretation, resolving capacity, the probability of decoding.

УДК 528.3

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРИБОРОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОСТОЯННОЙ ПОПРАВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ДАЛЬНОМЕРА

канд. техн. наук, доц. С.Д. КРЯЧОК;
канд. воен. наук, доц. И.И. БОХАНОВ; Л.С. МАМОНТОВА
(Черниговский национальный технологический университет, Украина)

Обосновывается точность определения постоянной поправки электронных дальномеров в условиях наклонной местности для безбазисного створного способа. Учтены отклонения среднего штатива в плане и по высоте относительно створной линии крайних штативов. Разработана математическая модель и выполнено моделирование для электронных дальномеров с заданными параметрами точности. В результате моделирования получены значения допустимых смещений среднего штатива в плане и по высоте, величины допустимых неравенств плеч на станции, число приемов определения постоянной поправки для расстояний от 10 до 100 м.

Ключевые слова: постоянная поправка электронного дальномера, электронный тахеометр, измерение расстояний.

Для определения постоянной поправки электронного дальномера (далее – постоянной поправки) при отсутствии базиса можно использовать безбазисный створный способ [1; 2]. Для его реализации устанавливаются в створ на одной высоте три штатива. Производят измерение линии S_{13} электронным тахеометром между крайними штативами, а с крайних штативов – на средний, получают значения S_{12} и S_{32} .

Величина постоянной поправки c определяется по следующей формуле [2]:

$$c = S_{13} - S_{12} - S_{32}. \quad (1)$$

Однако, согласно исследованиям [3], в данном способе не обязательно устанавливать приборы на одной высоте, достаточно установить их на одной линии, даже наклонной. Поэтому можно использовать как горизонтальную местность, так и местность со значительным уклоном. Отражатель на среднем штативе может быть немного смещен в плане и по высоте относительно створной линии крайних штативов. Тогда линии S_{12} и S_{32} проектируются на замыкающую линию (створную) S_{13} по закону косинуса, который для малых углов близок к единице, а сами проекции близки по величине самим линиям. Ставится задача определения допустимого смещения среднего штатива в плане и по высоте относительно створной линии крайних для безбазисного створного способа определения постоянной поправки.

Исследовательская часть. На рисунке 1 показано пространственное положение линий, измеренных на станции определения постоянной поправки.

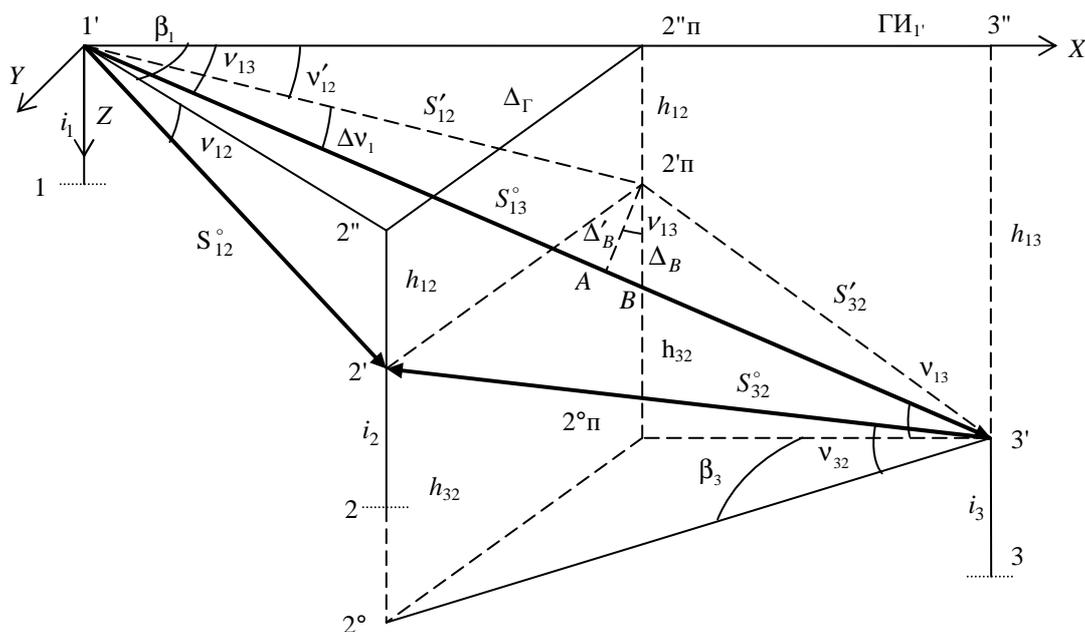


Рисунок 1. – Пространственное положение измеренных линий

В точках 1, 2, 3 наклонной площадки устанавливаются штативы с подставками, к которым поочередно крепятся электронный дальномер и отражатель на высоте инструмента i_1, i_2, i_3 . В точках 1', 2', 3' измеряются расстояния S_{12}, S_{32}, S_{13} .

На рисунке 1 показаны линии, содержащие постоянную поправку c в неявном виде, то есть $S_{ij}^\circ = S_{ij} + c$. Линия S_{13}° имеет угол наклона v_{13} , превышение h_{13} относительно горизонта инструмента точки 1'. Линия S_{12}° имеет угол наклона v_{12} , превышение h_{12} относительно точки 2" и горизонтальный угол β_1 относительно S_{13}° . Линия S_{32}° образует горизонтальный угол β_3 относительно линии S_{13}° , угол наклона v_{32} , превышение h_{32} относительно точки 2°. Точки 2°п, 2'п, 2"п – проекции точек 2°, 2', 2" на вертикальную плоскость 1', 3", 3', проходящую через линию S_{13} . Проекциями линий $S_{12}^\circ, S_{32}^\circ$ на вышеуказанную плоскость являются отрезки S'_{12} и S'_{32} ; Δ_Γ – смещение в плане среднего штатива относительно створа крайних. Отрезок (2'п – В) равен смещению по высоте Δ_B среднего штатива относительно линии S_{13}° . Отрезок Δ'_B – проекция Δ_B на перпендикуляр (2'п – А) к линии S_{13}° .

Очевидно, что смещения Δ_Γ и Δ_B приведут к погрешности Δ_c формулы (1), которая имеет строгое решение для расположения всех штативов на одной линии. В этом случае значение погрешности постоянной поправки равно

$$\Delta_c = \tilde{c} - c, \quad (2)$$

где \tilde{c} – значение постоянной поправки при наличии смещений; c – значение постоянной поправки при отсутствии смещений.

Смещения Δ_Γ и Δ_B приводят к возникновению пространственного треугольника 1', 2', 3' (см. рис. 1), у которого стороны S_{12} и S_{32} будут всегда больше, чем их значения при отсутствии смещений. Поскольку указанные стороны входят в формулу (1) с отрицательным знаком, то при неизменном значении S_{13} имеем $\tilde{c} \leq c$, а их разность $\Delta_c \leq 0$. Поэтому Δ_c является систематической погрешностью.

В случае если центральный штатив расположен посередине, средняя квадратическая погрешность (СКП) определения постоянной поправки по формуле (1) равняется

$$m_c = \sqrt{m_{S_{13}}^2 + 2m_{S_{12}}^2}, \quad (3)$$

где $m_{S_{13}}, m_{S_{12}}$ – СКП измерения расстояний S_{13} и S_{12} соответственно.

Для известной формулы точности электронных дальномеров $m_S = a_{мм} + b_{мм} \cdot S_{км}$ и $S_{13} \leq 100$ м, $m_{S_{ij}} \approx a$, а $m_c \approx \sqrt{3}a$, согласно (3).

Погрешность измерения линии с учетом погрешности определения постоянной поправки и отсутствия Δ_c составляет $m'_S = \sqrt{m_S^2 + m_c^2}$. Чтобы m_c не влияла на точность m'_S , необходимо соблюсти следующее условие: $m_c = \frac{1}{3}m_S$. Для минимальных измеряемых расстояний $m_S \approx a$, тогда $m_c = \frac{1}{3}a$.

Как видно, реальная точность определения постоянной поправки $m_c \approx \sqrt{3}a$ больше требуемой. Поэтому необходимо выполнить N приемов ее определения, получить среднее значение постоянной поправки c_{cp} с точностью $m_{c_{cp}} = \frac{1}{3}a$.

Тогда

$$N = \frac{m_c^2}{m_{c_{cp}}^2}, \quad (4)$$

что составит 27 приемов после подстановки соответствующих значений.

Если ограничить смещения среднего штатива предельными значениями $\Delta_{\Gamma_{пр}}, \Delta_{B_{пр}}$, а также менять расположение среднего и крайнего штативов в каждом приеме случайным образом, то модуль Δ_c

тоже будет изменяться случайным образом в пределах от нуля до предельного значения $\Delta_{c_{np}}$, а значение Δ_{c_i} в приемах будут независимы. Тогда распределение модуля среднего значения Δ_c будет стремиться к нормальному с математическим ожиданием $b_c = \frac{|\Delta_{c_{np}}|}{2}$ [4].

Точность измерения линии в этом случае определяется по формуле Бьенэме [4]:

$$m'_S = \sqrt{m_S^2 + m_{c_{cp}}^2 + b_c^2}. \quad (5)$$

Чтобы $m_{c_{cp}}$ и b_c не влияли на точность измерения линий, необходимо соблюсти условие:

$$\sqrt{m_{c_{cp}}^2 + b_c^2} = \frac{1}{3} m_S = \frac{1}{3} a.$$

В свою очередь, чтобы значительно не увеличивать число приемов, ставится условие ничтожного влияния величины $b_c = \frac{1}{3} m_{c_{cp}}$.

Тогда

$$m_{c_{cp}} = \frac{a}{\sqrt{10}}, \quad (6)$$

$$\Delta_{c_{np}} = -\frac{2}{3\sqrt{10}} a. \quad (7)$$

Для определения предельных значений отклонений среднего штатива по высоте $\Delta_{B_{np}}$ применен метод имитационного моделирования с использованием программного средства Microsoft Excel. В качестве исходной математической модели использована формула (2), где в качестве c можно принять конкретное число. Однако была использована математическая модель-компаратор, позволяющая проконтролировать правильность вычисления расстояний S_{ij} [3]:

$$c = \frac{S_{12} \cos v_{12} \cos \beta_1 + S_{32} \cos v_{32} \cos \beta_3 - S_{13} \cos v_{13}}{\cos v_{13} - \cos v_{12} \cos \beta_1 - \cos v_{32} \cos \beta_3}. \quad (8)$$

Исходными данными для реализации математической модели-компаратора (8) являются: S_{13}° , v_{13} , $\Delta_{Г_{np}}$, $\Delta_{B_{np}}$, c .

Так как устанавливать средний штатив в створ крайних в плане легче, чем по высоте, то принимается $\Delta_{Г_{np}} = 0,03$ м, что соответствует возможному перемещению подставки прибора относительно центра отверстия головки штатива.

Принимается, что угол наклона v_{13} линии S_{13} соответствует наклону местности, а средний штатив устанавливается посередине на расстоянии $S^\circ = S_{13}^\circ / 2 = (I' - B)$, но со смещением в плане на $\Delta_{Г_{np}}$.

Вводится система координат, где за ось абсцисс принято направление $I' - 3''$ (см. рис. 1); за ось ординат – перпендикуляр к горизонтальной плоскости створа линии S_{13}° ; за ось аппликат – вертикаль точки I' , направленная в надир.

Для расчета необходимых значений элементов математических моделей (8), (1) и (2) использованы следующие формулы:

$$S_x^\circ = S^\circ \cos v_{13}, \quad S_z^\circ = S^\circ \sin v_{13}, \quad D_{12}^\circ = \sqrt{(S_x^\circ)^2 + \Delta_{Г_{np}}^2}, \quad Z_{2'} = h_{12} = S_z^\circ - \Delta_{B_{np}}, \quad S_{12}^\circ = \sqrt{(D_{12}^\circ)^2 + h_{12}^2},$$

$$X_{3'} = S_{13}^\circ \cos v_{13}, \quad Y_{3'} = 0, \quad Z_{3'} = S_{13}^\circ \sin v_{13}, \quad S_{32}^\circ = \sqrt{(X_{3'} - X_{2'})^2 + (Y_{3'} - Y_{2'})^2 + (Z_{3'} - Z_{2'})^2},$$

$$S_{ij} = S_{ij}^\circ - c. \quad (9)$$

Для данных значений S_{13}° , v_{13} , $\Delta_{гип}$, c подбираются такие значения $\Delta_{Вип}$, которые в результате вычислений по формулам (9), (8), (1) и (2) позволяют получить значение Δ_c , не превышающее $\Delta_{сип}$, рассчитанное по формуле (7).

Математическое моделирование выполнено для электронного дальномера с точностью измерения расстояний $m_s = 2 \text{ мм} + 2 \text{ мм} \cdot S, \text{ км}$ и постоянной поправкой $c = -40 \text{ мм}$.

Согласно формулам (6) и (7), $m_{ср} = 0,632 \text{ мм}$, $\Delta_{сип} = 0,4216 \text{ мм}$.

Число приемов N вычислялось по формуле (4), а m_c – по формуле (3) для каждого значения расстояний S_{13} и $S_{12} = S_{13}/2$. Определялось допустимое смещение ΔS среднего штатива относительно центра створа крайних вдоль линии S_{13}° , что соответствует половине величины неравенств плеч среднего штатива на станции.

Результаты имитационного моделирования приведены в таблице.

Значения параметров определения постоянной поправки в зависимости от значений S_{13} и v_{13}

N_{13}	S_{13}	10 м	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м	70 м	80 м	90 м	100 м
0°	$\Delta_{Вип}, \text{ м}$	0,034	0,057	0,073	0,086	0,098	0,108	0,117	0,126	0,134	0,142
	$\Delta S, \text{ м}$	$\pm 0,7$	$\pm 1,2$	$\pm 1,8$	$\pm 1,5$	$\pm 1,4$	$\pm 2,4$	$\pm 3,7$	$\pm 2,9$	$\pm 3,5$	$\pm 1,4$
5°	$\Delta_{Вип}, \text{ м}$	0,034	0,057	0,073	0,087	0,098	0,108	0,118	0,126	0,134	0,142
	$\Delta S, \text{ м}$	$\pm 0,8$	$\pm 1,4$	$\pm 2,2$	± 3	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	$\pm 4,7$	$\pm 4,4$	$\pm 5,2$	$\pm 4,5$
10°	$\Delta_{Вип}, \text{ м}$	0,035	0,058	0,074	0,088	0,099	0,110	0,119	0,128	0,136	0,144
	$\Delta S, \text{ м}$	$\pm 0,4$	$\pm 1,1$	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 2,8$	$\pm 1,0$	$\pm 3,2$	$\pm 2,7$	$\pm 3,8$	$\pm 2,8$
m_c		3,49	3,51	3,53	3,56	3,58	3,60	3,63	3,65	3,67	3,70
N		31	31	32	32	32	33	33	34	34	35
Реком. $\Delta_{Вип}, \text{ м}$		0,033	0,057	0,073	0,086	0,098	0,108	0,117	0,126	0,134	0,142

Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие *выводы*. Величины предельного вертикального смещения по высоте $\Delta_{Вип}$ в зависимости от расстояния S_{13} при изменении угла наклона линии S_{13}° от 0 до 10° увеличились всего на 1...2 мм. Окончательно все значения $\Delta_{Вип}$ приведены к наклону 0° (рекомендуемое $\Delta_{Вип}$). При этом Δ_B уменьшено до 0,033 мм для $S_{13} = 10$ м, чтобы значение ΔS было в пределах 1 м. Тогда предельное неравенство плеч на станции составляет ± 2 . Число приемов N , которое в случае $\Delta_c = 0$ составляло бы от 28 для $S_{13} = 10$ м и 31 – для $S_{13} = 100$ м, согласно формуле (3) увеличилось до 31...35 в зависимости от длины замыкающей. Поэтому рекомендуемыми расстояниями для определения постоянной поправки являются 10...50 м, для которых $N = 31...32$.

График значений $\Delta_{Вип}$ в зависимости от S_{13} показан на рисунке 2.

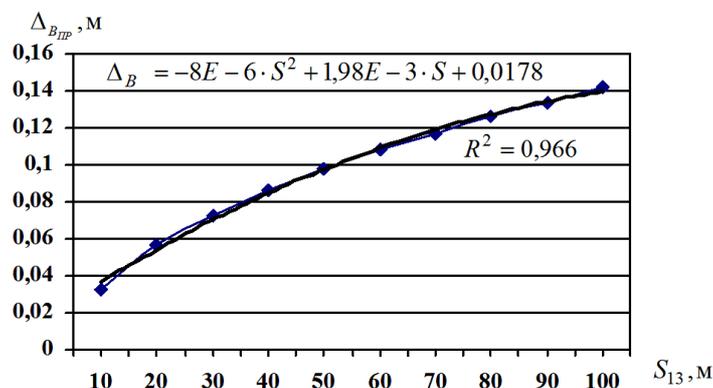


Рисунок 2. – Зависимость $\Delta_{Вип}$ от расстояния S_{13}

Представленный график аппроксимируется полиномом $\Delta_{B_{np}} = -8 \cdot 10^{-6} S_m^2 + 1,98 \cdot 10^{-3} S_m + 0,0178$ (м) с показателем достоверности аппроксимации $R = 0,996$. Полином используется для вычисления значений $\Delta_{B_{np}}$ в зависимости от конкретных значений S_{13} на станции.

Для расчета точности определения постоянной поправки в зависимости от измеренных значений Δ_Γ и Δ_B на станции использована упрощенная формула, полученная на основе выражения (8) разложением в ряд функции $\cos v_{ij}$ с точностью до второго члена разложения [5]:

$$c = S_{13} - S_{12} - S_{32} + \frac{\Delta_\Gamma^2}{2} \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{1}{S_{32}} \right) + \frac{(\Delta'_B)^2}{2} \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{1}{S_{32}} \right). \quad (10)$$

Контролировать допуски Δ_Γ , Δ'_B можно: в плане – боковым нивелированием с СКП порядка 2 мм, по высоте – геометрическим нивелированием с использованием нивелира типа НЗ, обеспечивающим СКП определения превышения 2,0 мм для расстояний до 100 м [5]. Значение $\Delta'_B \approx \Delta_B$ определяется косвенным образом через превышения h_{12} и h_{32} . Величина $(B - 2''_\Pi) = S_{13} \sin v_{13} = h_{12} + \Delta_B$ при условии, что $(I' - B) = (B - 3') = S_{13}^\circ$ (см. рис. 1). Тогда $h_{32} = (2''_\Pi - 2'_\Pi) = (B - 2''_\Pi) + \Delta_B = h_{12} + 2\Delta_B$. Кроме того, $h_{12} + h_{32} = h_{13}$. В этом случае $2h_{12} + 2\Delta_B = h_{13}$, откуда

$$\Delta_B = \frac{h_{13}}{2} - h_{12}. \quad (11)$$

Дифференцирование выражения (10) с учетом (11) и $S_{12} \approx S_{32} \approx S_{13}/2$ позволяет получить формулу определения СКП постоянной поправки:

$$m_c = \sqrt{m_{S_{13}}^2 + 2m_{S_{12}}^2 + 4 \frac{\Delta_B^2}{S_{13}^2} (4m_{h_{12}}^2 + m_{h_{13}}^2) + 16 \frac{\Delta_\Gamma^2}{S_{13}^2} m_{\Delta_\Gamma}^2}. \quad (12)$$

Для минимальных расстояний и соответствующих им значений $\Delta_{B_{np}}$ и $\Delta_{\Gamma_{np}}$, приведенных в таблице, коэффициенты при третьем и четвертом слагаемых формулы (12) на несколько порядков меньше коэффициентов при $m_{S_{13}}^2$ и $m_{S_{12}}^2$. Поэтому m_c в одном приеме рассчитывается по формуле (3), что и было сделано выше.

В случае определения постоянной поправки электронного тахеометра можно воспользоваться его горизонтальным и вертикальным кругами. Для этого измеряется горизонтальный угол β_1 (см. рис. 1) и вертикальный угол в направлении на точку 3' и точку 2'. Этот угол близок к вертикальному углу Δv_1 , что следует из следующих соображений.

Ясно, что $\Delta v_1 = v_{13} - v'_{12}$ (см. рис. 1). Поскольку $\operatorname{tg} v'_{12} = \frac{h_{12}}{I' - 2''_n} = \frac{\operatorname{tg} v_{12}}{\cos \beta_1}$, то для малых углов β_1 $v'_{12} \approx v_{12}$. Тогда $\Delta v_1 \approx v_{13} - v_{12}$. Поэтому измеряется практически вертикальный угол Δv_1 .

Из рисунка 1 видно, что

$$\Delta_\Gamma = S_{12}^\circ \cos v_{12} \sin \beta_1 \approx S_{12} \cos v_{12} \sin \beta_1,$$

и

$$\Delta'_B = (I' - A) \operatorname{tg} \Delta v_1 = [(I' - B) - \Delta_{B_{np}} \cdot \sin v_{13}] \operatorname{tg} \Delta v_1.$$

Для значений $\Delta_{B_{np}}$ (см. табл. 1), малых по сравнению с $(I' - B) = \frac{S_{13}^\circ}{2} \approx \frac{S_{13}}{2}$, получится $\Delta'_B \approx \frac{S_{13}}{2} \operatorname{tg} \Delta v_1$.

С учетом приведенного выше выражение (10) примет вид

$$c = S_{13} - S_{12} - S_{32} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{S_{12}} + \frac{1}{S_{32}} \right) \left(S_{12}^2 \cos^2 v_{12} \sin^2 \beta_1 + \frac{S_{13}^2}{4} \operatorname{tg}^2 \Delta v_1 \right). \quad (13)$$

После дифференцирования (13) и с учетом $S_{12} \approx S_{32}$ получим формулу СКП определения постоянной поправки для случая определения внестворного положения среднего штатива электронным тахеометром:

$$m_c = \sqrt{m_{S_{13}}^2 + 2m_{S_{12}}^2 + \frac{4}{S_{12}^2} \left[\Delta_T^4 \left(\operatorname{tg}^2 \nu_{12} \frac{m_v^2}{\rho^2} + \operatorname{ctg}^2 \beta \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \right) + 4 \frac{(\Delta'_B)^4}{\sin^2 2\Delta \nu_1} \frac{m^2 \Delta \nu}{\rho^2} \right]}, \quad (14)$$

где m_v , $m_{\Delta \nu}$, m_β – СКП измерения тахеометром углов наклона, вертикальных и горизонтальных углов соответственно.

Для $m_v = m_{\Delta \nu} = m_\beta = 10''$ и параметров формулы (14), рассчитанных согласно данным таблицы, слагаемое формулы (14), приведенное в квадратных скобках, на несколько порядков меньше суммы двух предыдущих. Поэтому СКП постоянной поправки электронного тахеометра определяется по формуле (3).

Заключение. В результате проведенного исследования выполнено обоснование точности определения постоянной поправки электронных дальномеров для безбазисного створного способа с учетом внестворного положения среднего штатива в плане и по высоте для наклонной местности. Предложена математическая модель и выполнено моделирование для электронного дальномера с заданными параметрами точности, в результате которого получены: величины допустимых смещений среднего штатива относительно линии крайних в плане и по высоте; величины допустимых неравенств плеч на станции; число приемов определения постоянной поправки для расстояний от 10 до 100 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошилов, А.П. Определение постоянной поправки дальномера электронного тахеометра / А.П. Ворошилов // Геопрофи. – 2005. – № 4. – С. 46–47.
2. Крячок, С.Д. До визначення постійної поправки електронних віддалемірів / С.Д. Крячок // Вісник геодезії та картографії. – 2015. – № 2. – С. 4–7.
3. Крячок, С.Д. Розроблення просторової математичної моделі постійної поправки електронних віддалемірів / С.Д. Крячок, Л.С. Мамонтова // Вісник Чернігівського держ. технологічного ун-ту. Серія «Технічні науки». – 2015. – № 1 (1). – С. 118–125.
4. Войтенко, С.П. Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів / С.П. Войтенко. – Київ : КНУБА, 2003. – 216 с.
5. Справочник по инженерной геодезии / под общ. ред. Н.Г. Видуева. – Киев : Вища школа, 1978. – 376 с.

Поступила 25.04.2016

SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF MUTUAL LOCATION OF THE INSTRUMENTS AT THE STATION OF DETERMINE OF CONSTANT CORRECTION OF ELECTRONIC RANGEFINDER

S. KRYACHOK, I. BOHANOV, L. MAMONTOVA

Substantiation of the accuracy of determining constant corrections for electronic rangefinder's on sloping terrain for instrumentation, located in line, done. Taken into account the deviations of the average tripod in plan and in height relative to the middle of the line, connecting extreme tripods. The mathematical model and simulation for electronic rangefinders with the given parameters of the accuracy developed. As a Result of simulation modeling received: allowable displacement of the middle tripod in plan and in height; acceptable inequalities of shoulders at the station; the number of ways to determine the constant correction for distances from 10 to 100 m.

Keywords: constant correction of electronic rangefinder, electronic total station, measuring distances.

УДК 528.21

**АНАЛИЗ ПОЛУЧЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВЫСОТ ТОЧЕК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛЕЙ ГЕОИДА****К.И. МАРКОВИЧ; М.В. МАКАРОВА**
(Полоцкий государственный университет)

Представлен анализ возможности получения нормальных высот точек земной поверхности с использованием данных спутниковых измерений и глобальных гравитационных моделей Земли. Выполнена оценка точности моделей геоида EGM2008, EIGEN-6C4 по разностям аномалий высот, вычисленных для пунктов геодезической сети учебно-научного полигона Полоцкого государственного университета по инструментальным данным и данным моделей.

Ключевые слова: спутниковые измерения, нормальные высоты, точки земной поверхности, модели геоида, разности аномалий высот.

Как известно, конечным итогом спутниковых измерений являются пространственные прямоугольные координаты определяемой точки в геоцентрической общеземной системе координат WGS-84, которые по известным формулам строго преобразуются в геодезические координаты системы WGS-84: широту B , долготу L , геодезическую высоту H . Дальнейшее преобразование координат из общеземной пространственной системы координат WGS-84 в другие системы (СК-42, СК-95) выполняется с использованием параметров перехода, представляющих собой семь элементов пространственной ортогональной модели: ΔX , ΔY , ΔZ – линейные параметры сдвига систем; ω_x , ω_y , ω_z – угловые параметры поворота систем; m – масштабный коэффициент.

В практике топографо-геодезических работ распространены плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса – Крюгера и нормальные высоты. Актуальным на сегодняшний день для Беларуси является возможность получения нормальных высот по данным ГНСС-измерений с точностью, удовлетворяющей крупномасштабным топографическим съемкам, а также иным видам геодезических работ.

Согласно теории Молоденского, геодезические высоты H являются суммой слагаемых: расстояния от референц-эллипсоида до поверхности квазигеоида (аномалии высоты ζ) и расстояния от поверхности квазигеоида до соответствующей точки поверхности Земли (нормальной высоты H^f) [1]

$$H = H^f + \zeta. \quad (1)$$

На сегодняшний день доступными и наиболее точными для практического применения являются модель геоида национального агентства геопро пространственных исследований Министерства обороны США (National Geospatial-Intelligence Agency – NGA) EGM2008 и модель Международного центра глобальных земных моделей (International Centre for Global Earth Models – ICGEM) EIGEN-6C4, имеющие полный набор гармонических коэффициентов геопотенциала до 2190-й степени [2].

Так как нормальные высоты отнесены к поверхности квазигеоида, а гравиметрические модели Земли несут информацию о геоиде, то перевод геодезических высот в нормальные высоты с использованием этих моделей будет содержать в себе ошибку, равную отклонению геоида от квазигеоида в данной точке. Строго говоря, с использованием моделей будут получены ортометрические высоты, а не нормальные. Однако практический интерес представляет возможность получения нормальных высот по данным ГНСС-измерений при помощи гравитационных моделей.

В рамках данной работы выполнен анализ возможности получения нормальных высот с использованием данных спутниковых измерений и моделей геоида EGM2008 и EIGEN-6C4. Исследование выполнялось по разностям аномалий высот, вычисленных для 10-ти геодезических пунктов учебно-научного полигона Полоцкого государственного университета.

Для получения аномалий высот на исследуемых пунктах нами были выполнены ГНСС-измерения двухчастотными спутниковыми приемниками Trimble R7 Zephyr Geodetic, а также результаты геометрического нивелирования III класса.

Аномалии высот в определяемых пунктах по гравитационным моделям Земли получены на основании данных Calculation Service сайта Международного центра глобальных земных моделей (International Centre for Global Earth Models – ICGEM) [2]. Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям, представлены в таблице 1. Схема расположения геодезических пунктов на учебно-научном полигоне проиллюстрирована рисунком 1.

Таблица 1 – Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям

Имя точки	EGM2008 2190	EIGEN-6C4 (2014) 2190
1001	20,525	20,565
1002	20,522	20,562
1004	20,520	20,560
1005	20,520	20,560
1005	20,521	20,561
1006	20,512	20,552
101	20,528	20,568
102	20,487	20,527
103	20,547	20,587
104	20,539	20,580
105	20,540	20,580

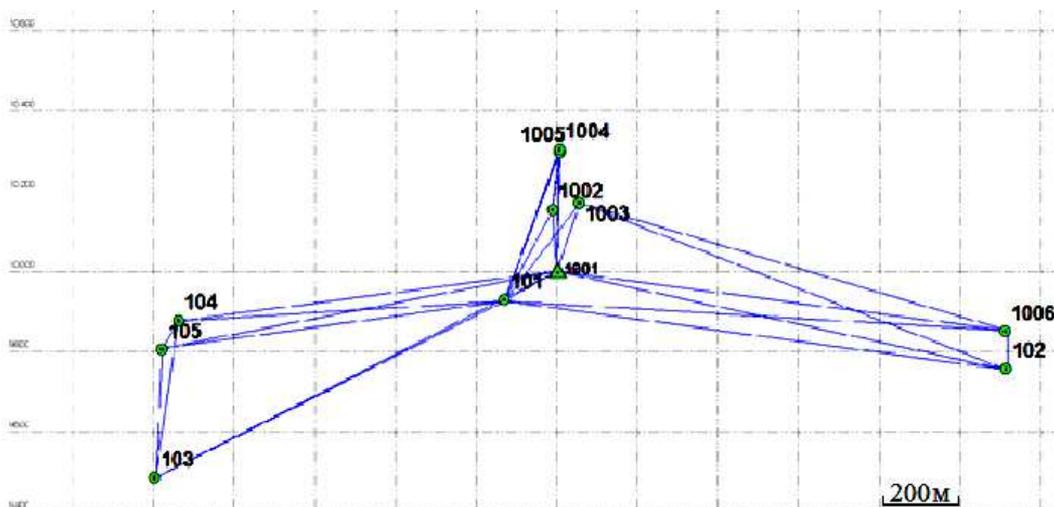


Рисунок 1. – Схематическое расположение геодезических пунктов на учебно-научном полигоне

Информация об аномалиях высот с использованием результатов ГНСС-измерений (2015 г.) была получена путем сравнения разностей геодезических высот между реперами профиля и репером № 1001, с превышениями между этими же реперами, найденными из геометрического нивелирования III класса, которые следует рассматривать как разности нормальных высот реперов. Таким образом, аномалия высоты определялась по формуле (2) [3]:

$$\zeta_i = (H_i^c - H_{\text{№1001}}^c) - \sum_{\text{№1001}}^i h, \quad (2)$$

где ζ_i – аномалия высоты на текущем репере относительно репера № 1001; H_i^c и $H_{\text{№1001}}^c$ – геодезические высоты соответственно текущего репера профиля и репера № 1001, полученные по спутниковым данным; $\sum h$ – суммарное превышение между репером № 1001 до текущего репера, найденное из геометрического нивелирования.

Значения аномалий высоты относительно пункта № 1001, полученные по результатам ГНСС-измерений и геометрического нивелирования, а также по данным гравитационных моделей Земли, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения аномалий высот относительно пункта № 1001

Названия пунктов	1001	1002	1004	1005	1006	1006	101	102	103	104	105
EGM2008, м	0	-0,003	-0,005	-0,005	-0,004	-0,013	0,003	-0,038	0,022	0,014	0,015
EIGEN-6C4, м	0	-0,003	-0,005	-0,005	-0,004	-0,013	0,003	-0,038	0,022	0,015	0,015
GPS-нивелирование, м	0	-0,015	-0,009	-0,001	-0,011	-0,071	0,012	-0,036	0,019	0,051	0,021

Исходя из представленных значений аномалий высоты можно отметить, что модели геоида EGM2008 и EIGEN-6C4 имеют одинаковую форму поверхности на данном участке и систематическое смещение относительно друг друга.

Для данных геодезических пунктов проведена статистическая обработка разностей значений аномалий высоты, полученных из моделей EGM2008 и EIGEN-6C4, и аномалий высоты, полученных по данным инструментальных исследований. Результаты обработки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Статистическая обработка разностей значений аномалий высот

Погрешности	Модель EGM2008 в сравнении с GPS измерениями и геометрическим нивелированием	Модель EIGEN-6C4 в сравнении с GPS измерениями и геометрическим нивелированием
$[\Delta]/n$, м	0,0026	0,0027
+ Δ , max, м	0,058	0,058
- Δ , max, м	-0,037	-0,036
СКП, м	0,0225	0,0223

На основании данных статистического анализа можно сделать вывод, что закон распределения разностей аномалий высоты близок к нормальному. Средние квадратические ошибки (СКП) получения аномалий высот не превышают величин, указанных создателями моделей [2]. Следует отметить, что гравитационные модели имеют систематическое смещение друг относительно друга по значениям абсолютных аномалий высот ($\sigma \approx 40$ мм), однако формы поверхности геоида на данном участке одинаковые. Наличие систематического смещения моделей друг относительно друга вызывает трудности в выборе модели геоида при необходимости получения абсолютных отметок точек в системе нормальных высот. Однако данная ошибка может быть полностью исключена при наличии хотя бы у одной точки отметки в системе нормальных высот, определенной при помощи геометрического нивелирования.

На рисунке 2 представлены изолинии отклонений модельных аномалий высоты геоида EIGEN-6C4 от результатов инструментальных данных (относительно геодезического пункта 1001).

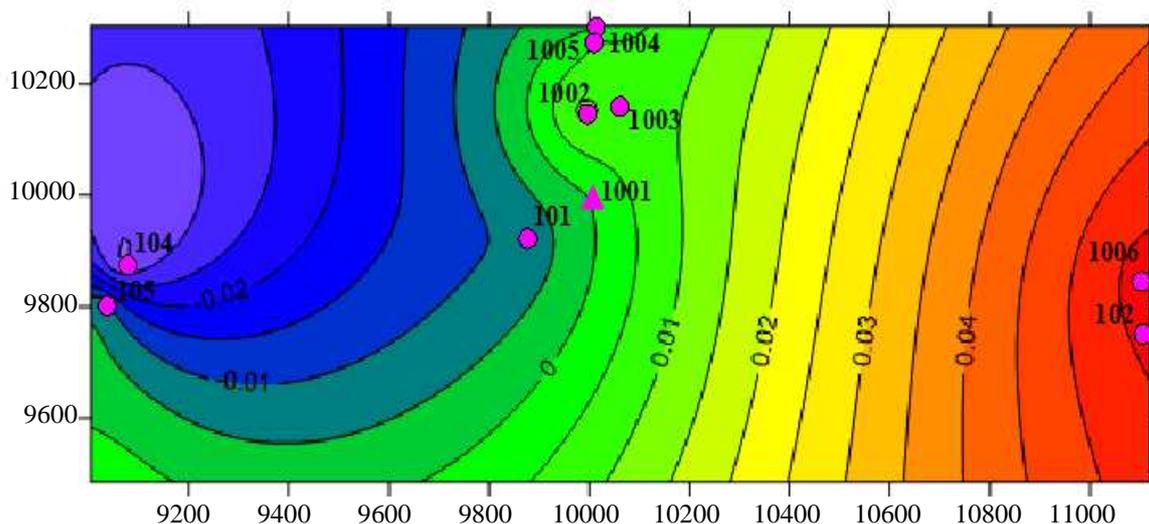


Рисунок 2. – Схема отклонений аномалий высоты геоида EIGEN-6C4 от аномалий, полученных по данным ГНСС-измерений и результатам геометрического нивелирования (сечение изолиний через 0,005 м)

На основании сравнения аномалий высот, полученных как с помощью гравитационных моделей, так и с помощью сочетания ГНСС-измерений и геометрического нивелирования, можно утверждать, что модельные данные имеют хорошую сходимость с результатами инструментальных данных, что подтверждается другими исследованиями [4–6]. Кроме того, на небольшой территории поверхности моделей геоидов EGM2008 и EIGEN-6C4 имеют одинаковую форму, что подтверждает одинаковые разности аномалий высот. Оценка точности получения нормальных высот с помощью моделей геоида EGM-2008, EIGEN-6C4 показала, что применение данных моделей высот геоида на данной территории для опреде-

ления нормальных высот возможно лишь при создании съемочного обоснования для выполнения съемок с высотой сечения рельефа не менее 1 м [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Закатов, П.С. Курс высшей геодезии / П.С. Закатов. – М. : Недра, 1976. – 510 с.
2. Global Gravity Field Models // International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/International Centre for Global Earth Models \(ICGEM\)](http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/International%20Centre%20for%20Global%20Earth%20Models%20(ICGEM)). – Дата доступа. – 20.01.2016.
3. Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований ГБ-4026 : отчет о НИР (ГПОФИ «Недра Беларуси 13» за 2006–2010 гг.) / Полоц. гос. ун-т ; рук. Г.А. Шароглазова ; исполн. В.Н. Коровкин, С.К. Товбас, Д.В. Усов, А.Н. Соловьев. – Новополоцк, 2010.
4. Маркович, К.И. Анализ новейшей глобальной гравитационной модели Земли EIGEN-6C4 по геодезическим и гравиметрическим данным применительно к Полоцкому геодинамическому профилю / К.И. Маркович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 190–193.
5. Маркович, К.И. Оценка точности глобальной гравитационной модели EIGEN-6C2 в сравнении с моделью EGM2008 применительно к Полоцкому геодинамическому профилю / К.И. Маркович // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. Строительство. – 2013. – № 67. – С. 168–171.
6. Пигин, А.П. Глобальная модель геоида EGM2008. Предварительный анализ / А.П. Пигин, С.В. Березина // Инженерные изыскания. – 2009. – № 2. – С. 44–47.
7. Инженерные изыскания для строительства : СНБ 1.02.01-96 / М-во архитектуры и стр-ва. – Введ. 1996.06.01. – Минск, 1996.

Поступила 01.02.2016

ANALYSIS OF OBTAINING NORMAL HEIGHTS POINTS OF THE EARTH'S SURFACE USING DATA FROM SATELLITE MEASUREMENTS AND MODELS OF THE GEOID

K. MARKOVICH, M. MAKAROVA

The paper presents an analysis of opportunities for normal heights points of the earth's surface using satellite data and global models of the Earth's gravity. The estimation accuracy of the geoid models EGM2008, EIGEN-6C4 on differences height anomalies calculated for points geodetic network of educational and scientific polygon Polotsk State University on instrumental data and data models.

Keywords: *satellite measurements, normal heights, point the earth's surface, models of geoid anomalies the difference in elevation.*

УДК 528.63

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЩИХ ТОЧЕК НА РЕЗУЛЬТАТЫ ТРАНСФОРМАЦИИ

А.С. ИВАШНЁВА

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрена двумерная трансформация – преобразование из одной прямоугольной координатной системы в другую. Данные линейные преобразования на плоскости наиболее простые как по форме, так и по содержанию, часто являются достаточными для решения подавляющего числа задач на трансформацию, возникающих в геодезии. Вместе с тем, несмотря на широту использования и кажущуюся понятность процесса двумерной трансформации, есть ряд важных вопросов, которые на сегодняшний день требуют дополнительного исследования. Один из них – влияние геометрии расположения общих точек на результаты трансформации. Представлены результаты вычислительного эксперимента, в ходе которого были получены элементы трансформации для нескольких вариантов расположения общих точек. По полученным результатам проанализировано поведение деформационных элементов двумерной трансформации по мере приближения к наилучшей геометрии.

Ключевые слова: двумерная трансформация, геометрия расположения общих точек, линейные преобразования, деформационные элементы.

В трансформации координатных систем при двумерном преобразовании могут участвовать всего шесть элементов: t_x – сдвиг по оси X ; t_y – сдвиг по оси Y ; φ – угол поворота осей одной координатной системы относительно другой; m_x – величина изменения масштаба по оси X ; m_y – величина изменения масштаба по оси Y ; ε – угол неортогональности между осями двух координатных систем.

В зависимости от того, какими элементами преобразования представлена трансформация, выделяют следующие традиционные модели планового преобразования координат [1]:

- 1) твердотельные, при которых происходит равномерный разворот всех точек на угол φ и сдвиг по осям на величины t_x и t_y соответственно (преобразование квадрата в квадрат);
- 2) конформные, когда выполнен равномерный разворот всех точек на угол φ , сдвиг по осям на величины t_x и t_y и равномерно изменен масштаб на величину m (преобразование квадрата в подобный квадрат);
- 3) ортогональные, где выполнен равномерный разворот всех точек на угол φ , сдвиг по осям на величины t_x и t_y и масштаб изменен на величины m_x и m_y соответственно (преобразование квадрата в прямоугольник);
- 4) аффинные, у которых произведен сдвиг по осям на величины t_x и t_y и масштаб изменен на величины m_x и m_y , а поворот для точек выполнен относительно одной оси на угол φ_1 , другой – на угол $\varphi_2 = \varphi_1 + \varepsilon$, т.е. с нарушением ортогональности исходной системы координат (преобразование квадрата в параллелограмм).

Аффинная модель включает в себя все шесть элементов преобразования и является наиболее общей моделью трансформации. Очевидно, что алгоритм аффинных преобразований дает идентичные результаты для любых других видов преобразований, если в них отсутствуют не свойственные им параметры и погрешности координат. Именно поэтому в ходе вычислительного эксперимента для получения элементов деформации были выбраны аффинные преобразования.

Аффинные преобразования в матричном виде могут быть представлены следующим образом [2]:

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -s \\ s & c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\sin(\varepsilon) \\ 0 & \cos(\varepsilon) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix} = R \cdot M \cdot C \cdot K_c + s, \quad (1)$$

или

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x \cdot \cos(\varphi) & -m_y \cdot \sin(\varphi + \varepsilon) \\ m_x \cdot \sin(\varphi) & m_y \cdot \cos(\varphi + \varepsilon) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix} = T \cdot K_c + s, \quad (2)$$

где X_c, Y_c – координаты в старой системе координат; X_n, Y_n – координаты в новой системе координат; R – матрица вращения; M – диагональная матрица изменения масштабов по осям; C – матрица нарушения ортогональности; s – вектор сдвига по осям; T – матрица трансформации; a, b, d, e, c, f – коэффициенты линейного преобразования на плоскости.

В алгебраической форме аффинную модель преобразования можно представить как [2]:

$$\begin{aligned} X_n &= t_x + m_x \cdot X_c \cdot \cos\varphi - m_y \cdot Y_c \cdot (\sin\varphi + \sin\varepsilon \cdot \cos\varphi), \\ Y_n &= t_y + m_x \cdot X_c \cdot \sin\varphi - m_y \cdot Y_c \cdot (\cos\varphi - \sin\varepsilon \cdot \sin\varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

Для преобразования координат пяти точек в другую систему координат были заложены следующие элементы трансформации:

- угол вращения, равный 30° ;
- угол нарушения ортогональности – 3° ;
- масштаб по оси X – 1,2;
- масштаб по оси Y – 1,5;
- сдвиг по оси X – 100 м;
- сдвиг по оси Y – 200 м.

Системы координат были испорчены ошибками, составляющими 0,05 м.

Полученные по двум системам координат элементы аффинного преобразования для предложенных вариантов геометрии расположения общих точек представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Вычисленные элементы трансформации

Геометрия общих точек	Угол вращения	Угол нарушения ортогональности	Масштаб по оси X	Масштаб по оси Y	Сдвиг по оси X , м	Сдвиг по оси Y , м
A)	29°59'59"	3°00'01"	1,2000	1,5000	99,994	200,006
B)	29°59'59"	3°00'00"	1,2000	1,5000	100,025	200,109
C)	29°59'56"	3°00'02"	1,2000	1,5000	99,926	200,067
D)	29°59'59"	2°59'53"	1,2000	1,5000	99,920	199,993
E)	29°59'45"	3°00'08"	1,2000	1,5000	99,865	200,070
F)	29°59'53"	3°00'11"	1,2000	1,5000	99,936	200,021
G)	29°59'35"	3°00'27"	1,2000	1,5002	99,966	199,856
I)	30°00'57"	2°58'40"	1,1998	1,4997	99,869	199,992
J)	29°58'09"	3°01'25"	1,1998	1,5006	100,073	200,027
K)	57°16'40"	-51°38'02"	0,6507	1,3169	100,036	200,102

Используя вычисленные элементы трансформации (см. табл. 1) произведен расчет отклонений данных элементов от заложенных элементов трансформации. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Отклонения вычисленных элементов трансформации от заложенных элементов трансформации

Геометрия точек	Угол вращения, "	Угол нарушения ортогональности, "	Масштаб по оси X	Масштаб по оси Y	Сдвиг по оси X , м	Сдвиг по оси Y , м
A)	-1	1	0	0	-0,006	0,006
B)	-1	0	0	0	0,025	0,109
C)	-4	2	0	0	-0,074	0,067
D)	-1	-7	0	0	-0,080	-0,007
E)	-15	8	0	0	-0,135	0,070
F)	-7	11	0	0	-0,064	0,021
G)	-25	27	0	0,002	-0,034	-0,144
I)	57	-80	-0,0002	-0,003	-0,131	-0,008
J)	-111	85	-0,0002	0,006	0,073	0,027
K)	27°16'40"	-48°38'02"	-0,5493	-0,1831	0,036	0,102

По абсолютным величинам полученных отклонений построены графики влияния геометрии расположения общих точек на элементы трансформации (рис. 2–4). В построении графиков не участвовали некорректные результаты расчета для геометрии расположения общих точек K), так как в этом случае точки выстроены в одну линию, что приводит к математически вырожденной системе уравнений.

На основе полученных результатов отклонений вычисленных элементов трансформации от заложенных элементов трансформации можно проанализировать изменения деформационных элементов по мере приближения к наихудшей геометрии расположения общих точек.

Полученные результаты показали:

- геометрия расположения общих точек сильно влияет на угловые деформационные элементы (угол вращения, угол нарушения ортогональности);

- отклонения величин изменения масштабов по оси X и по оси Y незначительно возрастают по мере приближения к наихудшему варианту расположения точек, в свою очередь, зависимости искажений таких элементов, как сдвиги по X и по Y , от геометрии расположения общих точек не наблюдается.

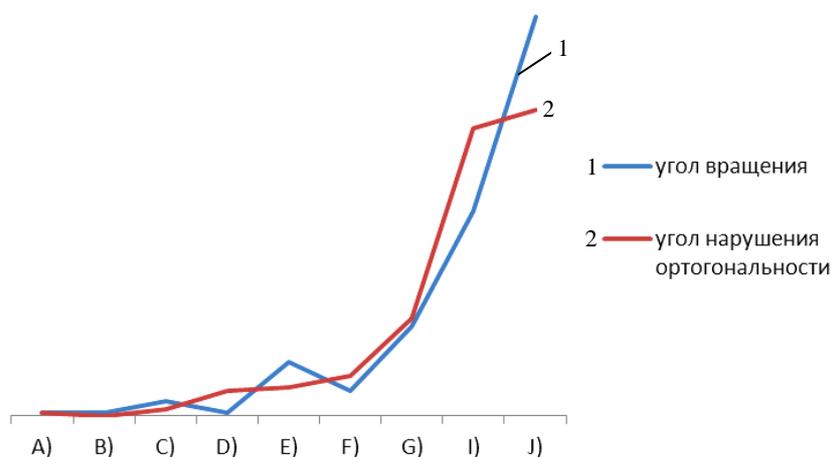


Рисунок 2. – Влияние геометрии расположения общих точек на элементы трансформации: угол вращения (φ); угол нарушения ортогональности (ϵ)

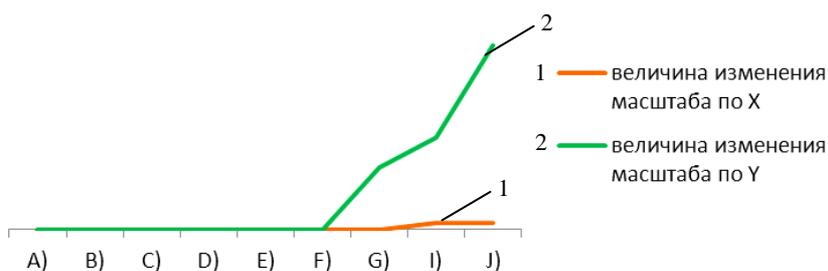


Рисунок 3. – Влияние геометрии расположения общих точек на элементы трансформации: величину изменения масштаба по оси X (m_x); величину изменение масштаба по оси Y (m_y)

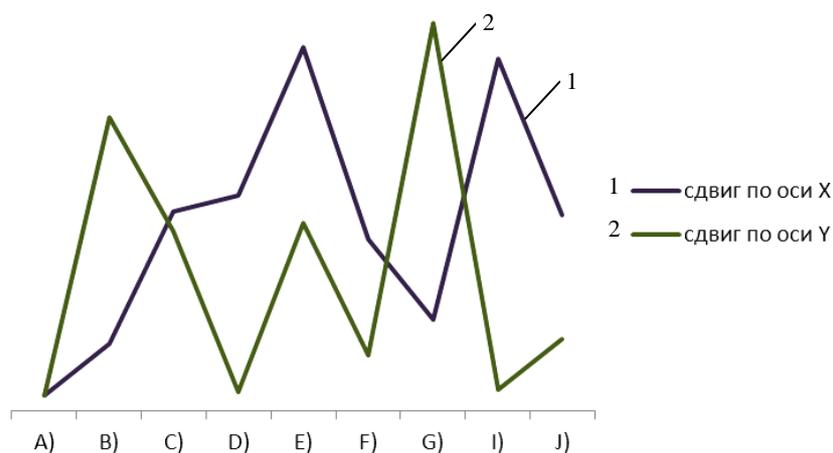


Рисунок 4. – Влияние геометрии расположения общих точек на элементы трансформации: сдвиг по оси X (t_x); сдвиг по оси Y (t_y)

Очевидно, что самая плохая геометрия опорных точек для трансформации при расположении их в одну линию (или когда они почти на одной линии), так как тогда мы имеем обычную линейную зависи-

мость и получаем математически вырожденную (или очень плохо-обусловленную) систему уравнений для нахождения коэффициентов преобразования. Данный вопрос требует дальнейших исследований, так как существуют ситуации, когда необходимо трансформировать координаты линейных объектов (мосты, дороги и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярев, А.М. Идентификация модели трансформации в геодезии на основе аффинного преобразования / А.М. Дегтярев, В.В. Ялтыхов // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 2 (49). – С. 71–74.
2. Deakin, R.E. Coordinate transformation in surveying and mapping / R.E. Deakin // Geospatial science [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.mygeodesy.id.au/documents/COTRAN_1. – Date of access: 20.02.2016.
3. Ghilani, Charles D. Adjustment computations: spatial data analysis / Charles D. Ghilani, Paul R.Wolf. – Hoboken: JOHN WILEY & SONS, INC., 2006. – 632 с.
4. Zellner, A. An Efficient Method of Estimating Seemingly Unrelated Regressions and Tests for Aggregation Bias / A. Zellner // Journal of the American Statistical Association. – 1962. – Vol. 57, No. 298. – Jun. – С. 348–368.
5. Себер, Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер, В.П. Носко ; под ред. М.Б. Малютова. – М. : Мир, 1980. – 456 с.

Поступила 04.04.2016

INFLUENCE OF THE GEOMETRY LOCATION OF THE COMMON POINTS ON THE RESULTS OF TRANSFORMATION

A. IVASHNIOVA

Two-dimensional transformation is a transformation of a rectangular coordinate system to another. These linear transformations in the plane are the simplest in form and content, however, often are sufficient for solution of the overwhelming number of tasks on the transformation occurring in geodesy. However, despite the breadth of use and apparent clarity of the process of two-dimensional transformation, there are a number of important questions which require further research today. One of such question is the influence of geometry of the common points on the results of the transformation. The article presents the results of numerical experiments, in which the elements of the transformation were obtained for several variants of location of common points. By the received results has been analyzed the behavior of deformation elements of two-dimensional transformation in process of approach to worst geometry.

Keywords: *two-dimensional transformation geometry at common points, linear transformations, deformation elements.*

УДК 622.361-027.31:661.152.3

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ГЛИНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Е.В. ЛАЕВСКАЯ; д-р хим. наук Е.В. ВОРОБЬЁВА;
канд. хим. наук Д.В. ЧЕРЕДНИЧЕНКО; канд. хим. наук П.Д. ВОРОБЬЁВ
(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск);
канд. техн. наук, доц. А.А. КОЛОГРИВКО
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлены результаты исследований физико-механических свойств новых материалов, полученных из глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий», свидетельствующие об упрочнении структуры материала в процессе хранения и сушки в связи с образованием полимерных и кристаллизационных контактов между глинистыми частицами. Даны новые представления об изменении физико-механических свойств отходов обогащения калийного производства, имеющих существенное практическое значение для прогнозирования развития хвостового хозяйства калийных предприятий и, как следствие, снижение техногенной нагрузки в горнопромышленном районе.

Ключевые слова: глиносодержащие отходы, продукт глинистый минерализованный, глинисто-солевые шламы, физико-механические свойства пород.

Введение. Глиносодержащие отходы калийного производства – глинисто-солевые шламы (ГСШ) – образуются в процессе обогащения сильвинитовой руды в виде суспензии глины в солевом растворе и складированы в шламохранилищах [1]. Традиционный подход к проблеме складирования и изоляции ГСШ состоит в том, чтобы задержать твердые отходы и рассол на поверхности земли внутри системы ограждающих дамб с минимизацией изъятия земельных ресурсов и хранить отходы калийного производства в пределах специально подготовленной для этого территории [2].

Шламохранилища при воздействии на них атмосферных осадков, ветровой и водной эрозии служат источниками образования и прогрессирующего накопления избыточных, не используемых в технологии, концентрированных солевых рассолов, что не исключает возможности химического загрязнения подземных вод с тенденцией расширения ареалов их засоления по площади, в подстилающие грунты и водоносные горизонты. Прогрессирующее воздействие техногенеза на геологическую среду способствует выводу из оборота значительных площадей сельскохозяйственных земель [2; 3]. Здесь важно заметить, что фильтрация рассолов из шламохранилищ калийного производства, в том числе ложе которых не обустроено противоточным экраном, носит затухающий характер. Это связано с формированием уплотненного слоя ГСШ, обладающих меньшими фильтрационными свойствами, чем основания шламохранилищ, вследствие дифференциации твердой и жидкой фаз на стадии их осаждения и последующего уплотнения осадка и происходящих физико-химических процессов, сопровождающихся кристаллизацией галита из насыщенного рассола на поверхности глинистых частиц, служащих центрами кристаллизации в результате его перенасыщенности [4; 5].

По нашему мнению, дальнейшие исследования по обеспечению геоэкологической безопасности эксплуатации шламохранилищ в части предотвращения фильтрации рассолов и диффузионного проникновения солей в подстилающие грунты и грунтовые воды и недопущения тем самым засоления геологической среды в районах размещения шламохранилищ должны исходить из учета появления новых условий в связи с подработкой шламохранилищ. Так, для ускорения формирования рассолонепроницаемого глинисто-солевого слоя необходимо устройство противоточного экрана из полиэтиленовой пленки в основании строящегося шламохранилища с подачей на первом этапе глинисто-солевой смеси, жидкая фаза которой имеет минерализацию не менее 250 г/л. При таком составе в основании осажженной толщи шламов будет сформирован защитный экран, который в процессе эксплуатации пленки будет служить барьером на пути фильтрации рассолов и диффузии [6].

Снижение геоэкологической нагрузки в районе работ калийных предприятий в процессе обогащения калийных руд достигается за счет разработки новых способов и технологий складирования отходов обогащения при организации хвостовых хозяйств, позволяющих сократить рост площадей, используемых для размещения этих отходов. Так, снизить техногенную нагрузку можно за счет использования отработанных шламохранилищ в качестве оснований при расширении солеотвалов и, как следствие, уменьшения изъятия дополнительных площадей [7].

Другим направлением решения проблемы накопления отходов калийного производства является их переработка и утилизация. С позиций ресурсосбережения и рационального природопользования вопросы переработки и использования отходов калийного производства требуют не менее серьезного под-

хода, чем основного продукта производства (калийных удобрений). Необходима разработка новых технологий, дополняющих основное производство калийных удобрений и позволяющих переработать отходы в целевые продукты.

Правильное представление об изменении физико-механических свойств отходов обогащения калийного производства имеет существенное практическое значение для прогнозирования развития хвостового хозяйства калийных предприятий и, как следствие, снижения техногенеза в районе ведения работ по складированию отходов.

Авторами [8] разработан способ переработки глиносодержащих отходов калийного производства, основанный на разделении шламов на жидкую (солевою) и твердую (глинистую) фазы. Фазовое разделение проводят путем флокуляции шламов полимером с последующим механическим «отжимом» сфлокулированной шламовой суспензии и отделением солевого раствора. Полученный после отделения солевого раствора продукт, зарегистрированный как продукт глинистый минерализованный (ПГМ), ТУ ВУ 600122610.003-2015, содержит 75...80 масс. % глинистых минералов и 20...25 масс. % водорастворимых солей (хлоридов калия и натрия). Влажность ПГМ составляет 28...30%.

Токсиколого-гигиеническими исследованиями установлено, что применение новых продуктов ПГМ, полученных после переработки глиносодержащих отходов калийного производства, не представляет экологической опасности. Так, ПГМ относится к IV классу опасности (малоопасные вещества), содержание мышьяка, ртути, кадмия не обнаружено, свинца и природных радионуклидов незначительно и соответствует уровню природных источников (почв).

В ПГМ содержится полимер (0,1...0,2 масс. %), введенный на стадии флокуляции глинистой дисперсии. При флокуляции частицы глины контактируют через адсорбированные макромолекулы полимера и агрегируют в крупные флокулы. При последующем отжиме флокулированной глинистой дисперсии и удалении из нее жидкой фазы контакты между глинистыми частицами сохраняются и упрочняются. Благодаря присутствию полимера структура и свойства нового ПГМ, полученного после флокуляции ГСШ и отделения жидкой солевой фазы, существенно отличаются от физико-механических свойств исходного ГСШ, который не удается перевести в гранулированную форму. Легко гранулирующийся ПГМ позволяет перевести этот продукт в форму, удобную для хранения, транспортирования и использования.

Благодаря высокому содержанию глины ПГМ может быть использован как глиносодержащий материал для устройства оснований противофильтрационных экранов шламохранилищ калийного производства, противофильтрационных экранов на полигонах захоронения твердых коммунальных отходов, противопожарных барьеров лесным пожарам, насыпей и слоев оснований в конструкциях лесных автомобильных дорог, рекультивации карьеров путем заполнения части выработанного пространства глинистым материалом.

При оценке направлений использования новых материалов необходимо объективно оценить их физико-механические свойства и геоэкологическую безопасность. В связи с этим целью представленной работы являлось исследование физико-механических свойств новых материалов, полученных из глиносодержащих отходов калийного производства (глинисто-солевых шламов) ОАО «Беларуськалий».

Основная часть. Исследованы образцы ПГМ, полученные в лабораторных условиях из глиносодержащих отходов калийного производства следующим способом. Суспензию ГСШ массой 120...150 г обрабатывали раствором полиакриламидного флокулянта с концентрацией 0,5%, перемешивали на мешалке при 350 об/мин в течение определенного времени и отделяли жидкую фазу на лабораторном фильтрующем оборудовании (ленточном фильтр-прессе). Для определения влажности и структурно-механических свойств использовали параллельно по 7 образцов ПГМ, полученных после флокуляции и отделения солевого раствора. В работе использовали также образцы исходного ГСШ без флокуляции с фильтрацией на ситах.

В промышленных условиях ОАО «Беларуськалий» продукт ПГМ получают аналогичным способом. Так, ГСШ обрабатывают раствором полиакриламидного флокулянта и отделяют жидкую солевую фазу на промышленном ленточном фильтре-прессе.

Влажность образца определяли высушиванием образцов при температуре 105...107 °С до постоянной массы. Учитывая, что каждой плотности рассола, находящегося в порках различных солесодержащих грунтов и шламов, соответствует определенная минерализация, для расчета влажности использовали следующую формулу:

$$W = \frac{(1 + K) \cdot m_b}{m_{гп} - K \cdot m_b} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где K – коэффициент, соответствующий определенной плотности и минерализации рассола в естественных условиях (для отходов калийного производства $K = 0,414$); $m_{гп}$ – масса скелета грунта, г; m_b – масса испарившейся воды, г.

Для изучения изменения влажности ПГМ на открытом воздухе использован образец весом 7,2 кг с влажностью 29,7%, который хранился в помещении со средней влажностью воздуха $W_{cp} \approx 30\%$ и температурой $t_{cp} \approx 22^\circ\text{C}$.

Механические свойства как естественных грунтов (пород), так и техногенных образований (шламов) характеризуют их способность воспринимать нагрузки. Различают показатели деформационных свойств (модуль деформации, коэффициент сжимаемости, коэффициент бокового давления) и прочностных свойств (угол внутреннего трения, сцепление), по которым определяют несущую способность естественного или техногенного грунта.

Для определения характеристик прочности и деформируемости грунтов использовали специальные лабораторные методы. Деформационные свойства ПГМ определяли в компрессионном приборе (одометре) с использованием стальных колец, не допускающих бокового расширения грунта. Нагружение испытываемых образцов проводили равномерно, без ударов ступенями нагрузки.

По результатам испытаний определяли такие характеристики:

- величину абсолютной деформации образца Δh_i (мм) с точностью до 0,01 (среднее арифметическое значение показаний индикаторов n_i и n_0 за вычетом поправки на деформацию компрессионного прибора m);
- величину относительной деформации образца ε с точностью 0,001 при соответствующих значениях давления P_i из выражения

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_i}{h} = \frac{(n_i - n_0) - m}{h}. \quad (2)$$

Коэффициент пористости e по усредненным значениям относительных деформаций ε' при любом значении P_i вычисляли по формуле

$$e_i = e_0 - \varepsilon' (1 + e_0), \quad (3)$$

где e_0 – начальный коэффициент пористости грунта.

Коэффициенты уплотнения a в интервале давлений P_i и P_{i+1} рассчитывали следующим образом:

$$a = \frac{e_i - e_{i+1}}{P_{i+1} - P_i}, \quad (4)$$

где e_i и e_{i+1} – коэффициенты пористости, соответствующие давлениям P_i и P_{i+1} .

Модуль деформации образца E (МПа) в интервале давлений $P_i \dots P_{i+1}$ определяли по формулам (5) и (6):

$$E = \frac{P_{i+1} - P_i}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} \cdot \beta; \quad (5)$$

$$E = \frac{1 + e_i}{a} \cdot \beta, \quad (6)$$

где ε_i и ε_{i+1} – величины относительного сжатия, соответствующие давлениям P_i и P_{i+1} ; a – коэффициент уплотнения, соответствующий интервалу давлений от P_i до P_{i+1} ; β – поправка, учитывающая отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе.

Определение прочностных свойств полученных образцов ПГМ проводили методом одноплоскостного среза в срезном приборе с фиксированной плоскостью среза путем сдвига одной части образца относительно другой его части касательной нагрузкой при одновременном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза. Соппротивление грунта срезу определялось как предельное среднее касательное напряжение, при котором образец грунта срезался по фиксированной плоскости при заданном нормальном напряжении.

Характеристики сопротивления срезу τ , угла внутреннего трения φ и сцепления C определяли по результатам трех испытаний при различных значениях нормального напряжения. По измеренным значениям касательной и нормальной нагрузок по формулам (7) и (8) вычисляли касательные и нормальные напряжения τ и σ (МПа):

$$\tau = \frac{Q}{S}; \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (8)$$

где Q и F – соответственно касательная и нормальная силы к плоскости среза, кН; S – площадь среза, см^2 .

Угол внутреннего трения φ и сцепление C определяли как параметры линейной зависимости:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (9)$$

Угол внутреннего трения φ и сцепление C рассчитывали по формулам (10) и (11).

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{n \sum \tau_i \sigma_i - \sum \tau_i \sum \sigma_i}{n \sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}, \quad (10)$$

$$C = \frac{\sum \tau_i \sum \sigma_i^2 - \sum \sigma_i \sum \tau_i \sigma_i}{n \sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}, \quad (11)$$

где τ_i – опытные сопротивления срезу, найденные при различных значениях σ_i ; n – число определений.

Для изучения сжимаемости материала ПГМ использовали центрифугу. Исследуемый образец подвергали действию центробежных сил, интенсивность которых регулировали скоростью вращения центрифуги. Распределение нагрузки и напряжения в модельном образце идентично действию гравитационных сил. Сравнительный анализ способности материала к уплотнению и поведения материала в поле действия центробежных сил позволяет смоделировать процессы уплотнения тех же материалов в статических условиях под действием нагрузки с постепенным её увеличением и времени уплотнения.

Образцы одинаковой массы загружали в цилиндрические формы и подвергали сжатию в центрифуге. Время сжатия при максимальной нагрузке выбирали как соответствующее максимальной деформации образца. При более продолжительном воздействии сжимаемость образца практически не увеличивалась. Для каждого из образцов проводилось не менее 5-ти параллельных опытов. Результаты опытов усреднялись.

Ниже приведены результаты исследования ПГМ, которые характеризуют физико-механические свойства и структурные особенности нового материала.

В связи с тем, что в состав ПГМ входит 20...25 масс. % водорастворимых солей (хлоридов калия и натрия), при определении влажности учитывали коэффициент минерализации исследуемого материала, используемый для характеристики солесодержащих грунтов.

При высушивании ПГМ из раствора солей, находящихся в материале, выпаривается вода, а соль кристаллизуется в порах, что приводит к изменению плотности и пористости образца и его весовой влажности, от которых зависит достоверное определение прочностных показателей. В таблице 1 приведены показатели влажности, сцепления и угла внутреннего трения образцов ПГМ.

Таблица 1 – Показатели влажности, сцепления и угла внутреннего трения образцов ПГМ

Показатель	Номер образца							Среднее значение показателя
	1	2	3	4	5	6	7	
Влажность W , %	28,8	30,1	30,4	29,0	29,5	30,4	30,0	29,7
Сцепление C , кПа	7	6	7	8	7	7	9	7,3
Угол внутреннего трения φ , град	19	23	25	20	22	21	24	22

Результаты исследования изменения влажности ПГМ при хранении в помещении со средней влажностью воздуха 30% и температурой 22 °С за 70 дней показали, что в течение первых 35-ти суток влажность ПГМ снизилась более чем в два раза и стабилизировалась на уровне 10...12% через 40 суток (рис. 1).

При хранении образцов ПГМ и снижении их влажности до 10...15 % пористость ПГМ снизилась, а плотность увеличилась на 10% (табл. 2).

Таблица 2 – Зависимость физико-механических свойств образцов ПГМ от влажности

Влажность, W , %	Плотность ПГМ, ρ , г/см ³	Коэффициент пористости	Сопротивление вращательному срезу, τ , кПа	Сцепление, C , кПа	Угол внутреннего трения, φ , град	Модуль деформации, E , МПа
25...30	1,72	1,33	1,6	7,3	22	8,3
20...25	1,78	1,25	2,8	7,9	23,8	8,5
15...20	1,82	1,15	3,2	8,4	25,2	9,0
10...15	1,89	1,1	4,0	9,6	28,6	9,3

При хранении ПГМ на открытом воздухе в течение 40 суток и снижении влажности в 2...3 раза наблюдается изменение показателей, характеризующих структурные изменения материала. В частности, повышение сопротивления вращательному срезу в 2,5 раза; увеличение угла внутреннего трения в 1,3 раза и модуля деформации на 12...14 %, что свидетельствует об упрочнении структуры ПГМ и усилении взаимодействия между частицами.

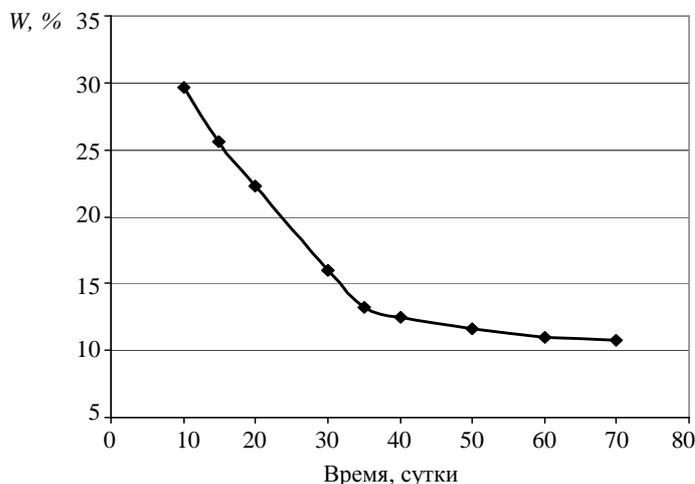


Рисунок 1. – Изменение влажности ПГМ при хранении в помещении

Частицы глины могут выступать в роли связки между кристаллическими сростками хлористого калия, что видно на фотоснимках (рис. 2, а, б). В свою очередь, соль, которая кристаллизуется в местах контактов глины, скрепляет частицы. Глина и соль в смеси, взаимно действуя как «шипы», упрочняют структуру, и усилие сдвига, необходимое для разрушения структуры, увеличивается. Макромолекулы полимера, введенного в глинисто-солевой шлам для флокуляции, связывают глинистые частицы, что улучшает прочностные свойства материала при хранении.



а



б

а – увеличение в 50 раз; б – увеличение в 20 раз

Рисунок 2. – Продукт глинистый минерализованный

Физико-механические свойства ПГМ, полученного после переработки ГСШ, а именно после флокуляции и отделения солевого раствора, существенно отличаются от свойств исходных ГСШ при одинаковой влажности.

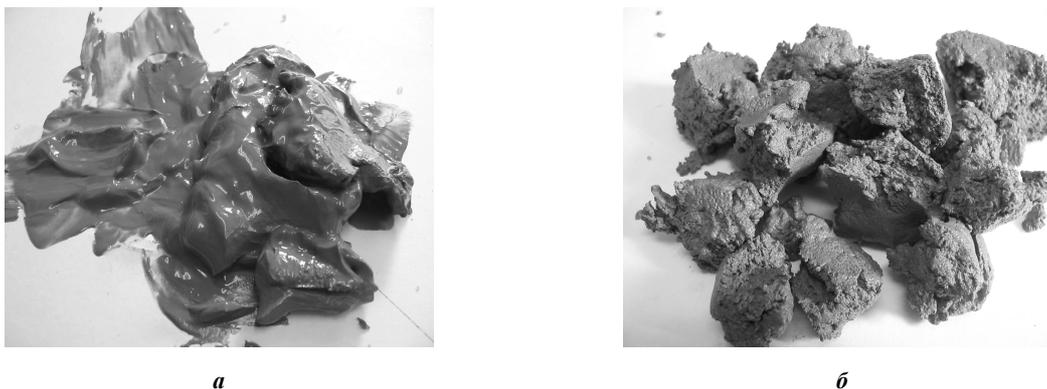
Как следует из данных, представленных в таблице 3, при одинаковой влажности (29,7%) модуль деформации ПГМ выше в 1,4 раза, сцепление в 1,9 раза по сравнению с ГСШ без переработки. Это обусловлено, главным образом, действием введенного в систему на стадии флокуляции до отжима на фильтре-прессе полимера, несмотря на малые его добавки (менее 0,2 масс. %).

Влияние полиакриламидного флокулянта на состояние глинисто-солевой дисперсии заключается в том, что макромолекулы высокомолекулярного соединения контактируют одновременно с разными гли-

нистыми частицами. При отделении солевого раствора в процессе механического отжима на оборудовании из флокулированной дисперсии шламов удаляется влага, и концентрация полимера в точках контакта частиц повышается. Глина после флокуляции и отделения жидкой фазы приобретает специфическую структуру, в которой частицы связаны в агрегаты мостиками из полимера, что видно из сравнения фотографий образцов ГСШ без обработки полимером и с флокуляцией ПГМ (рис. 3).

Таблица 3 – Физико-механические свойства образцов ПГМ и ГСШ (без флокуляции)

Показатель	ПГМ	ГСШ
Модуль деформации, Е, МПа	8,3	6,0
Сцепление, С, кПа	7,3	3,9
Угол внутреннего трения, ϕ , град	22	23,4

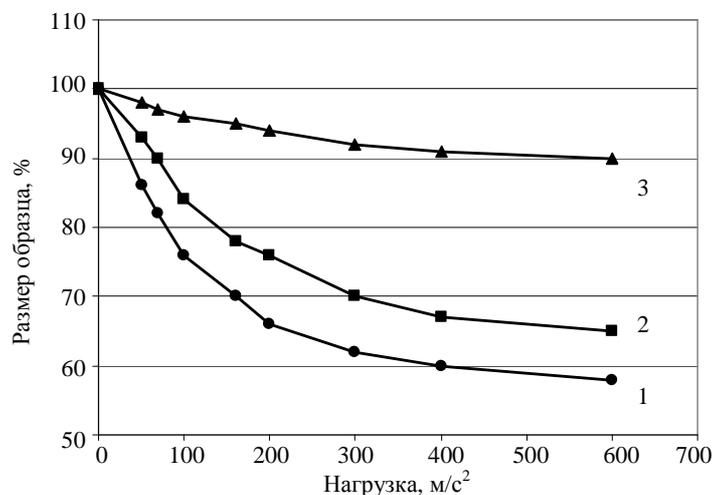


a – глинисто-солевые шламы; *б* – продукт глинистый минерализованный

Рисунок 3. – Образцы с влажностью 30%

При хранении материала и уменьшении влажности полимерные мостики между частицами упрочняются. Содержащиеся в материале растворенные соли, кристаллизуясь, скрепляют частицы, что также способствует увеличению прочности материала.

На рисунке 4 представлены данные, характеризующие изменение размера (высота, % от показателя без нагрузки) ПГМ в зависимости от приложенной внешней нагрузки (центростремительное ускорение центрифуги, m/s^2), то есть сжимаемость образцов. Приведены результаты для ПГМ (влажность 29,7%) и тех же образцов, предварительно уплотненных и высушенных, а затем повторно увлажненных до 29,7%. Уплотнение образцов проводили, постепенно увеличивая нагрузку до давления, приблизительно соответствующего высоте отвала 30 м. Сушка уплотненных образцов проводилась при 20 ± 2 и 100 ± 2 °С.



1 – ПГМ; 2, 3 – образцы, высушенные при 20 и 100 °С соответственно

Рисунок 4 – Изменение размера образцов в зависимости от приложенной внешней нагрузки

Из рисунка 4 следует, что максимальной сжимаемостью обладает образец ПГМ, полученный без сушки и повторного увлажнения. Значительное сжатие образца наблюдается уже при небольших нагрузках и постепенно увеличивается при росте сжимающего усилия. Такое поведение породы связано с высокой пластичностью глинистых комков, которые легко деформируются под воздействием нагрузки.

Сжимаемость образцов ПГМ, высушенных при низкой температуре и затем увлажненных, снизилась по сравнению с образцами без хранения на 8...12%, что обусловлено увеличением прочности контактов между частицами в период хранения вследствие сближения глинистых частиц, кристаллизации солей в местах контактов частиц.

Образцы, высушенные при высокой температуре и затем увлажненные, практически не сжимаются при увеличении нагрузки. В структуре полностью высушенного материала отсутствуют гидратные оболочки вокруг глинистых частиц, обычно воспринимающие часть нагрузки и деформирующиеся при сжатии. Повторное увлажнение не приводит к восстановлению первоначальной структуры глинистого материала, и внешняя нагрузка воспринимается «скелетом» структуры практически без сжатия вплоть до ее разрушения (влажность исследуемых образцов 29,7%). Дальнейшее увеличение влажности, как показали эксперименты, приводит к ослаблению структуры, деформации образца под нагрузкой и увеличению сжимаемости на 10...15%. По-видимому, под воздействием влаги происходит частичное растворение солевых мостиков между частицами глины.

В реальных условиях при использовании ПГМ как глиносодержащего материала для устройства противодиффузионных экранов, противопожарных барьеров лесным пожарам, насыпей и слоев оснований в конструкциях лесных автомобильных дорог, рекультивации карьеров с большей вероятностью реализуется модель сушки при хранении с уплотнением при 20 °С (образец на рисунке 3, б).

Развивающиеся во времени процессы пластической деформации, физико-химические процессы, протекающие в материале в поровом растворе (кристаллизация солей при увеличении плотности и изменении температурных условий, частичный переход свободной и рыхлосвязанной воды в химически связанную), будут способствовать формированию дифференцированных зон в массе материала с различными физико-механическими свойствами.

Вышесказанное указывает на необходимость проведения опытных и опытно-промышленных испытаний нового материала на практике в конкретных условиях с постоянным геомеханическим мониторингом за состоянием объекта испытаний.

Заключение. В Институте общей и неорганической химии НАН Беларуси разработан технологический способ переработки глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий», который позволяет отделить жидкую солевую фазу и получить материал с высоким содержанием глины (75...80 масс. %), водорастворимых солей хлоридов калия и натрия (20...25 масс. %) и малых добавок полимера (0,1...0,2 масс. %).

Установлено, что при хранении материала на открытом воздухе в течение 40 суток и снижении его влажности в 2...3 раза увеличиваются значения сопротивления вращательному срезу в 2,5 раза, угла внутреннего трения – в 1,3 раза, модуля деформации – на 12...14%.

Сжимаемость образцов после хранения под нагрузкой уменьшается на 8...12%. При одинаковой влажности (29,7%) модуль деформации продукта переработки отходов выше в 1,4 раза, сцепление – в 1,9 раза по сравнению с ГСШ без переработки.

Полученные результаты свидетельствуют об упрочнении структуры материала в процессе хранения и сушки, что обусловлено образованием полимерных и кристаллизационных контактов между глинистыми частицами.

Установленные физико-механические свойства новых материалов, полученных из глиносодержащих отходов калийного производства, дают перспективные возможности решения задач повторного использования в качестве противодиффузионного материала шламовых грунтов восстанавливаемых шламохранилищ, что способствует снижению техногенной нагрузки в районе размещения отходов калийного производства, во-первых, за счет использования шламовых грунтов восстанавливаемых шламохранилищ, во-вторых, за счет повторного заполнения шламохранилищ глинисто-солевыми шламами в результате их восстановления при выемке шламовых грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатов, Б.А. Геоэкология калийного производства / Б.А. Богатов, А.Д. Смычник, С.Ф. Шемет. – Минск : ЗАО «ЮНИПАК», 2005. – 200 с.
2. Лысухо, Н.А. Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду : моногр. / Н.А. Лысухо, Д.М. Ерошина. – Минск : МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011. – 210 с.

3. Смычник, А.Д. Технологии складирования отходов калийного производства / А.Д. Смычник, С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко // Сб. науч. ст. X Юбилейной нац. конф. с междунар. участием по открытой и подводной добыче полезных ископаемых. – Варна, 2009. – С. 494–496.
4. Колпашников, Г.А. Техногенез и геологическая среда / Г.А. Колпашников. – Минск : БНТУ, 2006. – 182 с.
5. Кологривко, А.А. Прогнозирование и предотвращение фильтрации рассолов в период подработки шламохранилищ / А.А. Кологривко // Промышленная экология : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 окт. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; ред.: И.А. Басалай. – Минск, 2015. – С. 118–121.
6. Кологривко, А.А. Геоэкологическая безопасность использования противофильтрационного экрана северной карты шламохранилища 4РУ ОАО «Беларуськалий» / А.А. Кологривко // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых и инженерных подходов : сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 3 мар. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.Ю. Солодовников [и др.]. – Минск, 2015. – С. 36–42.
7. Кологривко, А.А. Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений / А.А. Кологривко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 16. – С. 101–110.
8. Способ переработки глинисто-солевых шламов, образующихся при производстве калийных удобрений : пат. 012304 Евразия, МПК С 05D 1/00, В 01D 21/01 / Е.В. Воробьева, Н.П. Крутько, Д.В. Чередниченко, П.Д. Воробьев, В.М. Кириенко, А.Д. Любущенко, А.В. Пастухов, Н.В. Гончар, М.М. Варавя, Ф.И. Лобанов, Д.Н. Воробьев ; заявитель ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси», РУП «Производственное объединение «Беларуськалий». – № 200701953 ; заявл. 07.06.07 ; опубл. 28.08.09 // Офиц. бюл. / Евразийское патентное ведомство. – 2009. – № 4.

Поступила 26.04.2016

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF NEW MATERIALS RECEIVED FROM CLAY-CONTAINING WASTE POTASH PRODUCTION

**E. LAYEUSKAYA, E. VOROBIEVA,
D. CHEREDNICHENKO, P. VOROBIEV, A. KOLOGRIVKO**

The paper presents results of studies of physical and mechanical properties of new materials obtained from clay-salt slurries of “Belaruskali”. Results indicate a hardening of material structure during storage and drying due to formation of polymeric crystallization contacts between clay particles. New concepts about changing of physical and mechanical properties of the potash production wastes are presented; this has significant practical significance for prediction of the development of potash wastes handling and, as a result, for the decrease of anthropogenic impact in the mining area.

Keywords: *clay-containing waste product clay mineralized, clay-salt sludge, physico-mechanical properties of rocks.*

УДК 528.21

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, ВЫЗВАННАЯ КОЛЕБАНИЯМИ УРОВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВСЛЕДСТВИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА ПОЛОЦКОЙ ГЭС

К.И. МАРКОВИЧ

(Полоцкий государственный университет)

Анализируется влияние вариаций гравитационного поля, вызванных колебаниями уровнями поверхностей вследствие заполнения водохранилища Полоцкой ГЭС. Вычислены поправки в отметки реперов, находящихся в экстремальных по изменению потенциала при заполнении водохранилища местах.

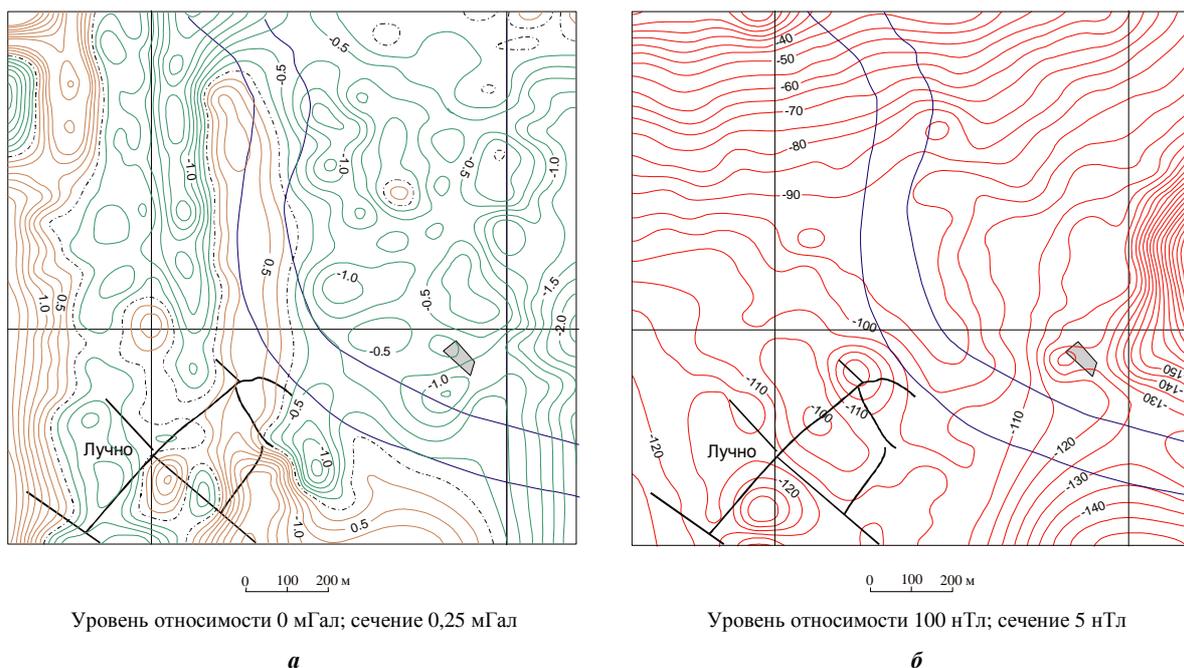
Ключевые слова: *уровневые поверхности, потенциал ускорения силы тяжести, репера, поправки.*

Согласно концепции энергетической безопасности Республики Беларусь до 2020 года на реке Западная Двина предусматривается создание каскада из четырех гидроэлектростанций: Полоцкой, Витебской, Бешенковичской и Верхнедвинской. Их суммарная установленная мощность составит 125...130 МВт. Первым этапом является строительство Полоцкой ГЭС [1].

Проектом предусматривается сооружение у деревни Лучно гидроузла руслового типа с расположением сооружений водонапорного фронта в естественном русле реки, здания ГЭС с закрытым машинным залом и железобетонной водосливной плотины с плоскими секционными затворами для сброса паводковых вод. Кроме того, проектировщиками заложена возможность создания судоходного шлюза для обеспечения речного судоходства. Введение гидроэлектростанции в строй планируется в 2016 году.

Перед началом строительства были выполнены наблюдения, позволяющие охарактеризовать обстановку на площадке Полоцкой ГЭС. Для этих целей в 2006 году в зоне проектирования Полоцкой ГЭС сотрудниками Института геохимии и геофизики НАН Беларуси и Полоцкого государственного университета были проведены геофизические и геодезические работы по установлению современной геодинамической обстановки.

С точки зрения разломной тектоники площадь проектируемой в районе д. Лучно Полоцкой ГЭС на севере и востоке приурочена к крупным региональным активным разломам мантийного заложения – Полоцкому (в 15 км) и Чашникскому (в 5...6 км). Гравиметрические и магнитометрические измерения проведены на площадке размером 1,5×1,6 км. На их основе построены две карты: карта аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2,0 г/см³; карта аномалий магнитного поля (рис. 1) [2].



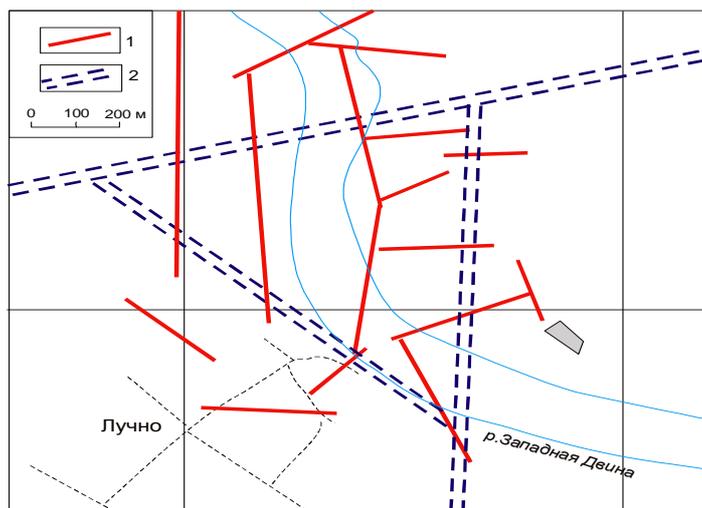
**Рисунок 1 – Карта аномалий поля силы тяжести площадки Полоцкой ГЭС (а);
карта аномалий магнитного поля площадки (б)**

В результате выполненных работ установлено, что поле силы тяжести довольно сильно изрезано.

Одновременно выявлен ряд других закономерностей: в западной половине площади поле линейно вытянуто в меридиональном направлении; в восточной части распространены локальные аномалии разной ориентировки.

Судя по тому, что все локальные аномалии имеют высокий градиент, их вызывающие плотностные неоднородности залегают на небольших глубинах – буквально в приповерхностном слое, на глубине 100...200 м, то есть связаны с осадочным чехлом.

Таким образом, район размещения проектируемой Полоцкой ГЭС полностью расположен в зоне воздействия наблюдаемой системы разломов (рис. 2) [2].



1 – локальные разломы в осадочном чехле;
2 – фрагменты относительно региональных разломов в кристаллическом фундаменте

Рисунок 2. – Схема разломов на площадке проектируемой Полоцкой ГЭС

В связи с тем, что на геодинамическом полигоне (ГДП) ГЭС всегда проектируют линии высокоточного нивелирования, имеющие цель изучить вопрос природоохранных землетрясений и позволяющие количественно охарактеризовать обстановку, выполнен анализ влияния вариаций гравитационного поля, вызванных колебаниями уровней поверхностей вследствие заполнения водохранилища Полоцкой ГЭС.

В качестве исследуемых было запроектировано два репера, находящихся в местах, экстремальных по изменению потенциала при заполнении водохранилища. Схема расположения запроектированных реперов представлена на рисунке 3.



⊗ – запроектированные репера; — — горизонталь затопления; — — плотина

Рисунок 3. – Схема расположения исследуемых реперов

Для определения границы затопления водохранилища использовались карты масштаба 1:50000. Отметка нормального подпорного уровня (НПУ) – 118 м [1].

На рисунке 4 представлена карта масштаба 1:50000 с проектной горизонталью затопления.

Для вычисления поправок δH за изменение гравитационного поля вследствие заполнения водохранилища была использована методика ЦНИИГАиК.

Поправка δH за изменение гравитационного поля вследствие заполнения водохранилища вычислялась по формуле (1) [3–5].

$$\delta H = \frac{\Delta V}{\gamma}, \quad (1)$$

где γ – нормальное значение силы тяжести в данной точке ($\gamma = \gamma_0 - 0,3086H$, γ_0 вычислялось по формуле Гельмерта).

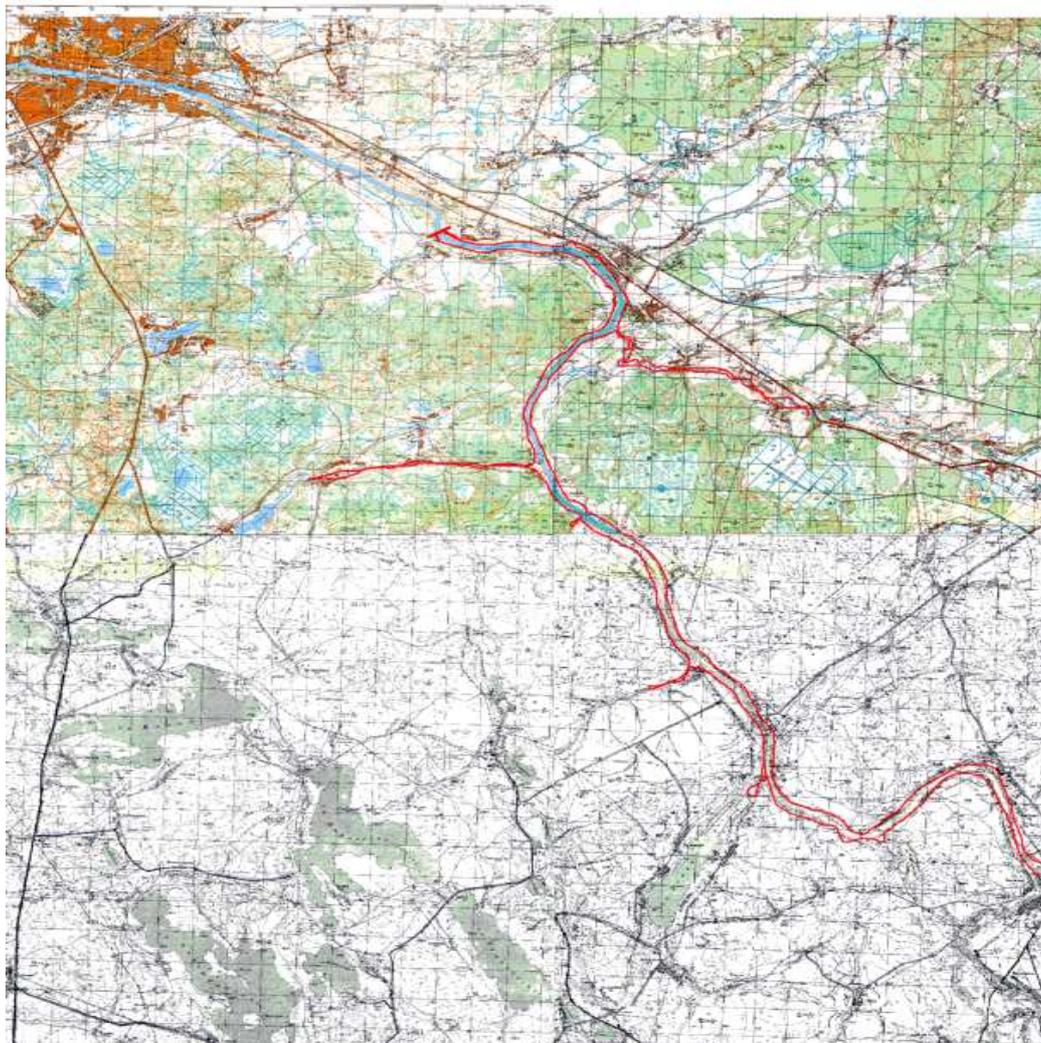


Рисунок 4. – Зона затопления водохранилищем Полоцкой ГЭС

Для вычисления изменений потенциала ΔV использовалась круговая палетка Еремеева. Изменение потенциала в каждой зоне вычислялось по формуле (2) [5]:

$$\Delta V_{ik} = f\rho \frac{S_{ik} \cdot h_{ik}}{r_{ik}}, \quad (2)$$

где ΔV_{ik} – изменение потенциала притяжения, вызванное элементарным объемом (столбом воды, высекаемым отсеком палетки ik); S_{ik} – площадь отсека ik палетки в масштабе карты; h_{ik} – средняя глубина водохранилища в отсеке ik палетки; r_{ik} – расстояние от репера до середины зоны палетки ($r_{ik} = (r + r_{i+i}) / 2$); f – гравитационная постоянная; ρ – плотность воды.

Общее изменение потенциала было получено путем суммирования всех ΔV_{ik} , вычисленных для каждого попавшего на площадь водохранилища отсека палетки, то есть

$$\Delta V = \sum_{i=F}^{IV} \sum_{K=1}^{16} \Delta V_{ik}. \quad (3)$$

Согласно формулам (2), (3) было подсчитано изменение потенциала в каждой зоне палетки, которое представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение потенциала в каждой зоне палетки для соответствующих реперов

№ зоны	Репер № 1	Репер № 2
	$\Delta V, \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$	$\Delta V, \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$
F	$1,11\cdot 10^{-4}$	$1,50\cdot 10^{-4}$
E	$1,01\cdot 10^{-4}$	$6,22\cdot 10^{-5}$
D	$8,25\cdot 10^{-5}$	$6,27\cdot 10^{-5}$
C	$7,08\cdot 10^{-5}$	$6,66\cdot 10^{-5}$
B	$7,99\cdot 10^{-5}$	$6,91\cdot 10^{-5}$
A	$7,65\cdot 10^{-5}$	$4,40\cdot 10^{-5}$
I	$3,20\cdot 10^{-4}$	$1,59\cdot 10^{-4}$
II	$7,35\cdot 10^{-5}$	$6,24\cdot 10^{-5}$
III	$8,52\cdot 10^{-5}$	$5,24\cdot 10^{-5}$
IV	$5,11\cdot 10^{-5}$	$2,98\cdot 10^{-5}$
Σ	$1,05\cdot 10^{-3}$	$7,58\cdot 10^{-4}$

Расчет поправок в отметки реперов, вызванных колебаниями уровенных поверхностей вследствие заполнения водохранилища, представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Поправки δH за изменение потенциала вследствие заполнения водохранилища

№ репера	$\Sigma\Delta V, \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$	$\gamma, \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$	$\delta H, \text{ мм}$
1	$1,05\cdot 10^{-3}$	9,79203295	0,11
2	$7,58\cdot 10^{-4}$	9,79204085	0,08

Согласно представленным расчетам отметим, что поправки, полученные для реперов, располагающихся в местах максимальных колебаний уровенных поверхностей вследствие заполнения водохранилища, малы, чтобы учитывать их при производстве высокоточного геометрического нивелирования. Малые величины поправок соответствуют низкому НПУ и, как следствие, малому затоплению при заполнении водохранилища. Таким образом, можно утверждать, что изменение потенциала вследствие заполнения водохранилища Полоцкой ГЭС, а также при колебаниях уровня воды не скажется на результатах высокоточного нивелирования, и нет необходимости в вычислении подобных поправок.

ЛИТЕРАТУРА

- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nest.by/news/2011-12-23/pod-polotskom-nachalos-stroitelstvo-ge>. – Дата доступа: 25.02.2016.
- Полоцко-Курземский пояс разломов / Р.Г. Гарецкий [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2002. – Т. 46, № 6. – С. 85–89.
- Огородова, Л.В. Гравиметрия / Л.В. Огородова, Б.П. Шимбарев, А.П. Юзефович. – М. : Недра, 1978. – 321 с.
- Балавадзе, Б.К. Повторные гравиметрические измерения в районе водохранилища Ингури ГЭС / Б.К. Балавадзе, В.Г. Абашидзе // Сб. науч. тр. по исследованию неприливных изменений силы тяжести и сопутствующих разработок в области аппаратуры методики работ. – С. 66–71.
- Шароглазова, Г.А. Гравиметрия : учеб.-метод. компл. / Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2006. – 195 с.

Поступила 02.03.2016

AN ASSESSMENT OF CHANGE OF GRAVITY ACCELERATION, THE CAUSED OF FLUCTUATIONS OF LEVEL SURFACES AS A RESULT OF FILLING OF POLOTSK HYDROELECTRIC POWER STATION RESERVOIR

K. MARKOVICH

The article is devoted to the analysis of influence of gravitational field variations, as a result of filling of Polotsk hydroelectric power station reservoir. In the article were calculated the corrections in reference points, situated in places, which are extreme on change of potential at filling of reservoir.

Keywords: level surface, potential of gravity acceleration, reference point, amendment.

УДК 504.064.45

**ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ОТРАБОТАВШИХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ
ТЕХНИЧЕСКИХ МОЮЩИХ СРЕДСТВ****д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; В.А. ДРОНЧЕНКО**
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается использование отработавших водных растворов технических моющих средств при производстве эмульсии на основе нефтесодержащих отходов. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния отработавших водных растворов технических моющих средств на стабильность эмульсии на основе нефтесодержащих отходов, приготовленной с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем. Определено оптимальное содержание эмульгатора в эмульсии, позволяющее получить эмульсию со стабильностью, достаточной для ее промышленного использования в качестве противoadгезионного покрытия форм при производстве железобетонных изделий. Приведены рекомендации по совершенствованию технологии, позволяющие защитить окружающую среду от вредного воздействия нефтесодержащих отходов и отработавших водных растворов технических моющих средств.

Ключевые слова: отработавшие водные растворы технических моющих средств, стабильность эмульсии, эмульсии, геоэкология.

Введение. По данным государственного водного кадастра в Республике Беларусь в 2015 году образовалось 755,74 млн. м³ сточных вод, содержащих загрязняющиеся вещества, в том числе в Витебской области – 87,56 млн. м³. При этом в окружающую среду вместе со сточными водами попалили загрязняющие вещества, в том числе нефть и нефтепродукты – 110 тонн, синтетические поверхностно-активные вещества (анионо-активные) – 107,29 тонны (в Витебской области 10 и 15,73 тонны соответственно).

Отработавшие водные растворы технических моющих средств (ТМС), содержащие в своем составе наряду с нефтепродуктами значительное количество щелочных добавок и различных поверхностно-активных веществ (ПАВ), относятся к числу химических загрязнителей окружающей среды [1–3], которые подлежат обязательному сбору и утилизации, а в отдельных случаях – уничтожению.

Анализ защиты окружающей среды от вредного воздействия отработавших водных растворов ТМС. Разнообразные технологические процессы вспомогательного производства предполагают использование широкого ассортимента водных растворов ТМС, которые перед употреблением разводят водой, содержание концентрата в конечном продукте составляет 2...5%. Этот факт существенно увеличивает реальную долю общего объема потребления водных растворов ТМС среди прочих продуктов, содержащих нефтепродукты и ПАВ. Для уменьшения объема отработавших водных растворов ТМС на многих предприятиях реализованы *индивидуальные и централизованные схемы очистки*. Этот путь предполагает периодическое удаление загрязнений и добавку свежего продукта. Проведение очистки и регенерации работающих водных растворов ТМС на месте потребления позволяет снизить их расход примерно на 20...50%, устранить неприятные запахи и на 94% снизить возникновение дерматитов у обслуживающего персонала [1; 4–6]. Полностью отработавшие водные растворы ТМС подлежат обезвреживанию и утилизации. Зарубежные специалисты считают это не только экологическим мероприятием, но и источником получения прибыли, поскольку продукты, получаемые при разделении или переработке отработавших водных растворов ТМС, могут являться товарными [1; 3; 4; 7]. Сброс отработавших водных растворов ТМС или их подача в очистные устройства без предварительной обработки запрещены. Наличие в отработавших продуктах дорогостоящих дефицитных компонентов повышает экономическую целесообразность их утилизации. Обезвреживание отработавших водных растворов ТМС, как правило, предполагает разложение их на воду и нефтепродукты с последующей очисткой. Выделенные из смеси отработавших водных растворов ТМС нефтепродукты используются в основном в качестве топлива [1; 8].

Известно, что в большинстве стран органы здравоохранения ограничивают допустимую концентрацию масла в сточных водах предприятий (обычно не выше 10...50 млн⁻¹) [7]. Это делает необходимым очистку выделенной водной фазы. В настоящее время большинство современных способов разложения эмульсий обеспечивают получение воды с содержанием масла не более 20 млн⁻¹. Возможна биологическая очистка такой воды [4; 9].

Широкое распространение находят *термические способы обезвреживания сжиганием и упариванием*. Однако простое сжигание отработавших водных растворов ТМС даже со значительным содержанием нефтепродуктов в специальных печах требует существенных затрат и экономически невыгодно. Более рациональным способом является выпаривание, которое дает возможность повторно использовать

водный конденсат для приготовления водных растворов ТМС, а нефтепродукты – в качестве компонента жидкого топлива и в качестве технологической смазки [8; 9].

При *реагентном способе обезвоживания* в качестве деэмульгатора используют различные реактивы (медный купорос, магниевый сернокислый и хлористый, железный купорос, квасцы аммиачные, марганец уксуснокислый и др.) [1; 9].

Среди известных промышленных способов разрушения отработавших водных растворов ТМС наиболее распространены способы с использованием химических реагентов, однако возможны также и *отстаивание и сепарация* [1; 9]. В основном это относится к выделению нефтепродуктов.

Наиболее перспективными из *физико-химических способов* являются: обратный осмос, ультрафильтрация, тонкопленочное испарение или электрохимические способы разрушения эмульсионных компонентов, а также совмещение их с реагентными способами [1; 9]. Представляет интерес способ интенсификации технологии мембранного разделения, основанный на магнитооживлении магнитных металлокерамических тел, устанавливаемых в канале трубчатых элементов, что способствует более высокому концентрированию нефтепродуктов и повышению производительности ультрафильтрации в 1,1...1,3 раза [1; 9].

Получаемые при разделении и очистке продукты обычно содержат посторонние примеси, повышающие химическую потребность в кислороде (ХПК) отходов. В ряде стран с учетом ХПК установлено стоимостное возмещение за степень загрязнения окружающей среды [7]. Отработавшие водные растворы ТМС имеют достаточно высокие значения ХПК, что также усложняет процесс их разделения (комбинирование различных процессов), повышая тем самым его стоимость.

Для отработавших водных растворов ТМС наиболее рациональным признан способ сбора и утилизации непосредственно на местах их потребления. Это связано с необходимостью разрушения и обезвреживания больших объемов эмульсионных отходов, а также с необходимостью параллельной очистки выделяемой из отходов воды, что более экономично и технически целесообразно производить на местах потребления.

Перед многими промышленными предприятиями остро стоит проблема утилизации отработавших водных растворов ТМС. Это объясняется тем, что при сравнительно небольших объемах отработавших водных растворов ТМС для большинства малых и средних предприятий, установка специализированного оборудования по переработке и утилизации этих растворов, как и их транспортировка на крупные предприятия (обладающие таким оборудованием) экономически нецелесообразны. Для таких предприятий перспективным является поиск способов максимального применения отработавших водных растворов ТМС непосредственно на предприятии либо на предприятиях данного региона, причем желательно с минимальными затратами на очистку и переработку. Один из возможных способов такого применения отработавших водных растворов ТМС – использование их вместо воды в технологии получения эмульсий на основе нефтесодержащих отходов (НСО) с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем с последующим использованием для различных целей как самим предприятием-изготовителем, так и другими потребителями эмульсии [10; 11]. Эти растворы содержат в своем составе наряду с нефтепродуктами значительное количество различных поверхностно-активных веществ, которые трудно выделить из раствора и утилизировать. Добавление к НСО (вместо воды) отработавших водных растворов ТМС позволит не только экономить воду, нефтепродукты и эмульгаторы, необходимые для приготовления стабильной эмульсии, но и значительно улучшить экологическую обстановку в регионе за счет снижения объемов отработавших водных растворов ТМС, попадающих в сточные воды.

Обоснование возможности использования отработавших водных растворов ТМС вместо воды при приготовлении эмульсии на основе НСО и является *целью данного исследования*.

Методика определения влияния содержания отработавших водных растворов ТМС и эмульгатора в эмульсии на её стабильность. Для всех экспериментальных исследований использовались одинаковые по первоначальному химическому составу НСО и отработавшие водные растворы ТМС. С целью повышения достоверности экспериментов в каждой серии опытов поддерживались одинаковые условия: давление в сети сжатого воздуха, частота импульсов, температура жидкости, содержание веществ, влияющих на стабильность эмульсии, и время перемешивания.

Компоненты для эксперимента подготавливали следующим способом. В ёмкость заливалась вода (объем, которой определялся по высоте столба жидкости) либо отработавший водный раствор ТМС, затем добавлялся эмульгатор (объем измерялся мерной колбой). Жидкость перемешивалась до полного растворения эмульгатора при помощи ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем. После этого добавлялись НСО, которые использовались в качестве основы для приготовления эмульсии. Компоненты нагревались при помощи трубчатого электронагревателя.

Последовательность проведения экспериментов: после перемешивания в течение 15 минут (так как большее время перемешивания не даёт ощутимого влияния на стабильность) отбиралась проба с по-

верхности жидкости и со дна емкости; затем добавлялся эмульгатор для получения нового процентного соотношения «отработавший водный раствор ТМС – эмульгатор» и проверялась температура жидкости (при необходимости проводился дополнительный подогрев); компоненты вновь перемешивались в течение 15 минут и т.д.

Стабильность приготовленной эмульсии оценивалась по количеству выделившейся воды за промежутки времени от 1 до 30 дней. Расслоение измерялось при помощи пробирок по высоте столба жидкости. Стабильность эмульсии y (содержание в эмульсии избыточной воды, находящейся в неэмульгированном состоянии) в процентах вычислялась по формуле:

$$y = \frac{V_1}{V} \cdot 100,$$

где V_1 – объем воды, выделившейся из эмульсии, мл; V – объем испытуемой эмульсии, мл.

Экспериментальное исследование влияния содержания отработавших водных растворов ТМС и эмульгатора в эмульсии на её стабильность. Ранее были проведены экспериментальные исследования, которые позволили определить процентное содержание воды в эмульсии на основе НСО, приготовленной с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем, что дало возможность получить эмульсию с требуемой стабильностью [10]. В качестве эмульгаторов использовались два состава. В составе 1 эмульгатор – синтетическое моющее средство МС-32»; в составе 2 – Лабомид 101. Эксперименты показали, что использование состава 2 дает лучший результат. Определение оптимального содержания воды представлено в [10] и на рисунках 1 и 2.

При исследовании влияния содержания отработавших водных растворов ТМС и эмульгатора в эмульсии на её стабильность содержание отработавших водных растворов ТМС принималось по результатам экспериментов [10] (для эмульсий, используемых непосредственно на предприятии, – 40% от объема НСО; для эмульсий на продажу – 30%); в качестве эмульгатора использовался состав 2.

Исследования проводились на опытно-промышленной установке по приготовлению эмульсии с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем, на ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт». При этом установлена частота импульсов – 1 импульс в секунду при давлении в сети подвода сжатого воздуха 0,4 МПа.

Эмульгатор вводился в объеме 0; 20; 40; 60; 80 и 100% от объема, использованного при экспериментальных исследованиях, в которых использовались НСО и вода. Результаты проведенных экспериментов (средний процент выделившейся воды) представлены на рисунках 3 и 4. Результаты экспериментальных исследований при содержании эмульгатора 20% и без эмульгатора не приведены, так как в этих случаях стабильная эмульсия не была получена.

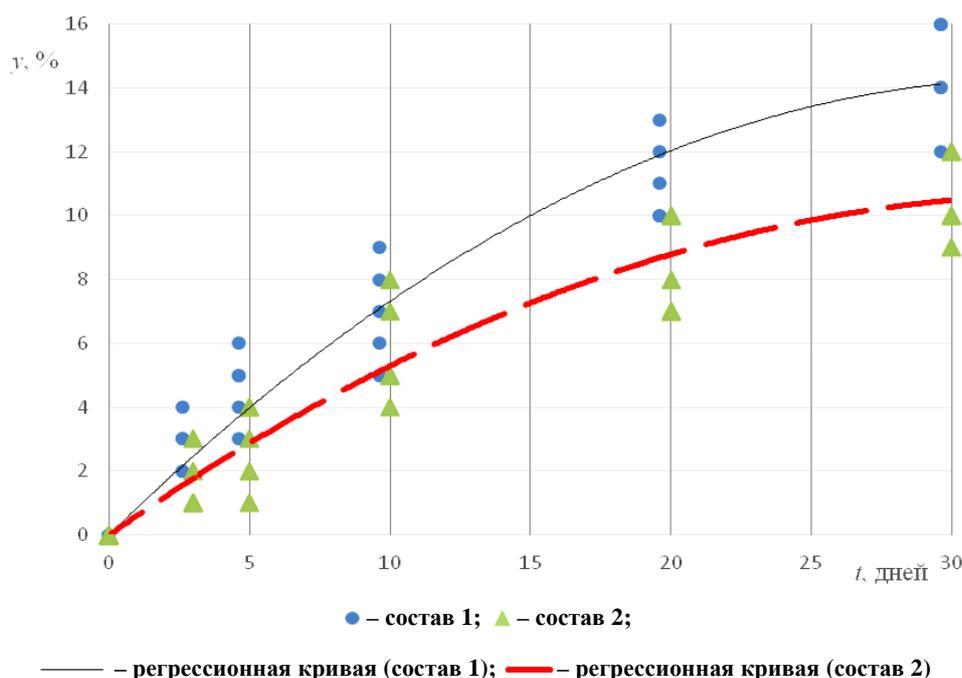


Рисунок 1. – Доля выделившейся воды из эмульсии y за время t при начальном содержании воды в отходах 40 %

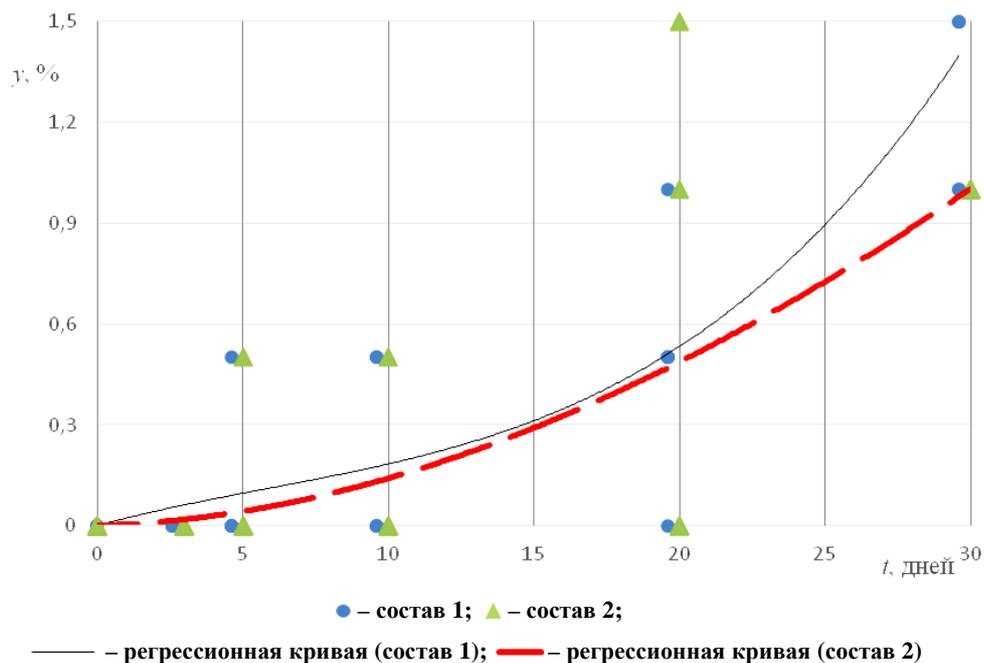


Рисунок 2. – Доля выделившейся воды y из эмульсии за время t при начальном содержании воды в отходах 30 %

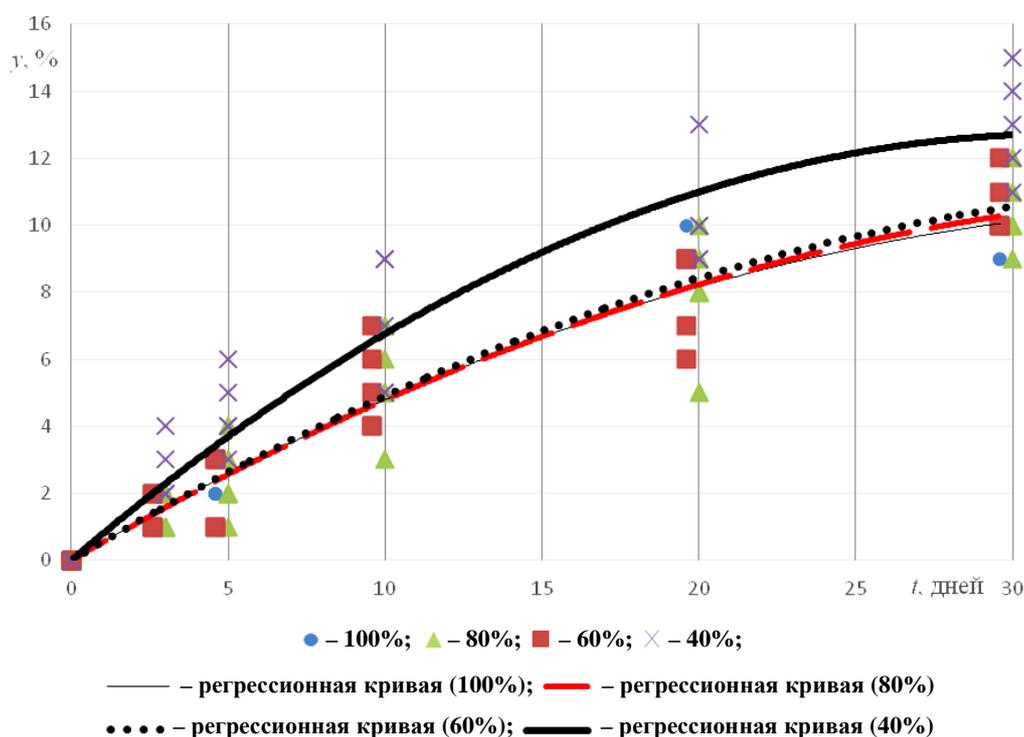


Рисунок 3. – Доля выделившейся воды из эмульсии y за время t при содержании отработавшего водного раствора ТМС в отходах 40 % (в процентах указана доля эмульгатора от исходного объема)

Замена воды на отработавший водный раствор ТМС при производстве эмульсии оказывает положительное влияние на стабильность эмульсии (см. рисунки 1–4).

Использование вместо воды отработавших водных растворов ТМС позволяет уменьшить применение эмульгатора при сохранении требуемой стабильности эмульсии. Так, на рисунке 3 видно, что при содержании эмульгатора 100, 80 и 60% от объема эмульгатора, используемого при приготовлении эмуль-

сии, состоящей из 60% НСО и 40% воды, регрессионные кривые практически совпадают, что говорит о почти одинаковой стабильности эмульсий.

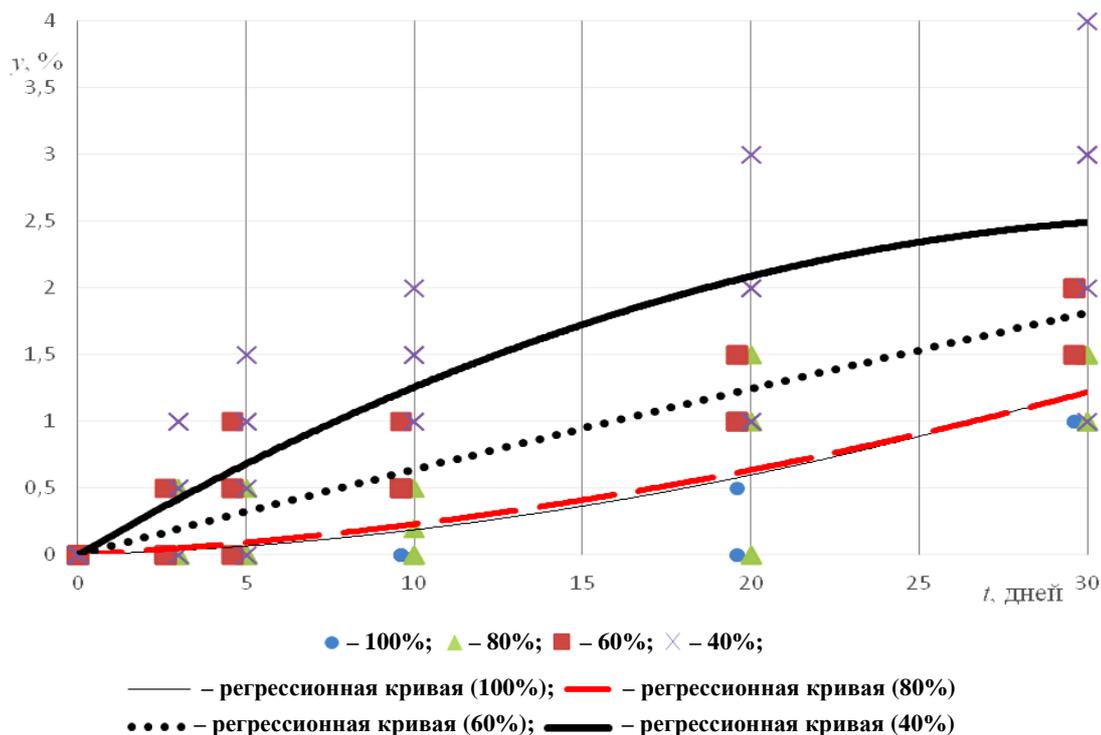


Рисунок 4. – Доля выделившейся воды из эмульсии γ за время t при содержании отработавшего водного раствора ТМС в отходах 30 % (в процентах указана доля эмульгатора от исходного объема)

Из рисунка 4 видно, что лишь при содержании эмульгатора 40% от объема эмульгатора, используемого при приготовлении эмульсии, состоящей из 70 % НСО и 30 % воды, получается эмульсия, не обладающая требуемой стабильностью (в нескольких опытах).

Таким образом, при использовании вместо воды отработавших водных растворов ТМС содержание эмульгатора можно уменьшить на 40...60%, так как отработавшие водные растворы ТМС включают поверхностно-активные вещества и щелочные добавки, позволяющие получить эмульсию с требуемой стабильностью. При использовании вместо воды в эмульсии отработавших водных растворов ТМС уменьшается объем их попадания в окружающую среду на величину объема использованного раствора и тем самым улучшается экологическая обстановка в регионе.

Полученная эмульсия использовалась на филиале «НЖБ» ОАО «Кричевцементношифер» в качестве противoadгезионного покрытия, наносимого на поверхности форм для изготовления железобетонных изделий, что обеспечило нормативное качество поверхностей изготавливаемых изделий при себестоимости на 30...70% ниже, чем у промышленных эмульсий, реализуемых современном на рынке.

Выводы

1. Доказана возможность использования отработавших водных растворов ТМС вместо воды при приготовлении эмульсии с требуемой стабильностью на основе НСО с помощью ударных волн, генерируемых пневматическим излучателем.

2. Определено оптимальное содержание эмульгатора в эмульсии, позволяющее получить эмульсию со стабильностью, достаточной для ее промышленного использования в качестве противoadгезионного покрытия форм при производстве железобетонных изделий.

3. Результаты исследований позволяют усовершенствовать технологию приготовления эмульсии. Использование предприятиями предложенной технологии позволяет защитить окружающую среду от вредного воздействия НСО и отработавших водных растворов ТМС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю. Евдокимов [и др.]. – М. : ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. – 424 с.

2. Папок, К.К. Ядовитость топлив, масел и технических жидкостей / К.К. Папок, И.Г. Барон. – М. : Изд-во М-ва обороны СССР, 1960. – 79 с.
3. Gyula, Oros. Biological activity and environmental impact of anionic surfactants / Oros Gyula // Environ. Int. – 2002. – 28, № 5. – P. 337–348.
4. Leslie, P. A water reuse system for pikes peak / P. Leslie, T. Sanders, E. Marybeth. – Colorado : Abstr. 4 th International Conference on Life Support and Biosphere Science, Baltimore, Md, Aug. 6–9, 2000. Life Support and Bios, Sci. – № 1. – 2000. – 133 p.
5. Тельнов, Н.Ф. Очистка машин и вопросы экологии / Н.Ф. Тельнов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 4. – С. 36–41.
6. Говорушко, С.М. Экологические последствия добычи, транспортировки и переработки ископаемого топлива / С.М. Говорушко ; Дальневосточный федеральный ун-т ; РАН, Дальневосточное отд-ние, Тихоокеанский ин-т географии. – Владивосток : Дальнаука, 2014. – 208 с.
7. Основы общей экологии и международной экологической политики : учеб. пособие для вузов / Р.А. Алиев [и др.] ; МГИМО МИД России. – М. : Аспект Пресс, 2014. – 382 с.
8. Шурыгин, А.П. Огневое обезвреживание промышленных сточных вод / А.П. Шурыгин, М.Н. Бернардинер. – К. : Техника, 1976. – 200 с.
9. Курганский, М.И. Установки заводского изготовления и компактные сооружения для очистки сточных вод : учеб. пособие / М.И. Курганский, В.Н. Зенцов, М.С. Клявлин. – Уфа : Реактив, 2001. – 90 с.
10. Иванов, В.П. Утилизация сточных вод с нефтесодержащими отходами эмульгированием и сжиганием / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2015. – № 4. – С. 141–146.
11. Дронченко, В.А. Влияние содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов / В.А. Дронченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 82–86.

Поступила 02.06.2016

PROTECTION OF THE ENVIRONMENT FROM THE EXHAUST OF AQUEOUS SOLUTIONS OF TECHNICAL DETERGENTS

V. IVANOV, V. DRONCHENKO

The proposed use of spent aqueous solutions of technical detergents in the production of emulsions based on oily wastes. The results of experimental studies of the effect of spent aqueous solutions of technical detergents on the stability of the emulsion based on oily wastes prepared using shock waves generated by a pneumatic transducer. The optimum content of the emulsifier in the emulsion to obtain emulsion with sufficient stability for industrial use as anti-adhesion coating forms in the production of concrete products. Recommendations for improving technologies to protect the environment from the harmful effects of oily waste and spent aqueous solutions of technical detergents.

Keywords: *spent aqueous solutions of technical detergents, the stability of the emulsion, emulsions, geoecology.*

СОДЕРЖАНИЕ

ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Габрусь Т.В.</i> Традиции и современные тенденции сакрализации общественной памяти в монументальном искусстве и архитектуре Беларуси	2
<i>Книга Е.Н.</i> Развитие архитектуры учреждений дополнительного образования детей в Беларуси	12
<i>Боровкова А.А.</i> Основная проблематика и тенденции формирования студенческого жилья. Объемно-планировочное решение студенческих общежитий Полоцкого государственного университета	18

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Сафончик Д.И.</i> К вопросу об энергоэффективности ограждающих конструкций малоэтажных зданий.....	24
<i>Бакатович А.А., Давыденко Н.В., Долженок А.В.</i> Стеновые материалы на основе соломы и костры льна с высокими теплоизоляционными свойствами	28
<i>Бабицкий В.В., Ковшар С.Н.</i> Метод прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетона	33
<i>Кологривко А.А., Иголка Д.А., Лукия Е.М.</i> Исследование материалов крепи шахтных стволов	38
<i>Пантелеенко Ф.И., Шумов О.В., Хейдари Монфаред А.</i> Определение деформаций при сварке аустенитной стали	43
<i>Разуева Е.А., Бозылев В.В., Парфенова Л.М.</i> К вопросу получения беспоровой поверхности плитных конструкций, изготовленных по кассетной технологии.....	47
<i>Бурба Д.В., Сафончик Д.И.</i> Изменение физико-механических свойств бетонов при их модификации отходами камнеобработки и техническими волокнами	53
<i>Парфенова Л.М., Бозылев В.В., Шведов А.П., Высоцкая М.Н.</i> Режимы и способы активации золошлаковых отходов теплоэлектростанций	57

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

<i>Гиль А.И., Лазовский Е.Д.</i> Перспективы применения пологоотогнутой стеклопластиковой арматуры в зоне среза изгибаемых армобетонных элементов.....	61
<i>Надольский В.В.</i> Неопределенности расчетных моделей сопротивления стальных конструкций	66
<i>Глухов Д.О., Хаткевич А.М.</i> Метод расчета прочности сжатых каменных элементов по сечениям, нормальным к продольной оси.....	73
<i>Садин Эбраим Язуб, Хотько А.А.</i> Экспериментальные исследования деформативности сцепления с бетоном стеклопластиковой арматуры производства Республики Беларусь	79
<i>Иванов А.А., Атрахимович В.И.</i> Испытательная установка для исследования устойчивости пластин при сдвиге	85

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

<i>Липко В.И., Широкова О.Н.</i> Энергоресурсосберегающие новационные технологии тепло-, газо-, воздухоснабжения жилых зданий и использование возобновляемых вторичных и природных энергоресурсов в градостроительстве	89
<i>Кульбей А.Г., Киселёв Д.А.</i> Разработка методов ликвидации трубопроводов, проложенных способом наклонно-направленного бурения	96
<i>Спиридёнок Л.М., Казмиркивский В.О.</i> Нормативно-техническая база при проведении работ по очистке магистральных нефтепроводов от остатков нефти	102
<i>Малашенко С.М., Смиловенко О.О.</i> Прогнозирование времени тушения резервуаров при применении данного способа.....	109
<i>Спиридёнок Л.М., Кисёлев Д.А., Гриневич А.А.</i> Анализ способов восстановления нормативной глубины залегания магистральных трубопроводов	114

ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Ярмоленко А.С., Куцаева О.А.</i> Расчет взаимной информации между распознаваемыми объектами при дешифрировании многоканальных изображений	119
<i>Михеева А.А.</i> Выбор масштаба аэрофотосъемки для качественного дешифрирования объектов разных форм	129
<i>Крячок С.Д., Боханов И.И., Мамонтова Л.С.</i> Обоснование параметров взаимного расположения приборов при определении постоянной поправки электронного дальномера.....	133
<i>Маркович К.И., Макарова М.В.</i> Анализ получения нормальных высот точек земной поверхности с использованием данных спутниковых измерений и моделей геоида	139
<i>Ивашина А.С.</i> Влияние геометрии расположения общих точек на результаты трансформации	143
<i>Лаевская Е.В., Воробьёва Е.В., Чередищенко Д.В., Воробьёв П.Д., Кологривко А.А.</i> Физико-механические свойства новых материалов, полученных из глиносодержащих отходов калийного производства.....	148
<i>Маркович К.И.</i> Оценка изменения ускорения силы тяжести, вызванная колебаниями уровенных поверхностей вследствие заполнения водохранилища Полоцкой ГЭС.....	156
<i>Иванов В.П., Дронченко В.А.</i> Защита окружающей среды от отработавших водных растворов технических моеющих средств	160